

УДК 621.372.061

Шаповалов Юрій, Шмотолоха Іван

ДУ "Львівська політехніка", кафедра радіотехнічних пристроїв

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРИЧНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ЧАСТОТНИМ СИМВОЛЬНИМ МЕТОДОМ

© Шаповалов Юрій, Шмотолоха Іван, 2000

У статті подані результати дослідження одноконтурного та двоконтурного параметричних підсилювачів частотним символьним методом.

In this paper symbolical frequency analysis of variable amplifiers is given. System function of a variable network is the main idea of this analysis.

У статті розглядається описаний у [1-4] частотний символьний метод аналізу лінійних параметричних кіл. Мета аналізу полягає у визначенні заданих напруг, струмів та вторинних параметрів (коефіцієнтів передач) кола у частотній області за умови, що деякі параметри елементів цього кола чи вхідних сигналів задані символьно. Об'єктом дослідження у статті вибрано параметричні підсилювачі, які містять один елемент із змінним у часі параметром, причому цей параметр змінюється періодично і може бути розкладений у ряд Фур'є. Суть методу така.

1. Визначаються змінні коефіцієнта передачі вхідного сигналу до параметричного елемента $H(p,t)$. Тут можливі чотири варіанти вибору цих змінних: передача струму у струм, струму у напругу, напруги у струм та напруги у напругу. Вибирають один з них, який визначається заданим джерелом вхідного сигналу та вибором змінної на параметричному елементі (її необхідно вибрати такою, що дасть змогу виконати виключення змінних у пункті 2.3). Нехай вибрано

$$u(p,t) = H(p,t) i_1(p), \quad (1)$$

де $u(p,t)$, $i_1(p)$ – напруга на параметричному елементі та струм вхідного сигналу у комплексній формі, відповідно, t – час, $p = j\omega$.

2. Формується диференціальне рівняння, залежною змінною у якому виступає $H(p,t)$, незалежною – час t [5,10].

2.1. З кола вилучається параметричний елемент (вузли, до яких він під'єднувався, не закорочуються). Для отриманої частини кола з постійними параметрами одним з класичних методів [6] складається система двох диференціальних рівнянь відносно змінних:

$$i_1(t), u_1(t), i(t), u(t), \quad (2)$$

де $i_1(t)$, $u_1(t)$, $i(t)$, $u(t)$ – вхідні струм та напруга, струм та напруга на параметричному елементі, відповідно.

2.2. Отримана у пункті 2.1 система доповнюється диференціальним рівнянням, що зв'яже $i(t)$ та $u(t)$ на параметричному елементі. Така система трьох диференціальних рівнянь описує задане параметричне коло загалом.

2.3. З одержаної у пункті 2.2 системи методом виключення змінних визначається одне диференціальне рівняння (у [2] воно назване визначальним), яке зв'яже вибрану у пункті 1

пару змінних $(i_1(t), u(t))$. Визначальне рівняння (яке є диференціальне за змінною t) позначимо через [5]:

$$M \cdot u(t) = N \cdot i_1(t), \quad (3)$$

де M, N – вирази, що визначаються структурою та параметрами кола та містять оператори $d/dt, d^2/dt^2, d^3/dt^3, \dots, d^m/dt^m$, які позначимо через p, p^2, p^3, \dots, p^m відповідно.

2.4. У [5] показано, що рівнянню (3) для часової області відповідає рівняння (4) у частотній області, а p, p^2, p^3, \dots, p^m з (3) у виразах M та N з (4) мають зміст комплексної змінної (частоти при гармонічному сигналі на вході):

$$\frac{1}{m!} \frac{\partial^m M}{\partial p^m} \cdot \frac{d^m H(p, t)}{dt^m} + \dots + \frac{\partial M}{\partial p} \cdot \frac{dH(p, t)}{dt} + M \cdot H(p, t) = N, \quad (4)$$

3. Рівняння (4) розв'язується одним з методів гальоркінського типу [7]. Розв'язок отримується у вигляді ряду Фур'є (оскільки рівняння (4) розв'язуємо у частотній області та для усталеного режиму, то цікавимося тільки вимушеною складовою розв'язку при нульових початкових умовах):

$$H(p, t) = H_0(p) + H_1 \cos(\Omega t) + G_1 \sin(\Omega t) + \dots + H_n \cos(n\Omega t) + G_n \sin(n\Omega t), \quad (5)$$

де $H_0(p), H_1(p), G_1(p) \dots H_n(p), G_n(p)$ – дробово-раціональні вирази від комплексної змінної p , Ω – частота зміни параметра параметричного елемента.

На практиці вираз (5) завжди обмежується розумною кількістю гармонік. Нехай цих гармонік є n .

3.1. Розв'язують рівняння (4) так. Вираз (5) з невідомими $(2n+1)$ величинами $H_0(p), H_1(p), G_1(p) \dots H_n(p), G_n(p)$ підставляється у (4), чим ліва частина рівняння (4) перетворюється з диференціальної у алгебраїчну форму. Далі N у виразі (4) переноситься ліворуч від знаку “дорівнює”. Після таких дій ліву частину рівняння (4) позначимо через $\delta(H, p, t)$. Рівняння (4) стає алгебраїчним і набирає вигляду:

$$\delta(H, p, t) = 0. \quad (6)$$

3.2. Враховуючи, що параметричний елемент змінюється періодично з періодом $2\pi/\Omega$, то й $\delta(H, p, t)$ є теж періодичною функцією, яка змінюється з тим самим періодом та має такі ж гармоніки, як і підставлений у неї вираз (5).

Отже, вираз $\delta(H, p, t)$ має $(2n+1)$ невідомих і складається з n гармонік, які можуть бути подані такими $(2n+1)$ виразами:

$$\delta_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \delta(H, p, t) dt, \quad \delta_{ci} = \frac{2}{T} \int_0^T \delta(H, p, t) \cos(i\Omega t) dt, \quad \delta_{si} = \frac{2}{T} \int_0^T \delta(H, p, t) \sin(i\Omega t) dt, \quad (7)$$

де $i = 1, 2, \dots, n$.

Оскільки вирази (7) – це ортогональні функції, то для забезпечення рівності (6) достатньо їх прирівняти до нуля і отримуємо систему $(2n+1)$ лінійних незалежних від часу алгебраїчних рівнянь (СЛАР) з $(2n+1)$ невідомими $H_0(p), H_1(p), G_1(p) \dots H_n(p), G_n(p)$.

$$A \cdot X = B, \quad (8)$$

де A – матриця коефіцієнтів при невідомих $H_0(p), H_1(p), G_1(p) \dots H_n(p)$; X – матриця невідомих $H_0(p), H_1(p), G_1(p) \dots H_n(p)$; B – матриця вільних членів.

Розв'язуючи СЛАР (8), одержуємо шукані невідомі $H_0(p), H_1(p), G_1(p) \dots H_n(p)$.

Зауважимо, що p, Ω та інші параметри елементів аналізованого кола при формуванні (8) можемо залишати у символах. Тому отримувані розв'язки можуть бути у символній,

частково символній чи дробово-раціональній формі від p . Крім того, сама система (8) може бути основою для обчислень, наприклад, чутливості $H(p, t)$ при зміні параметрів кола, p, Ω .

4. Заміна параметричного елемента джерелом напруги (струму). В результаті виконання попередніх трьох пунктів отримується $u(p, t)$ у вигляді (1), де $H(p, t)$ має вигляд (5). Подавши (5) сумою гармонік $\Omega, 2\Omega, 3\Omega, \dots$:

$$H(p, t) = H_0(p) + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ [H_n(p) - jG_n(p)] e^{jn\Omega t} + [H_n(p) + jG_n(p)] e^{-jn\Omega t} \right\}, \quad (9)$$

з (1) одержуємо $u(p, t)$ як суму гармонік $\omega \pm n\Omega$.

З іншого боку, згідно з теоремою про підстановку [9], параметричний елемент у колі можемо замінити джерелом напруги (струму), яка діє на ньому, не змінюючи інших напруг та струмів кола.

Отже, параметричний елемент замінюємо на $(2n+1)$ послідовно з'єднаних джерел напруги (паралельно з'єднаних джерел струму), кожне з яких – це знайдена на параметричному елементі гармоніка напруги (струму) з ряду $\omega \pm n\Omega$.

5. Визначення заданих напруг, струмів, вторинних параметрів кола. Попередніми діями задане параметричне коло перетворене до кола з постійними параметрами, яке крім джерела сигналу містить $(2n+1)$ залежних від сигналу джерел, в нашому випадку джерел напруги з частотами $\omega \pm n\Omega$. У такому колі з постійними параметрами, використовуючи принцип суперпозиції, можемо класичними методами [6] визначати задані напруги, струми чи необхідні вторинні параметри.

Нехай, наприклад, $K_1(p)$ – коефіцієнт передачі вхідного струму до вихідної напруги кола при закритому параметричному елементі, а $K_2(p)$ – коефіцієнт передачі напруги на параметричному елементі до тієї ж вихідної напруги при розімкненому вхідному джерелі струму. Відтак вихідна напруга з врахуванням (9) матиме вигляд

$$U_{вих}(t) = \operatorname{Re} \left\{ H(p, t) \cdot i_1(t) \right\} = \operatorname{Re} \left\{ (K_1(p) + K_2(p)H_0(p) + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} [K_2(p_n^+) [H_n(p) - jG_n(p)] e^{jn\Omega t} + K_2(p_n^-) [H_n(p) + jG_n(p)] e^{-jn\Omega t}] A e^{j\omega t} \right\} \quad (10)$$

де $p = j\omega$, $p_n^+ = j(\omega + n\Omega)$, $p_n^- = j(\omega - n\Omega)$, $A e^{j\omega t}$ – комплексна форма подання вхідного струму амплітудою A .

ПРИКЛАД 1. Одноконтурний параметричний підсилювач (рис.1). Визначимо коефіцієнт передачі $H(p, t) = u(p, t)/i(p)$.

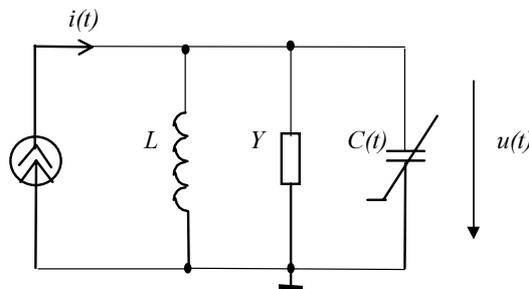


Рис.1. Одноконтурний параметричний підсилювач: $i(t) = 1 \cdot 10^{-4} \cos(\omega t)$, $C(t) = C_0(1 + m \cos(\Omega t))$, $C_0 = 100$ пФ, $L = 100$ мкГн, $Y = 2 \cdot 10^{-5}$ См, $\omega = 1 \cdot 10^7$ рад/Гц, $\Omega = 2 \cdot 10^7$ рад/Гц.

1. Вибираємо пару змінних $i(t)$ та $u(t)$ і визначаємо $H(p,t) = u(p,t)/i(p)$.
- 2.3. Складаємо визначальне рівняння для вибраних змінних

$$[C(t)p^2 + (Y + 2C'(t))p + C''(t) + \frac{1}{L}] \cdot u(t) = p \cdot i(t), \quad (11)$$

де $p=d/dt$.

- 2.4. Рівнянню з 2.3 для часової області відповідає рівняння у частотній області

$$C(t) \frac{d^2 H(p,t)}{dt^2} + [2C(t)p + Y + 2C'(t)] \frac{dH(p,t)}{dt} + \left[C(t)p^2 + p(Y + 2C'(t) + C''(t) + \frac{1}{L}) \right] H(p,t) - p = 0 \quad (12)$$

- 3.2. Розв'язування (12) зводиться до формування СЛАР, яка для кола з рис.1 при символічному p та

$$H(p,t) = H_0(p) + H_1(p) \cos(\Omega t) + G_1(p) \sin(\Omega t)$$

набирає вигляду

$$\begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_0 \\ H_1 \\ G_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

де $a_{00} = 2 \cdot 10^4 + 4 \cdot 10^{-5} p + 2 \cdot 10^{-10} p^2$; $a_{01} = 5 \cdot 10^{-13} p^2$; $a_{02} = 0$; $a_{10} = -200 + 5 \cdot 10^{-13} p^2$; $a_{11} = 3 \cdot 10^4 + 2 \cdot 10^5 p + 1 \cdot 10^{-10} p^2$; $a_{12} = 400 + 4 \cdot 10^{-3} p$; $a_{20} = -2 \cdot 10^{-5} p$; $a_{21} = -400 - 4 \cdot 10^{-3} p$; $a_{22} = 3 \cdot 10^4 + 2 \cdot 10^5 p + 1 \cdot 10^{-10} p^2$; $b_0 = 2p$.

В даному випадку вихідна напруга дорівнює напрузі на параметричному елементі і визначається з формули

$$u(t) = \text{Re}[H(p,t) i(p)]. \quad (13)$$

- ПРИКЛАД 2. Двоконтурний параметричний підсилювач (рис.2). Визначити коефіцієнт передачі $H(p,t) = u_1(p,t)/i_1(p)$

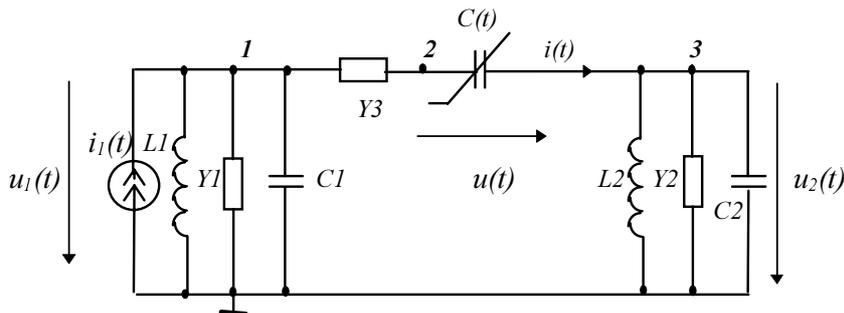


Рис.2. Двоконтурний параметричний підсилювач. $Y1=10^{-4}$ См, $C1=109.006445$ пФ, $L1=2.303 \cdot 10^{-8}$ Гн, $Y2=10^{-4}$ См, $C2=109.00893$ пФ, $L2=5.757 \cdot 10^{-9}$ Гн, $Y3=1000$ См, $i_1(t)=1 \cdot 10^{-4} \cos(\omega t)$, $C(t)=C_0(1+m \cdot \cos(\omega t))$, $C_0=1$ пФ, $\omega=2\pi \cdot 10^8$ рад/Гц, $\Omega=2\pi \cdot 3 \cdot 10^8$ рад/Гц.

1. Вибираємо пару змінних $i_1(t)$ та $u(t)$ і визначаємо $H(p,t) = u(p,t)/i_1(p)$.
- 2.3. Складаємо визначальне рівняння для вибраних змінних

$$M \cdot u(t) = N \cdot i_1(t), \quad (14)$$

де

$$\begin{aligned}
 M = & \left[\frac{Y_3}{L_1 \cdot L_2} + \frac{1}{L_1 \cdot L_2} C'(t) + \left(\frac{1}{L_1} (Y_2 + Y_3) + \frac{1}{L_2} (Y_1 + Y_3) \right) C''(t) + \left(\frac{C_2}{L_1} + \frac{C_1}{L_2} + Y_1 \cdot Y_2 + Y_1 \cdot Y_3 + Y_2 \cdot Y_3 \right) \times \right. \\
 & \times C'''(t) + (C_1(Y_2 + Y_3) + C_2(Y_1 + Y_3)) C''''(t) + C_1 \cdot C_2 \cdot C''''(t) \left. \right] + \left[\frac{1}{L_1} Y_2 \cdot Y_3 + \frac{1}{L_2} Y_1 \cdot Y_3 + \frac{1}{L_1 \cdot L_2} C(t) + \right. \\
 & + 2 \left(\frac{1}{L_1} (Y_2 + Y_3) + \frac{1}{L_2} (Y_1 + Y_3) \right) C'(t) + 3 \left(\frac{C_2}{L_1} + \frac{C_1}{L_2} + Y_1 \cdot Y_2 + Y_1 \cdot Y_3 + Y_2 \cdot Y_3 \right) C''(t) + \\
 & + 4 (C_1(Y_2 + Y_3) + C_2(Y_1 + Y_3)) C'''(t) + 5 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C''''(t) \left. \right] p + \left[\frac{C_2}{L_1} Y_3 + Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_3 + \frac{C_1}{L_1} Y_3 + \right. \\
 & + \left(\frac{1}{L_1} (Y_2 + Y_3) + \frac{1}{L_2} (Y_1 + Y_3) \right) C(t) + 3 \left(\frac{C_2}{L_1} + \frac{C_1}{L_2} + Y_1 \cdot Y_2 + Y_1 \cdot Y_3 + Y_2 \cdot Y_3 \right) C'(t) + \\
 & + 6 (C_1(Y_2 + Y_3) + C_2(Y_1 + Y_3)) C''(t) + 10 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C'''(t) \left. \right] p^2 + [Y_1 \cdot Y_3 \cdot C_2 + Y_2 \cdot Y_3 \cdot C_1 + \\
 & + \left(\frac{C_2}{L_1} + \frac{C_1}{L_2} + Y_1 \cdot Y_2 + Y_1 \cdot Y_3 + Y_2 \cdot Y_3 \right) C(t) + 4 (C_1(Y_2 + Y_3) + C_2(Y_1 + Y_3)) C'(t) + 10 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C''(t) \left. \right] p^3 + \\
 & + [C_1 C_2 Y_3 + (C_1(Y_2 + Y_3) + C_2(Y_1 + Y_3)) C(t) + 5 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C'(t) \left. \right] p^4 + C_1 C_2 C(t) \\
 N = & \left(\frac{1}{L_2} p + Y_2 p + C_2 p^2 \right) Y_3, \text{ де } t - \text{ час, } p = d/dt.
 \end{aligned}$$

2.4. Рівнянню з 2.3 для часової області відповідає рівняння у частотній області

$$\frac{1}{24} \frac{\partial^4 M}{\partial p^4} \frac{d^4 H(p,t)}{dt^4} + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 M}{\partial p^3} \frac{d^3 H(p,t)}{dt^3} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 M}{\partial p^2} \frac{d^2 H(p,t)}{dt^2} + \frac{\partial M}{\partial p} \frac{dH(p,t)}{dt} + M \cdot H(p,t) - N = 0, \quad (15)$$

де $H(p,t) = u(p,t)/i_1(p)$.

3.2. Розв'язування (14) зводиться до формування СЛАР, яка для кола з рис.2 при символічному p та

$$H(p,t) = H_0(p) + H_1(p) \cos(\Omega t) + G_1(p) \sin(\Omega t) \quad (16)$$

набирає вигляду

$$\begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_0 \\ H_1 \\ G_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

де $a_{00} = 1.509 \cdot 10^{19} + 4.344 \cdot 10^7 p + 47.771 p^2 + 4.405 \cdot 10^{-11} p^3 + 2.402 \cdot 10^{-17} p^4 + 2.376 \cdot 10^{-32} p^5$; $a_{01} = 1.688 \cdot 10^3 p + 4.863 \cdot 10^{-2} p^2 + 5.000 \cdot 10^{-14} p^3 + 4.883 \cdot 10^{-20} p^4 + 2.661 \cdot 10^{-33} p^5$; $a_{02} = 0$; $a_{10} = 4.436 \cdot 10^{17} - 3.643 \cdot 10^5 p - 9.924 \cdot 10^{-1} p^2 - 4.447 \cdot 10^{-14} p^3 + 4.883 \cdot 10^{-20} p^4 + 2.661 \cdot 10^{-33} p^5$; $a_{11} = 7.543 \cdot 10^{19} + 2.122 \cdot 10^8 p - 2.340 \cdot 10^2 p^2 + 2.160 \cdot 10^{-11} p^3 + 1.210 \cdot 10^{-17} p^4 + 1.188 \cdot 10^{-32} p^5$; $a_{12} = -1.062 \cdot 10^{17} - 2.341 \cdot 10^{11} p + 1.237 \cdot 10^{-1} p^2 + 9.123 \cdot 10^{-8} p^3 + 1.119 \cdot 10^{-22} p^4$; $a_{20} = 2.690 \cdot 10^{14} + 1.124 \cdot 10^9 p - 1.050 \cdot 10^{-4} p^2 - 3.682 \cdot 10^{-10} p^3 - 2.508 \cdot 10^{-23} p^5$; $a_{21} = 1.062 \cdot 10^{17} + 2.341 \cdot 10^{11} p - 1.237 \cdot 10^{-1} p^2 - 9.123 \cdot 10^{-8} p^3 - 1.119 \cdot 10^{-22} p^4$; $a_{22} = 7.543 \cdot 10^{19} - 2.122 \cdot 10^8 p - 2.340 \cdot 10^2 p^2 + 2.160 \cdot 10^{-11} p^3 + 1.210 \cdot 10^{-17} p^4 + 1.188 \cdot 10^{-32} p^5$; $b_0 = 3.477 \cdot 10^{11} p + 2.000 \cdot 10^{-1} p^2 + 2.180 \cdot 10^{-7} p^3$.

4. Представивши (16) сумою гармонік Ω :

$$H(p,t) = H_0(p) + \frac{1}{2} \left\{ [H_1(p) - jG_1(p)] e^{j\Omega t} + [H_1(p) + jG_1(p)] e^{-j\Omega t} \right\}, \quad (17)$$

отримуємо $u(p,t)$ у вигляді суми трьох гармонік ω , $\omega \pm \Omega$.

Параметричний елемент у колі замінюємо трьома послідовно з'єднаними залежними від вхідного сигналу джерелами напруг, кожне з яких – це знайдена на параметричному елементі гармоніка напруги з ряду $\omega, \omega \pm \Omega$.

5. Для отриманого кола, використовуючи принцип суперпозиції, визначаємо вихідну напругу.

Коефіцієнт передачі вхідного струму у вихідну напругу $K_1(p)$ при замиканні залежних джерел має вигляд

$$K_1(p) = \frac{(1/pL2) + Y2 + Y3 + pC2}{Y3((1/pL2) + Y2 + pC2) + ((1/pL2) + Y2 + Y3 + pC2)((1/pL1) + Y1 + pC1)} \quad (18)$$

Коефіцієнт передачі напруги від залежних джерел напруг, якими замінили параметричний елемент, при розмиканні вхідного джерела струму має вигляд

$$K_2(p) = \frac{((1/pL2) + Y2 + pC2)Y3}{Y3((1/pL1) + Y1 + pC1 + (1/pL2) + Y2 + pC2) + ((1/pL1) + Y1 + pC1)((1/pL2) + Y2 + pC2)} \quad (19)$$

Згідно з (10) отримуємо вихідну напругу у вигляді

$$u_1(t) = \text{Re} \left\{ \left[K_1(p) + K_2(p)H_0(p) + \frac{1}{2} \left[K_2(p_1^+) (H_1(p) - jG_1(p)) e^{j\Omega} + K_2(p_1^-) (H_1(p) + jG_1(p)) e^{-j\Omega} \right] \right] \cdot 1 \cdot 10^{-4} e^{j\alpha t} \right\} \quad (20)$$

де $p=j\omega, p^+ = j(\omega+\Omega), p^- = j(\omega-\Omega)$.

Результати дослідження одноконтурного параметричного підсилювача на основі виразу (13) наведені на рис. 3 - рис.5, двоконтурного – за виразом (20) на рис.6 – рис.8.

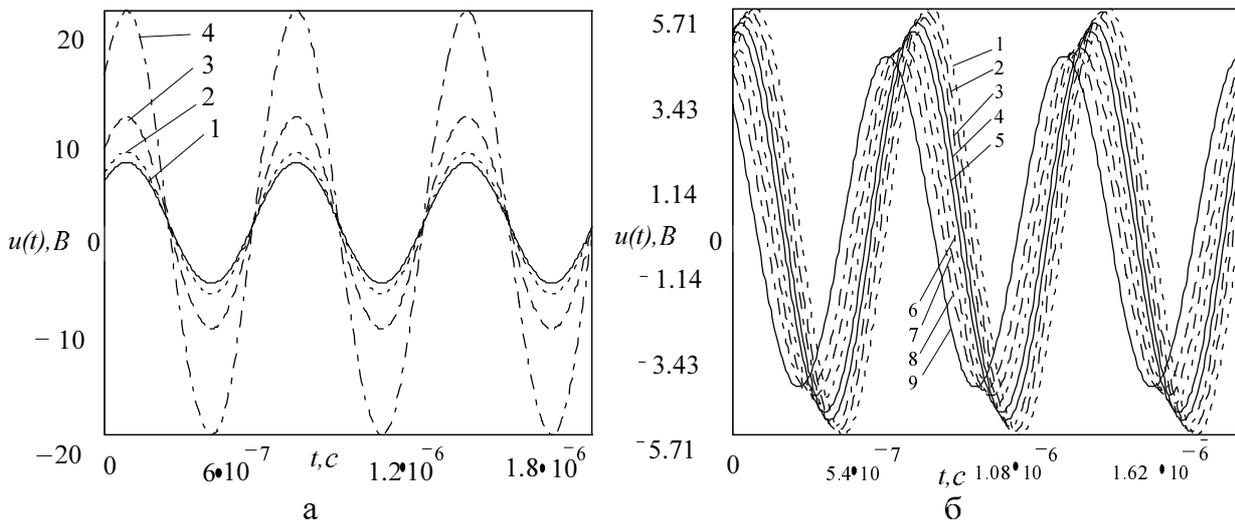


Рис.3. Залежність вихідної напруги одноконтурного параметричного підсилювача від:

а) коефіцієнта модуляції ємності при фазі вхідного сигналу $\varphi_{вх} = -45^\circ$. Крива 1 для $m=0.005$, крива 2 для $m=0.01$, крива 3 для $m=0.02$, крива 4 для $m=0.03$; б) фази вхідного сигналу при $m=0.005$.

Крива 1 для $\varphi_{вх} = -45^\circ$, крива 2 для $\varphi_{вх} = -30^\circ$, крива 3 для $\varphi_{вх} = -20^\circ$, крива 4 для $\varphi_{вх} = -10^\circ$, крива 5 для $\varphi_{вх} = 0^\circ$, крива 6 для $\varphi_{вх} = 10^\circ$, крива 7 для $\varphi_{вх} = 20^\circ$, крива 8 для $\varphi_{вх} = 30^\circ$, крива 9 для $\varphi_{вх} = 45^\circ$.

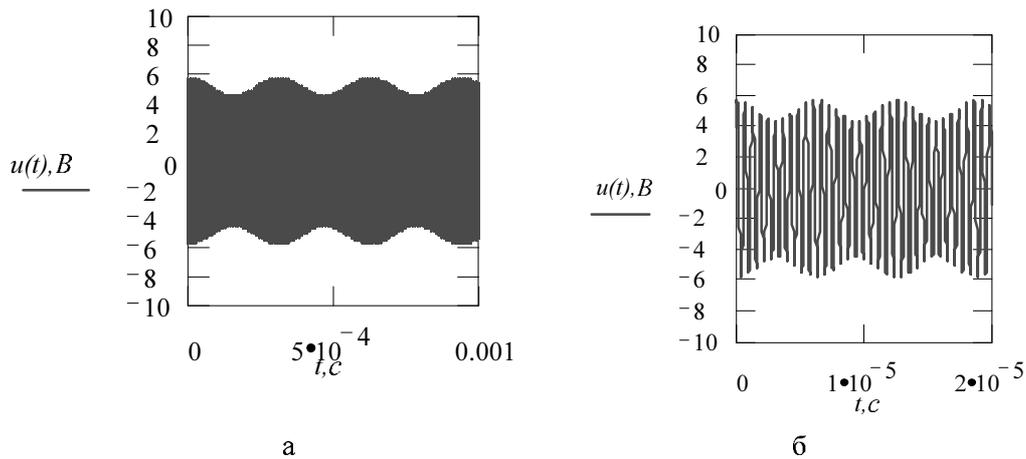
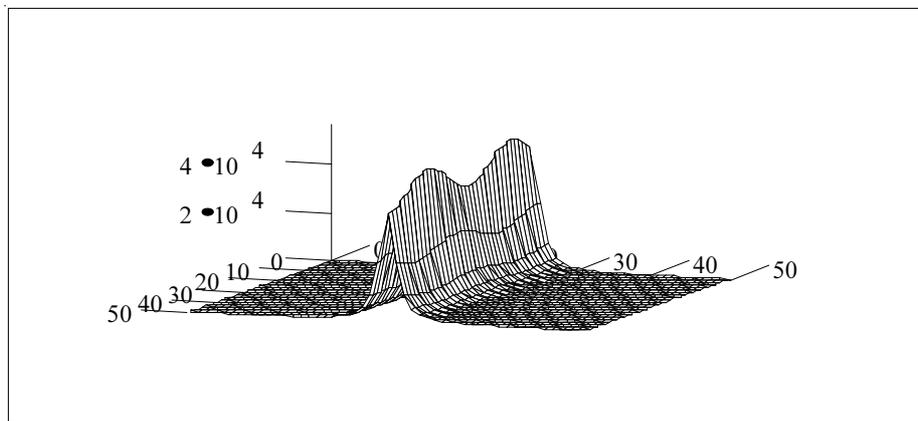


Рис.4. Залежність вихідної напруги одноконтурного параметричного підсилювача при відносному розладнанні частоти вхідного сигналу: а) 1%; б) 5%.



М

Рис.5. Амплітудно-частотно-часова характеристика одноконтурного параметричного підсилювача при $m=0.005$ у межах частоти $\omega=7.5 \cdot 10^6 \dots 12.5 \cdot 10^6$ рад/Гц і часу $t=0 \dots 5.5 \cdot 10^{-7}$ с.

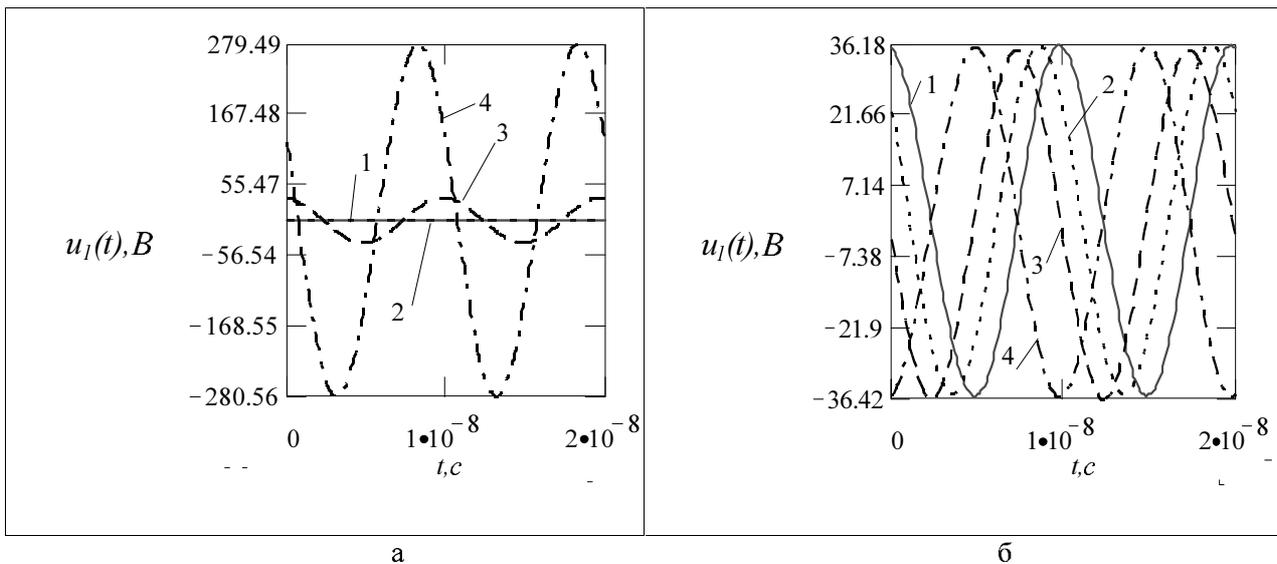


Рис.6. Залежність вихідної напруги двоконтурного параметричного підсилювача від а) коефіцієнта модуляції ємності при фазі вхідного сигналу $\varphi_{вх} = 0^{\circ}$. Крива 1 для $m=0$, крива 2 для $m=0.1$, крива 3 для $m=0.224$, крива 4 для $m=0.227$; б) фази вхідного сигналу при $m=0.224$. Крива 1 для $\varphi_{вх} = 0^{\circ}$, крива 2 для $\varphi_{вх} = 45^{\circ}$, крива 3 для $\varphi_{вх} = 90^{\circ}$, крива 4 для $\varphi_{вх} = 180^{\circ}$.

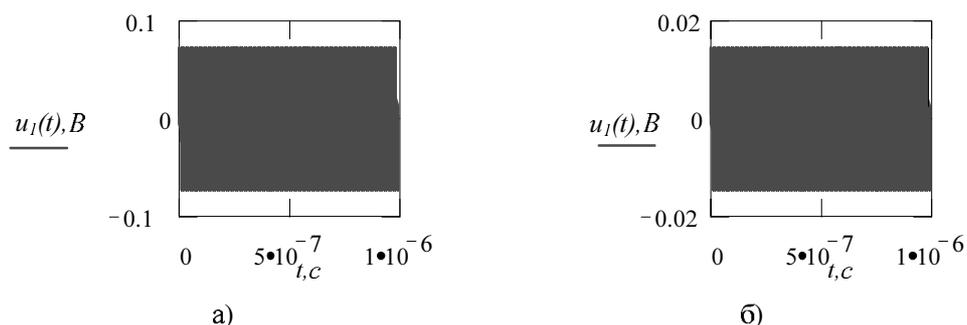


Рис.7. Залежність вихідної напруги двоконтурного параметричного підсилювача при відносному розладнанні частоти вхідного сигналу: а) 1%; б) 5%.

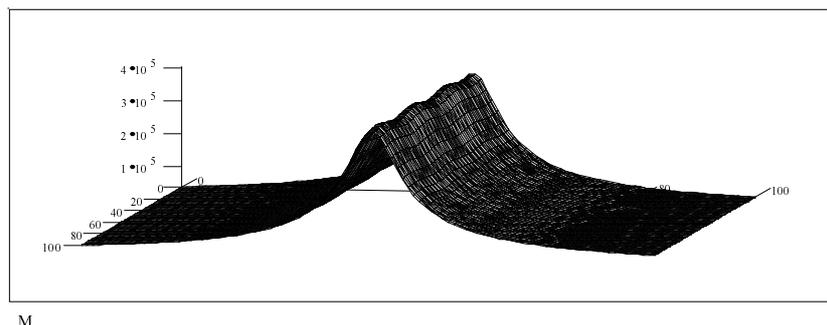


Рис.8 Амплітудно-частотно-часова характеристика при $m=0.224$ у межах частоти $f=99.99 \dots 100.1$ МГц і часу $t=0 \dots 6 \cdot \pi / \Omega$ с.

Висновки.

1. Наведені на рис.3 - рис.8 залежності збігаються з очікуваними [8] та підтверджують правильність методу:

а) при зростанні m у обох підсилювачах спостерігається зростання вихідного сигналу;
 б) одноконтурний підсилювач чутливий до зміни фази вхідного сигналу, двоконтурний цього недоліку не має;

в) при зміні частоти вхідного сигналу у одноконтурному підсилювачі спостерігається зміна рівня вихідного сигналу, подібна за характером до “биття”, у двоконтурному – цей ефект відсутній.

2. Основа запропонованого частотного символічного методу аналізу параметричних кіл полягає у формуванні та використанні СЛАР, яка, з одного боку, є символічною, з іншого – перетворює параметричне коло у коло з постійними параметрами. Ці відмінності дають змогу символічно розв’язувати задачі статистичного аналізу, оптимізації та синтезу параметричних кіл як кіл з постійними параметрами.

3. Особливістю запропонованого методу, як і будь-якого іншого частотного методу, є необхідність контролю стійкості досліджуваних кіл.

4. Розробка методу стала можливою у зв’язку з появою у пакетах прикладних програм режимів символічної математики. Розроблений метод реалізовано у середовищі МATHCAD-7.

1. Шатовалов Ю., Шувар Б. Підвищення ефективності частотних методів аналізу параметричних кіл // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 1996. № 302. С.71. 2. Шатовалов Ю. Моделювання лінійних параметричних кіл частотним символічним методом // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 1998. № 343. С.126-132. 3. Шатовалов Ю. Визначення коефіцієн-

- тів передачі параметричних кіл частотним символьним методом // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 1998. № 352. С.52-55.*
4. Шаповалов Ю. Аналіз параметричного модулятора частотним символьним методом // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 2000. № 387. С.182.
5. Zadeh L.A., *Frequency Analysis of Variable Networks // Proc. of the IRE. 1950. Vol.39.*
6. Сигорский В.П., Петренко А.И. Основы анализа электронных схем. К., 1971.
7. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина. М., 1988.
8. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы М., 1988.
9. Дезоер Ч.А., Ку Э.С. Основы теории цепей. М., 1976.
10. Тафт В.А. Электрические цепи с переменными параметрами. М., 1968.