

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІДГУКУ КОЛИВАЛЬНОГО КОНТУРА НА ДІЮ ЧМС НА ОСНОВІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНО-ТЕЙЛОРІВСЬКИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Розглянуто застосування диференціально-тейлорівських (ДТ) перетворень при визначенні вихідної напруги частотно-модульованого сигналу (ЧМС) після проходження останнього через реальний смуговий фільтр.

Постановка проблеми у загальному вигляді. На сучасному етапі розвитку радіоелектронних засобів (РЕЗ) різного призначення все частіше використовуються складні сигнали, в яких база сигналу (добуток ширини спектра на тривалість сигналу) набагато більше одиниці $B = \Delta f_c \cdot \tau_c \gg 1$. Утворення складних сигналів пов'язано зі зміною за нелінійним законом повної фази сигналу. Яскравими представниками таких сигналів є фазо-кодо-маніпульовані та лінійно-частотно-модульовані сигнали (ЛЧМС). В системах спеціального контролю набуває подальшого розвитку автоматизація процесів обробки сигналів, де серед інших задач вирішується питання визначення виду модуляції сигналів. З метою розділення сигналів за видом модуляції при умові невеликого відношення сигнал–шум (ВСШ) потрібно застосовувати операції нелінійного аналізу, оскільки при нелінійній обробці складних сигналів можливо значно підвищити ВСШ (теоретично в базу сигналу).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Практика застосування операційних методів, які ґрунтуються на інтегральних перетвореннях, показала їх високу ефективність при дослідженнях систем, стан яких описується диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами. Ефективним виявилось їх так зване комплексне числення, яке засновано на подвійному інтегральному перетворенні Фур'є з кінцевими границями, для обчислення періодичних процесів у системах, які описуються диференціальними рівняннями зі змінними коефіцієнтами і нелінійними диференціальними рівняннями [1]. З аналізу робіт по застосуванню інтегральних операндів для вивчення неперіодичних процесів у системах з нелійними та змінними параметрами видно, що вирішення задач можливо лише в квазізмінній постановці у зв'язку зі складністю переведення в область інтегральних зображень основної нелінійної операції – операції добутку оригіналів. Тому постає питання знаходження інших методів дослідження нелінійних систем.

В пошуках математичного апарата, який дозволяє виконувати операції нелінійного аналізу без значних обмежень, було знайдено апарат ДТ-перетворень, який має широкі можливості з вирішення завдань аналізу нелінійних систем.

Основна відмінність ДТ-перетворень від інтегральних полягає в тому, що перехід від оригіналів до зображень відбувається диференціюванням оригіналів, що при визначених правилах взяття похідної практично не складає труднощів.

Добутку функцій в області оригіналів відповідає в області ДТ-зображень порівняно проста операція – сумування парного добутку дискрет зображень заданих функцій. Це дозволяє розповсюдити ідеї інтегральних операційних методів на нелінійні системи у тих випадках, коли можливо знайти відповідне ДТ-зображення.

Формування цілей статті. Для побудови математичних моделей нелінійного аналізу сигналів на основі ДТ-перетворень обов'язково вирішується питання смугової фільтрації за частотою. В роботах [1], [3] визначені основні підходи щодо вирішення такого питання. Метою даної статті є знаходження математичної моделі проходження частотно-модульованого сигналу через реальний смуговий фільтр на основі загальних визначень, які викладено в [1] та [3].

Виклад основного матеріалу. Знайдемо відгук коливального контура на дію ЛЧМС за допомогою ДТ-перетворень. Сигнал будемо вважати безперервним разом з його похідними на інтервалі аналізу H . В якості смугового фільтра візьмемо паралельний коливальний контур.

Вирішення задачі проведемо в наступній послідовності:

1. Знайдемо ДТ-спектр $S(k)$, який є дійсною функцією цілочисельного аргумента k , для ЛЧМС $s(t)$ [2]:

$$s(t) = A_m \cos(\omega_0 t + \gamma t^2), \quad 0 \leq t \leq \tau_c, \quad (1)$$

$$S(k) = \frac{H^k}{k!} \left(\frac{d^k s(t)}{dt^k} \right) \Big|_{t=0}, \quad k = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

$$\gamma = 2\pi \frac{\Delta f_c}{\tau_c}, \tag{3}$$

де A_m – амплітуда ЛЧМС;

ω_0 – несуча частота;

γ – швидкість зміни частоти;

Δf_c – девіація частоти;

τ_c – тривалість ЛЧМС;

t – час.

2. Складемо рівняння відгуку коливального контура на дію ЛЧМС.

3. Розв'яжемо рівняння за допомогою ДТ-перетворення.

1. ДТ-спектр ЛЧМС

ЛЧМС – сигнал, в якому амплітуда – величина постійна, а частота змінюється за лінійним законом в межах тривалості (1). Девіація частоти визначає ширину спектра сигналу [2]:

$$\Delta f_c = f_{\max} - f_{\min}. \tag{4}$$

У відповідності до [1] ЛЧМС може бути розкладено в ряд, який за своєю будовою відповідає ряду Тейлора:

$$s(t) = S(0) + \frac{t}{H} S(1) + \left(\frac{t}{H}\right)^2 S(2) + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H}\right)^k S(k), \tag{5}$$

де $S(k)$ – складові ДТ-спектра або просто ДТ-спектр. Величина H відповідає розмірності часу та повинна бути меншою радіуса збіжності ряду (5), який можна визначити з границі

$$\rho = H \lim_{k \rightarrow \infty} \left| \frac{S(k)}{S(k+1)} \right|. \tag{6}$$

Якщо сигнал за тривалістю більший H , то його необхідно поділити на підінтервали, кількість яких становитиме

$$N_i = \text{round} \left[\frac{\tau_c}{H} \right], \tag{7}$$

де $\text{round}[\dots]$ – функція округлення до більшого цілого. У такому випадку отримаємо інтервал аналізу, який позначимо:

$$h = \frac{\tau_c}{N_i}. \tag{8}$$

Для визначення ДТ-спектра ЛЧМС в (2) необхідно знайти певну кількість похідних сигналу. Такий шлях є вірним, але неефективним. ДТ-перетворення, як і інші перетворення, мають у своєму складі розширений апарат формальних переходів від оригіналів до зображень. Скористуємося цим апаратом і визначимо ДТ-спектр у вигляді рекурентної формули за допомогою квадратурної складової ЛЧМС:

$$g(t) = A_m \sin(\omega_0 t + \gamma t^2), \quad 0 \leq t \leq \tau_c. \tag{9}$$

Знаходимо похідні від (1) і (9):

$$\begin{aligned} \frac{ds(t)}{dt} &= -A_m \sin(\omega_0 t + \gamma t^2) \cdot (\omega_0 + 2\gamma t) = -g(t) \cdot (\omega_0 + 2\gamma t) = \\ &= -\omega_0 g(t) - 2\gamma t g(t); \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} \frac{dg(t)}{dt} &= A_m \cos(\omega_0 t + \gamma t^2) \cdot (\omega_0 + 2\gamma t) = s(t) \cdot (\omega_0 + 2\gamma t) = \\ &= \omega_0 s(t) + 2\gamma t s(t). \end{aligned} \tag{11}$$

Як видно із (10) і (11), похідні від квадратурних складових ЛЧМС можуть бути визначені через початкові сигнали $s(t)$ і $g(t)$. Скористаємося такою залежністю, а також формалізованими переходами до ДТ-перетворень [1]:

$$s(t) \Leftrightarrow S(k), \tag{12}$$

$$\frac{ds(t)}{dt} \Leftrightarrow \frac{k+1}{H} S(k+1), \tag{13}$$

$$t s(t) \Leftrightarrow H S(k-1), \tag{14}$$

$$g(t) \Leftrightarrow G(k), \tag{15}$$

$$\frac{dg(t)}{dt} \Leftrightarrow \frac{k+1}{H} G(k+1), \tag{16}$$

$$t g(t) \Leftrightarrow H G(k-1), \tag{17}$$

де \Leftrightarrow – символ відповідності між оригіналом та зображенням.

За правилами формального переходу в ДТ-перетвореннях з (10)–(17) отримуємо:

$$\frac{k+1}{H} S(k+1) = -\omega_0 G(k) - 2\gamma H G(k-1), \tag{18}$$

$$\frac{k+1}{H} G(k+1) = \omega_0 S(k) + 2\gamma H S(k-1). \tag{19}$$

Таким чином, з виразів (18) і (19) отримаємо рекурентну залежність для знаходження ДТ-спектра ЛЧМС:

$$S(k+1) = -\frac{H}{k+1} (\omega_0 G(k) - 2\gamma H G(k-1)), \tag{20}$$

$$G(k+1) = \frac{H}{k+1} (\omega_0 S(k) + 2\gamma H S(k-1)). \tag{21}$$

Потрібно звернути увагу, що початкові складові ДТ-спектра визначаються початковими значеннями сигналів $s(t)$ і $g(t)$

$$S(0) = s(0), G(0) = g(0), \tag{22}$$

а складові ДТ-спектра з негативним аргументом вважаються нульовими.

2. Рівняння відгуку коливального контура на дію ЛЧМС

Для прикладу, в якості смугового фільтра візьмемо паралельний коливальний контур (рис. 1).

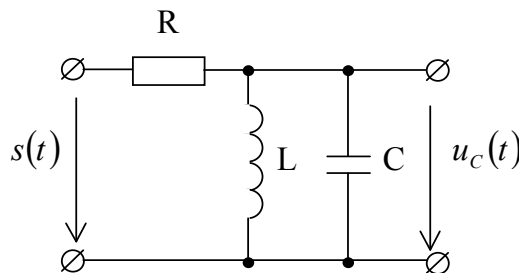


Рис. 1. Паралельний коливальний контур

Для складання рівняння відгуку контура на дію ЛЧМС $u_C(t)$ скористаємося першим та другим законами Кірхгофа [4], які стверджують, що

$$i_R(t) + i_L(t) + i_C(t) = 0, \tag{23}$$

$$s(t) + u_R(t) + u_C(t) = 0, \tag{24}$$

де $i_R(t) = \frac{u_R(t)}{R} = \frac{s(t) - u_C(t)}{R}$ – струм в опорі R ;

$u_R(t)$ – напруга на опорі;

$u_C(t)$ – напруга на ємності та індуктивності (відгук коливального контура);

$i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_C(\zeta) d\zeta$ – струм в індуктивності L ;

$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$ – струм в ємності C .

У відповідності до (23) та (24) отримаємо рівняння для визначення відгуку коливального контура:

$$\frac{s(t) - u_C(t)}{R} + i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_C(\zeta) d\zeta + C \frac{du_C(t)}{dt} = 0. \tag{25}$$

Таким чином, в результаті отримали інтегрально-диференціальне рівняння, яке зв'язує між собою вхідне $s(t)$ і вихідне $u_C(t)$ коливання. Розв'язання рівняння проведемо за допомогою ДТ-перетворення.

3. Розв'язання рівняння за допомогою ДТ-перетворення

Для розв'язання рівняння (25) скористаємося формальними переходами аналогічними (12) і (13), а також з [1]:

$$i_L(0) \Leftrightarrow i_L(0) \cdot \mathcal{B}(k), \tag{26}$$

$$\int_0^t u_c(\zeta) d\zeta \Leftrightarrow \frac{H}{k} U_c(k-1), \tag{27}$$

де $\mathcal{B}(k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k > 0 \end{cases}$ – тейлорівська одиниця,

$$u_c(t) \Leftrightarrow U_c(k).$$

В результаті формального переходу (25) до ДТ-перетворення отримаємо:

$$\frac{S(k) - U_c(k)}{R} + i_L(0) \mathcal{B}(k) + \frac{1}{L} \frac{H}{k} U_c(k-1) + C \frac{k+1}{H} U_c(k+1) = 0. \tag{28}$$

З (28) отримаємо рекурентну формулу визначення ДТ-спектра відгуку коливального контура через характеристики коливального контура R , C , L та ДТ-спектр ЛЧМС

$$U_c(k+1) = \frac{H}{k+1} \left[\frac{S(k) - U_c(k)}{\tau} - \frac{i_L(0)}{C} \mathcal{B}(k) - \omega^2 \frac{H}{k} U_c(k-1) \right], \tag{29}$$

де $U_c(0) = u_c(0)$ – початкова напруга на ємності;

$$U_c(1) = H \left[\frac{S(0) - U_c(0)}{\tau} - \frac{i_L(0)}{C} \right] \text{ – складова ДТ-спектра для } k = 0;$$

$$U_c(k+1) = \frac{H}{k+1} \left[\frac{S(k) - U_c(k)}{\tau} - \omega^2 \frac{H}{k} U_c(k-1) \right] \text{ – складові для } k > 0.$$

У відповідності до (5) часове подання відгуку коливального контура на дію ЛЧМС буде визначатися:

$$u_c(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k U_c(k). \tag{30}$$

Одержану послідовність визначення відгуку коливального контура на дію ЛЧМС було перевірено в математичному середовищі MathCad 2000. Далі наведено фрагмент програмної реалізації, який задає початкові характеристики сигналу з його часовим поданням. (рис. 2).

На рис. 3 представлено ЛЧМС, що відповідає косинусній квадратурній складовій.

Наступна частина програмної реалізації (рис. 4) визначає елементи ДТ-спектра ЛЧМС у відповідності до (20) і (21), які зберігаються в матриці S розмірністю $N \times Ni$, де N – кількість елементів ДТ-перетворення, що задовольняє необхідній точності відтворення сигналу, і Ni – кількість підінтервалів аналізу, що відповідає (7). Для знаходження матриці S необхідно паралельно визначити елементи синусної складової, що зберігаються в матриці G .

Наступний фрагмент програми (рис. 5) визначає основні показники паралельного коливального контура. Зв'язок цих показників описано в [4].

Визначення складових ДТ-спектра відгуку коливального контура на дію ЛЧМС у відповідності до (29) представлено у фрагменті програмної реалізації на рис. 6.

Параметри сигналу:

$f_c := 210000$ початкова частота, Гц $w_0 := 2 \cdot \pi \cdot f_c$ циклічна частота
 $\tau_c := 20 \cdot 10^{-5}$ тривалість сигналу, с $\Delta f_c := 10000$ девіація частоти, Гц
 $A_m := 1$ амплітуда сигналу, В

Розрахункові параметри:

$\gamma := 2\pi \cdot \frac{2\Delta f_c}{\tau_c}$ $\gamma = 6.283 \times 10^8$ швидкість зміни частоти, Гц/ с

$\frac{w_0 + \frac{\gamma}{2} \cdot \tau_c}{2\pi} = 220 \cdot 10^3$ кінцеве значення частоти сигналу за тривалість, Гц

Часове подання сигналу: $s(t) := A_m \cdot \cos\left(w_0 \cdot t + \frac{\gamma}{2} \cdot t^2\right)$ косинусна квадратурна складова

$g(t) := A_m \cdot \sin\left(w_0 \cdot t + \frac{\gamma}{2} \cdot t^2\right)$ синусна квадратурна складова

Кількість підінтервалів $N_d := 20$

Час аналізу одного підінтервалу $h := \frac{\tau_c}{N_d}$ $h = 1 \times 10^{-5}$, с

$t := 0, 0.01 \cdot h .. \tau_c$ змінна загального часу аналізу

Рис. 2. Фрагмент програмної реалізації початкових характеристик сигналу

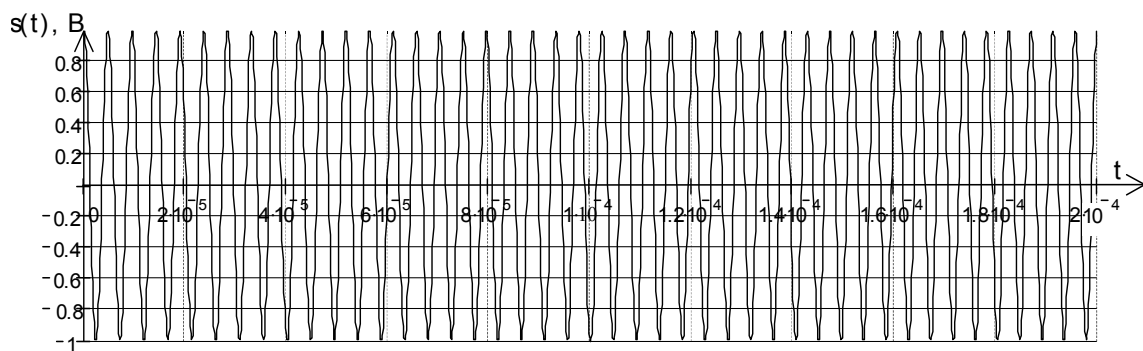


Рис. 3. Часове подання лінійно-частотно-модульованого сигналу

Кількість елементів ДТ-перетворення на 1 підінтервал $N := 100$

$$\begin{pmatrix} S \\ G \end{pmatrix} := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. N_d - 1 \\ \quad \begin{cases} S_{0,i} \leftarrow s(i \cdot h) \\ G_{0,i} \leftarrow g(i \cdot h) \\ S_{1,i} \leftarrow -h \cdot (w_0 + i \cdot h \cdot \gamma) \cdot G_{0,i} \\ G_{1,i} \leftarrow h \cdot (w_0 + i \cdot h \cdot \gamma) \cdot S_{0,i} \end{cases} \\ \text{for } i \in 0.. N_d - 1 \\ \quad \text{for } k \in 1.. N \\ \quad \quad \begin{cases} S_{k+1,i} \leftarrow \frac{-h}{k+1} \cdot [(w_0 + \gamma \cdot i \cdot h) \cdot G_{k,i} + \gamma \cdot h \cdot G_{k-1,i}] \\ G_{k+1,i} \leftarrow \frac{h}{k+1} \cdot [(w_0 + \gamma \cdot i \cdot h) \cdot S_{k,i} + \gamma \cdot h \cdot S_{k-1,i}] \end{cases} \end{cases}$$

Рис. 4. Приклад програмної реалізації з визначення ДТ-спектра ЛЧМС

$$\begin{aligned}
 f_p &:= 215000 \text{ резонансна частота коливального контуру, Гц} & \omega_p &:= 2\pi f_p \\
 \Delta f_p &:= 6000 \text{ смуга пропускання контуру, Гц} & C_k &:= 10^{-9} \text{ ємність контуру, Ф} \\
 L_k &:= \frac{1}{4\pi^2 C_k f_p^2} & L_k &= 5.48 \times 10^{-4} \text{ індуктивність контуру, Гн} \\
 \rho &:= \sqrt{\frac{L_k}{C_k}} & \rho &= 740.256 \text{ хвильовий опір, Ом} & R_k &:= \frac{f_p}{\Delta f_p} \cdot \rho & R_k &= 2.653 \times 10^4 \text{ опір контуру, Ом} \\
 \tau &:= R_k \cdot C_k & \tau &= 2.653 \times 10^{-5} \text{ стала часу контуру, с}
 \end{aligned}$$

Рис. 5. Приклад програмної реалізації визначення показників коливального контура

$$\begin{aligned}
 Vc &:= \left| \begin{array}{l} Vc_{0,0} \leftarrow 0 \\ Vc_{1,0} \leftarrow \frac{h}{\tau} \cdot S_{1,0} \\ \text{for } k \in 1..N \\ Vc_{k+1,0} \leftarrow \frac{h}{k+1} \cdot \left(\frac{S_{k,0} - Vc_{k,0}}{\tau} - \omega_p^2 \cdot \frac{h}{k} \cdot Vc_{k-1,0} \right) \\ \text{for } i \in 1..Nd-1 \\ Vc_{0,i} \leftarrow \sum_{j=0}^N Vc_{j,i-1} \\ SS_{i-1} \leftarrow \sum_{j=0}^N S_{j,i-1} \\ iC \leftarrow \sum_{j=0}^N \frac{j+1}{h} \cdot C_k \cdot Vc_{j,i-1} \\ iR \leftarrow \frac{SS_{i-1} - Vc_{0,i}}{R_k} \\ iL \leftarrow -iR - iC \\ Vc_{1,i} \leftarrow h \cdot \left(\frac{S_{0,i} - Vc_{0,i}}{\tau} - \frac{iL}{C_k} \right) \\ \text{for } k \in 1..N \\ Vc_{k+1,i} \leftarrow \frac{h}{k+1} \cdot \left(\frac{S_{k,i} - Vc_{k,i}}{\tau} - \omega_p^2 \cdot \frac{h}{k} \cdot Vc_{k-1,i} \right) \end{array} \right. \\
 &Vc
 \end{aligned}$$

Рис. 6. Приклад програмної реалізації з визначення ДТ-спектра відгуку паралельного коливального контура

Матриця Vc вміщує елементи ДТ-перетворення відгуку коливального контура і відповідає напрузі на ємності або індуктивності контура. Для визначення елементів ДТ-перетворення необхідно знати значення напруги на ємності та струму в індуктивності для кожного підінтервалу в початковий момент часу. Для першого підінтервалу ці значення без сумніву вважаються нульовими. Для кожного наступного – вони визначаються з умов безперервності, оскільки напруга та струм не можуть змінюватися стрибками. Для кожної наступної дискрети напруга на ємності буде визначатися сумою елементів ДТ-перетворення попередньої дискрети, яка у відповідності до [3] матиме вигляд:

$$u_c(h) = \sum_{k=0}^N Vc(k). \tag{31}$$

Для визначення струму крім значення напруги на ємності потрібно знати напругу джерела ЛЧМС, яку також можна визначити сумою елементів ДТ-перетворення попередньої дискрети

$$s(h) = \sum_{k=0}^N S(k). \tag{32}$$

З (23) струм в індуктивності на границі будь-якої дискрети буде визначатися струмами в опорі та ємності, які відповідно позначені iR , iC .

Функцію визначення відгуку коливального контура у відповідності до (30) пропонується модифікувати з можливістю переходу від одного підінтервалу аналізу h до іншого. Для цього введемо функцію визначення номера інтервалу, яка відповідає функції визначення цілого від ділення загального часу аналізу t на інтервал h . Така модифікація представлена в наступному фрагменті програми (рис. 7).

$$uc(t) := \sum_{k=0}^N \left(\frac{t - \text{int}\left(\frac{t}{h}\right) \cdot h}{h} \right)^k \cdot Vc_{k, \text{int}\left(\frac{t}{h}\right)}.$$

Рис. 7. Приклад програмної реалізації оригіналу відгуку коливального контура

На рис. 8 представлено часове подання відгуку коливального контура за послідовністю, що розглянута вище.

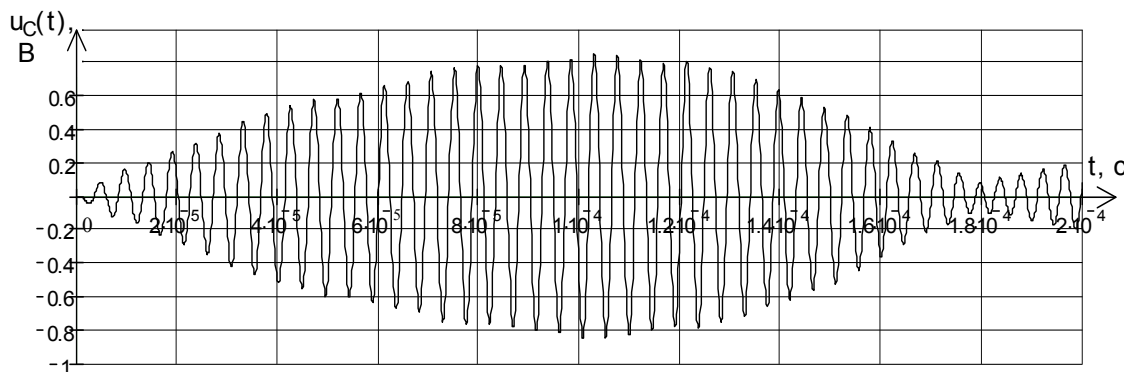


Рис. 8. Відгук коливального контура на дію ЛЧМС

Рис. 9 відображає закон зміни несучої частоти і підтверджує те, що максимум відгуку припадає на резонансну частоту контура.

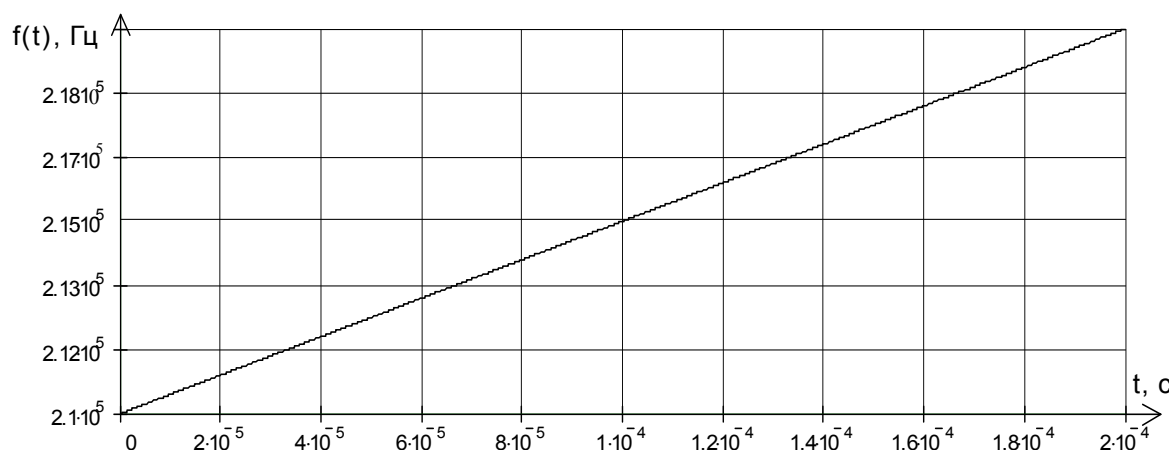


Рис. 9. Закон зміни частоти ЛЧМС за тривалість сигналу

Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку. Таким чином, проведено розв’язання задачі знаходження відгуку коливального контура на дію ЛЧМС за допомогою ДТ-

перетворень. Така послідовність вирішення задачі може бути застосована для інших сигналів, що можуть бути представлені рядом Тейлора на інтервалі аналізу H або навіть на ті, що можуть бути розбиті на підінтервали, в межах яких вони можуть бути представлені рядом Тейлора. Подальшим застосуванням отриманого результату є вирішення завдань нелінійної обробки складних сигналів на основі диференціально-тейлорівських перетворень, де потрібне розв'язання питань смугової фільтрації. Хоча існують інші варіанти вирішення останнього, наприклад, за допомогою перетворень Лапласа [5], але застосування єдиного математичного апарата значно зменшує час обрахунків, тому що немає витрат на перехід до інших перетворень. Якщо і виникає потреба в заміні математичного апарата, ДТ-перетворення мають таку можливість.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов. – К.: Наукова думка, 1986. – 160 с.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов по специальности «Радиотехника». – 2-е издание, переработано и дополнено. – М.: Высшая школа, 1988. – 448 с.
3. Пухов Г.Е. Приближенные методы математического моделирования, основанные на применении дифференциальных Т-преобразований. – К.: Наукова думка, 1988. – 216 с.
4. Деменков М.В. Теорія кіл та сигналів. Частина II. Несталі процеси в електричних колах. – Ж.: ЖВІРЕ, 1998. – 330 с.
5. Мішин О.Г. Математична модель відгуку паралельного коливального контура на дію фазоманіпульованого сигналу // Вісник ЖІТІ. – 2002. – № 4 / Технічні науки. – С. 158–164.

МІШИН Олег Геннадійович – старший викладач Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- автоматизація процесів обробки інформації;
- методи та алгоритми вторинної обробки інформації.

Подано 11.11.2003

Мішин О.Г. Математична модель відгуку коливального контуру на дію ЧМС на основі диференціально-тейлоровських перетворень

Мишин О.Г. Математическая модель отклика колебательного контура на воздействие ЧМС на основе дифференциально-тейлоровских преобразований.

Mishin O.G. Mathematical models of response of a spark circuit on effect FSK on basis differential transformations.

УДК 621.396

Математична модель відгуку коливального контуру на дію ЧМС на основі диференціально-тейлоровських перетворень / О.Г. Мішин

Розглянуто застосування диференціально-тейлоровських перетворень при визначенні вихідної напруги ЧМС після проходження останнього через реальний смуговий фільтр.

УДК 621.396

Математическая модель отклика колебательного контура на воздействие ЧМС на основе дифференциально-тейлоровских преобразований. / О.Г. Мишин

Рассмотрено применение дифференциально-тейлоровских преобразований при определении выходного напряжения ЧМС после прохождения последнего через реальный полосовой фильтр.

УДК 621.396

Mathematical models of response of a spark circuit on effect FSK on basis differential transformations / O.G. Mishin

The application of differential transformations surveyed at definition of output voltage frequency shift keying (FSK) of a signal after passing last through the real bandpass filter.