

УДК 621.372.41

**О. В. Войцеховська, канд. техн. наук; О. О. Лазарєв, канд. техн. наук;
Л. Б. Ліщинська, канд. техн. наук, доц.; Н. М. Ткачук, студ.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО КОЛИВАЛЬНОГО КОНТУРУ З L -, C -НЕГАТРОНАМИ

Досліджено паралельний коливальний контур з L -, C -негатронами, умови стійкості такого контуру, отримано графіки частотних та фазочастотної характеристик, проведено експериментальні дослідження контуру на схемотехнічних аналогах негатронів.

Вступ

Одним з основних елементів, що використовується в різноманітних елементах систем автоматики: частотно-вибіркових комутаторах, резонансних ключах, фільтрах, мультиплексо-рах, частотних сенсорах, генераторах тощо, є коливальні контури. Підвищення добротності, що досягається шляхом компенсації активного опору втрат, є важливою та актуальною задачею. Однак із збільшенням добротності, збільшується чутливість схеми до зміни певного її параметра, що неодмінно призводить до необхідності забезпечення умов стійкості контуру. Використання таких елементів, як негатрони — приладів, що мають від'ємне значення основного диференціального параметра [1], дає можливість збільшити добротність коливальних контурів за незначної зміни їх стійкості.

Постановка задачі дослідження

Визначення характеристик коливальних контурів з L -, C -негатронами (приладами, що мають від'ємну диференціальну індуктивність та ємність відповідно [1]) та умов стійкості дасть необхідну теоретичну базу для створення нових електронних пристроїв на їх основі. Тому метою роботи є розробка математичних моделей паралельних коливальних контурів з L -, C -негатронами та визначення умов їх стійкості.

Теоретичні дослідження

Паралельний коливальний контур з L -, C -негатронами подано на рис. 1, де: $L^{(-)}$ — від'ємна індуктивність L -негатрона, $C^{(-)}$ — від'ємна ємність C -негатрона, R_C — активний опір еквівалентної схеми C -негатрона (для C -негатрона N -типу $R_C < 0$, для C -негатрона S -типу $R_C > 0$), R_L — активний опір еквівалентної схеми L -негатрона (для L -негатрона N -типу $R_L < 0$, для L -негатрона S -типу $R_L > 0$).

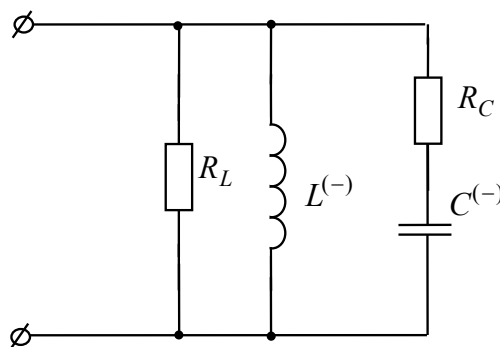


Рис. 1. Паралельний коливальний контур з L -, C -негатронами

Виходячи з умови, що на резонансній частоті реактивна провідність контуру дорівнює нулю [2], знайдемо резонансну частоту паралельного коливального контуру:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{L^{(-)}C^{(-)} - C^{(-)2}R_C^2}}. \quad (1)$$

З виразу (1) випливає, що резонанс в колі можливий за виконання умови $|R_C| < \sqrt{\frac{L^{(-)}}{C^{(-)}}}$.

Якщо $|R_C| \ll \sqrt{\frac{L^{(-)}}{C^{(-)}}}$, то впливом опору R_C можна знехтувати, тобто $\omega_p \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L^{(-)}C^{(-)}}}$.

Еквівалентна резонансна провідність контуру дорівнює

$$G_{0e} = \frac{1}{R_L} + \frac{R_C C^{(-)}}{L^{(-)}} = \frac{1}{R_L} + \frac{R_C}{\rho^2}, \quad (2)$$

де $\rho = \sqrt{\frac{L^{(-)}}{C^{(-)}}}$, звідки еквівалентний резонансний опір контуру

$$R_{0e} = \frac{R_L L^{(-)}}{L^{(-)} + R_C C^{(-)} R_L} = \frac{R_L \rho^2}{\rho^2 + R_L R_C}.$$

Виходячи з (1) та (2), добротність контуру дорівнює:

$$Q = \frac{L^{(-)} + R_C C^{(-)} R_L}{R_L \sqrt{L^{(-)}C^{(-)} - C^{(-)2}R_C^2}}. \quad (3)$$

З (2) випливає, що за виконання умови $|R_C| \ll \rho$, еквівалентна резонансна провідність $G_{0e} \approx \frac{1}{R_L}$, резонансний опір $R_{0e} \approx R_L$ та добротність контуру:

$$Q \approx \frac{L^{(-)} + R_C C^{(-)} R_L}{R_L \sqrt{L^{(-)}C^{(-)}}} = \frac{\rho}{R_L} + \frac{R_C}{\rho} \approx \frac{\rho}{R_L}.$$

Виходячи з рис. 1, комплексна еквівалентна провідність контуру визначається виразом

$$\underline{Y}_e(\omega) = G_L + \frac{1}{j\omega L^{(-)}} + \frac{R_C \cdot j\omega C^{(-)}}{R_C + j\omega C^{(-)}}. \quad (4)$$

В режимі малих втрат ($R_C \ll 1/(\omega C^{(-)})$) з (4) вираз для комплексного еквівалентного опору контуру запишемо у вигляді

$$\underline{Z}_e(\omega) = \frac{j\omega R_L L^{(-)}}{R_L + j\omega L^{(-)} - \omega^2 R_L C^{(-)} L^{(-)}}. \quad (5)$$

Виділивши в (5) активну R_e і реактивну X_e складові, отримаємо рівняння частотних характеристик контуру (рис. 2а):

$$R_e = \frac{\omega^2 R_L L^{(-)2}}{\omega^2 L^{(-)2} + (R_L - \omega^2 R_L C^{(-)} L^{(-)})^2},$$

$$X_e = \frac{\omega R_L^2 L^{(-)} (1 - \omega^2 C^{(-)} L^{(-)})}{\omega^2 L^{(-)2} + R_L^2 (\omega^2 C^{(-)} L^{(-)} - 1)^2},$$

$$Z_e = \frac{\omega R_L L^{(-)}}{\sqrt{\omega^2 L^{(-)2} + R_L^2 (\omega^2 C^{(-)} L^{(-)} - 1)^2}}.$$

Фазочастотна характеристика (рис. 2б) контуру буде визначатися виразом $\phi = \arg(Z_e)$.

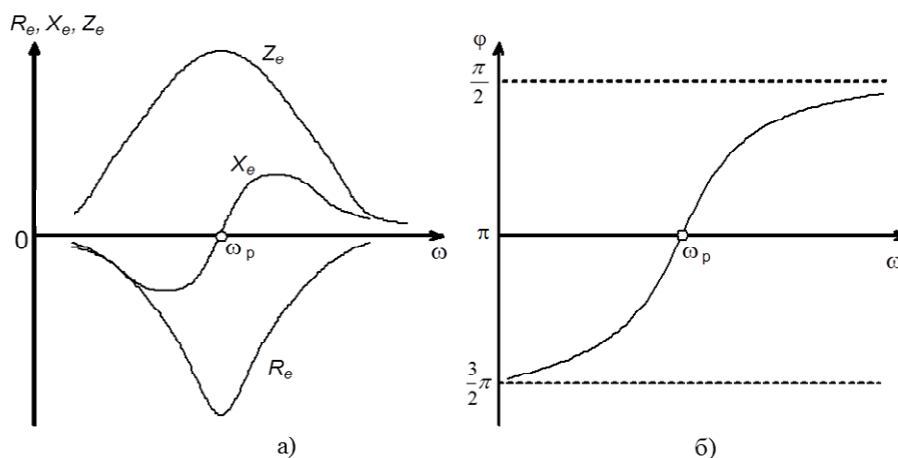


Рис. 2. Якісні частотні (а) та фазочастотна (б) характеристики паралельного коливального контуру з L -, C -негатронами

З аналізу отриманих частотних характеристик (рис. 2) випливає, що реактивний опір контуру з L -, C -негатронами змінюється протилежно за знаком до реактивного опору паралельного LC -контуру з додатними елементами. Активний опір контуру є від'ємним на резонансній частоті. На частоті резонансу реактивний опір контуру дорівнює нулю, а активний опір набуває свого максимального значення. Фазочастотна характеристика контуру з L -, C -негатронами відрізняється за знаком від фазочастотної характеристики паралельного LC -контуру з додатними елементами, змінюючись від $\frac{3}{2}\pi$ до $\frac{\pi}{2}$ і на резонансній частоті дорівнює π , що пояснюється від'ємним повним активним опором контуру.

Наявність в контурі L -, C -негатронів робить його потенційно-нестійким, що ставить задачу визначення умов стійкості. Як відомо [2], для покращення вибіркових властивостей паралельного контуру його необхідно збуджувати джерелом струму. Операторна провідність еквівалентної схеми навантаженого паралельного коливального контуру з L -, C -негатронами (рис. 3) дорівнює

$$Y(p) = G_H + G_L + \frac{1}{pL^{(-)}} + \frac{1}{R_C + \frac{1}{pC^{(-)}}}.$$

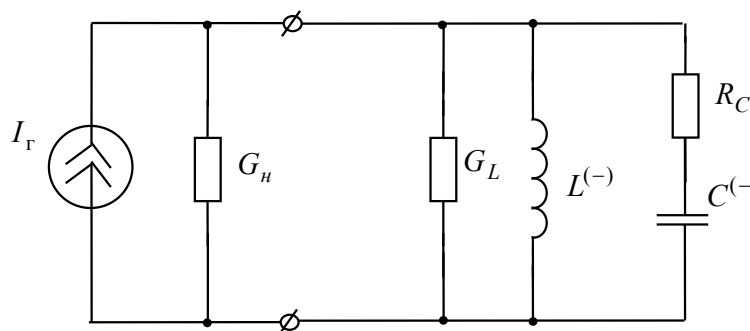


Рис. 3. Еквівалентна схема навантаженого паралельного коливального контуру з L -, C -негатронами: I_Γ — джерело струму, G_H — провідність навантаження з урахуванням внутрішньої провідності джерела струму

Прирівнявши операторну провідність схеми $Y(p)$ до нуля, та після відповідних математичних перетворень, отримаємо характеристичне рівняння кола:

$$p^2 + p \frac{L^{(-)}(G_H + G_L) + C^{(-)}R_C}{L^{(-)}C^{(-)}(1 + R_C(G_H + G_L))} + \frac{1}{L^{(-)}C^{(-)}(1 + R_C(G_H + G_L))} = 0.$$

Відповідно до критерію стійкості Рауса-Гурвіца [3], це коло буде стійким за виконання умови

$$R_C(G_H + G_L) > -1; L^{(-)}(G_H + G_L) + C^{(-)}R_C > 0. \quad (6)$$

Виконання цієї умови стійкості залежить від співвідношення елементів схеми. При цьому можливе використання L -, C -негатронів як N -, так і S -типів, але хоча б один з негатронів повинен бути N -типу.

Експериментальні дослідження

Для практичної реалізації розглянутого контуру можна використовувати схмотехнічні аналоги L -, C -негатронів, реалізовані на конверторах від'ємного опору мостового типу на операційних підсилювачах [4]. Операційні підсилювачі можна розглядати як активні прилади універсального призначення, які з успіхом можуть замінити транзистори у низці функціональних вузлів електронної апаратури, покращивши при цьому їх технічні, вагогабаритні характеристики та надійність. В області високих частот схмотехнічні аналоги L -, C -негатронів можна реалізовувати за допомогою інтегральних НВЧ підсилювачів [5], які мають високий коефіцієнт підсилення на частотах до 10 ГГц, рівномірну частотну характеристику, високу стабільність, надійність, малу вагу та габарити, невисоку вартість.

На рис. 4 показано схему паралельного коливального контуру на схмотехнічних аналогах L -, C -негатронів, реалізованих на операційних підсилювачах. На операційному підсилювачі $DA1$ за схемою конвертора від'ємного опору мостового типу [5] реалізована від'ємна індуктивність зі значенням $L^{(-)} = -L_K = -300$ мкГн. На операційному підсилювачі $DA2$ реалізована від'ємна ємність з значенням $C^{(-)} = -C_K = -1$ нФ. У відповідності з виразом (1), знехтувавши активним опором C -негатрона, резонансна частота цього контуру дорівнює

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L^{(-)}C^{(-)}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{-300 \cdot 10^{-3}(-1 \cdot 10^{-9})}} = 209,6 \text{ кГц.}$$

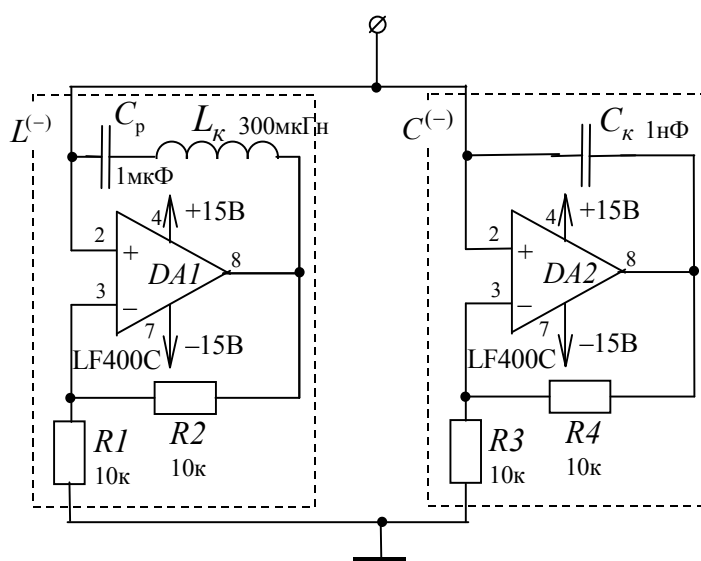
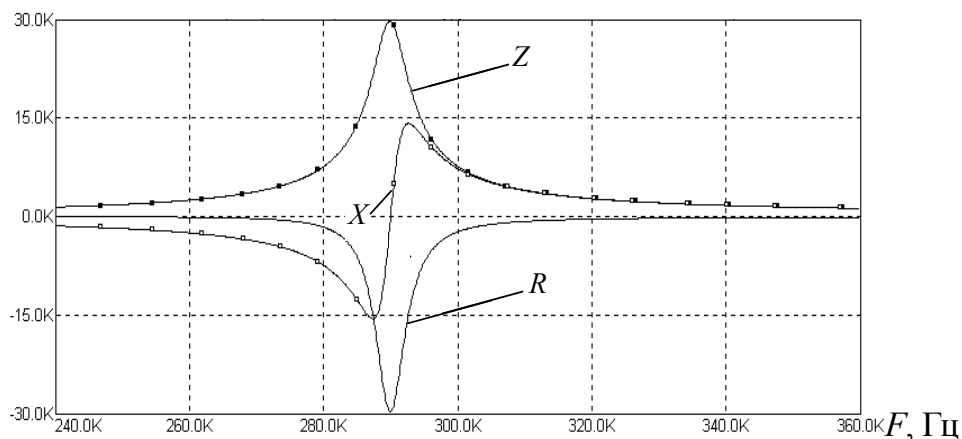


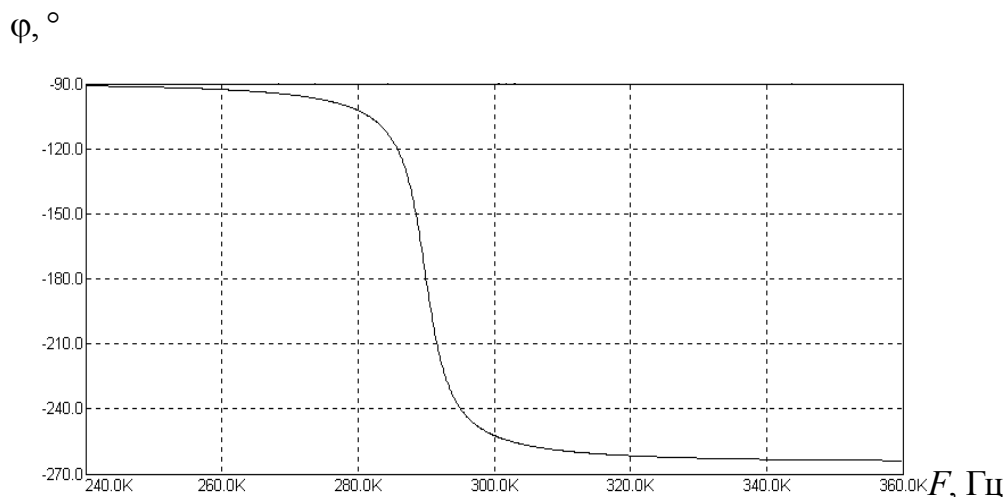
Рис. 4. Паралельний коливальний контур на схмотехнічних аналогах L -, C -негатронів

На рис. 5 показано експериментальні графіки частотних та фазочастотної характеристик цього коливального контуру.

$Z, X, R, \text{ Ом}$



а)



б)

Рис. 5. Експериментальні характеристики паралельного коливального контуру: а — частотні; б — фазочастотна

Отримані експериментальні значення резонансної частоти та частотні залежності контуру (рис. 5) збіглися з теоретичними (рис. 2), що підтвердило адекватність вищезгаданих теоретичних положень.

Висновки

1. Проведені дослідження коливальних контурів з L -, C -негатронами показали, що реактивний опір контурів з L -, C -негатронами змінюється протилежним чином до зміни реактивного опору контурів з додатними індуктивністю та ємністю. Фазочастотні характеристики розглянутих контурів з L -, C -негатронами є протилежними за знаком до аналогічних характеристик для контурів з додатними індуктивністю та ємністю, змінюючись від $\frac{3}{2}\pi$ до $\frac{\pi}{2}$ для паралельного контурів і дорівнюючи π на частоті резонансу, що зумовлює появу від'ємного активного опору контуру на частоті резонансу.

2. Для виконання умов стійкості контуру з L -, C -негатронами хоча б один з негатронів повинен бути N -типу.

3. Наявність в контурі від'ємного активного опору дозволяє компенсувати додатний активний опір втрат контуру, і тим самим збільшити його добротність. На значення добротності контурів суттєво впливає активний опір зовнішньої схеми, який також визначає виконання умов стійкості контуру.

4. Коливальний контур з L -, C -негатронами, внаслідок наявності від'ємного активного опору, підсилює сигнал на резонансній частоті, що призводить до суттєвої відмінності передавальних функцій фільтрів, реалізованих на LC -контурах з додатними елементами та контурах з L -, C -негатронами.

5. Коливальний контур з L -, C -негатронами залежно від виконання умов стійкості може працювати як генератор або активний фільтр без необхідності внесення в схему інших активних елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Філінюк М. А. Основи негatronіки. У 2 т. Т. 1. Теоретичні і фізичні основи негatronіки / М. А. Філінюк. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. — 456 с.
2. Бакалов В. П. Основы теории электрических цепей и электроники : учеб. для вузов / В. П. Бакалов, А. Н. Игнатов, Б. И. Крук. — М. : Радио и связь, 1989. — 528 с.
3. Воронов А. А. Основы теории автоматического регулирования и управления : учеб. пос. для вузов / А. А. Воронов, В. К. Титов, Б. Н. Новогранов. — М. : высш. школа, 1977. — 519 с.
4. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах / Ф. Бенинг. — М. : Сов. радио, 1975. — 286 с.
5. Mini-Circuits Products // Microwave Journal. — 2001. — Vol. 44, No. 5. — 388 p.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

Стаття надійшла до редакції 13.09.11

Рекомендована до друку 28.09.11

Войцеховська Олена Валеріївна — доцент, **Лазарев Олександр Олександрович** — доцент.

Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури;

Ткачук Наталя Миколаївна — студентка Інституту радіотехніки, зв'язку та приладобудування.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Ліщинська Людмила Броніславівна — доцент кафедри інформаційних технологій.

Вінницький торговельно-економічний університет, Вінниця