

СХЕМОТЕХНІЧНІ L-, C-НЕГАТРОНИ

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Наведена загальна класифікація схемотехнічних реалізацій L-, C-негатронів. Розглянуті схемотехнічні реалізації L-, C-негатронів на операційних підсилювачах, біполярних транзисторах та конвеєрах струму. Показані частотні залежності повних опорів даних негатронів.

Ключові слова: негатрон, від'ємна ємність, від'ємна індуктивність, перетворювач імпедансу.

Abstract

General classification of circuit implementations of L-, C-negatrons is presented in paper. Circuits of L-, C-negatrons on operational amplifiers, bipolar transistors and current conveyors are considered. The negatrons impedances frequency dependence is shown.

Keywords: negatron, negative capacitance, negative inductance, impedance converter.

Вступ

Використання L-, C-негатронів – приладів, що в деякому режимі роботи мають від'ємне значення основного диференційного параметра (від'ємна індуктивність – L-негатрони, від'ємна ємність – C-негатрони) в багатьох випадках дозволяє покращити технічні показники електронних пристроїв [1]. Зокрема підвищити чутливість сенсорів [2 - 7], покращити частотні характеристики аналогових комутаторів [8], фільтрів [9, 10], зменшити енергоспоживання та збільшити швидкодію ключів [1], розробити нові логічні та нейронні елементи [11], тощо. L-, C-негатрони поділяють на фізичні, схемотехнічні та комбіновані [1]. В фізичних L-, C-негатронах від'ємне значенні ємності та індуктивності з'являються внаслідок фізичних ефектів в середині приладів. Схемотехнічні L-, C-негатрони реалізують від'ємні ємності та індуктивності за рахунок використання зовнішніх позитивних зворотних зв'язків. Перевагою схемотехнічної реалізації є можливість синтезу L-, C-негатронів з необхідними параметрами, що не визначаються технологічним процесом виготовлення. Тому актуальною є завдання аналізу можливих схемотехнічних реалізацій L-, C-негатронів та розробки їх математичних моделей.

Класифікація схемотехнічних L-, C-негатронів

В основі схемотехнічної реалізації L-, C-негатронів лежать перетворюючі імпедансу (ПІ), що забезпечують необхідний фазовий зсув між напругою та струмом [1]. Одержати необхідний фазовий зсув можна або шляхом зміни напрямку струму, або знаку напруги, тому ПІ поділяються на перетворювачі імпедансу зі зміною напрямку струму I-ПІ, та перетворювачі імпедансу зі зміною знаку напруги U-ПІ. Узагальнена класифікація схемотехнічних L-, C-негатронів на ПІ показана на рис. 1 [12].

Перетворювачі від'ємного імпедансу будуються на активному приладі – підсилювачі, охопленому позитивним зворотним зв'язком. В якості підсилювача в ПІ можуть використовуватися різні активні прилади: електровакуумні лампи, напівпровідникові біполярні та польові транзистори, операційні підсилювачі (ОП).

Весь клас напівпровідникових схемотехнічних C-негатронів можна умовно поділити на декілька груп (рис. 2) [1]. Еквівалентна схема L-, C-негатронів N-типу містить від'ємний активний опір [13 - 16], тому їх схемотехнічна реалізація можлива лише на активних приладах. L-, C-негатрони S-типу є пасивними елементами, так як їх еквівалентна схема містить додатний активний опір [13 - 16], тому їх схемотехнічна реалізація можлива на пасивних елементах – трансформаторах.



Рис. 1 – Узагальнена класифікація схмотехнічних L-, C-негатронів на перетворювачах імпедансу



Рис. 2 – Узагальнена класифікація схмотехнічних L-, C-негатронів за елементною базою

Дослідження схмотехнічного C-негатрона на операційному підсилювачі

Схеми C-негатронів на операційних підсилювачах показані на рис. 3 [17, 18]. Аналогічним чином реалізуються схмотехнічні L-негатрони [19, 20]. Розглянемо більш детально схему C-негатрона на конверторі від'ємного опору, що наведена на рис. 3а. Резистори $R1$, $R2$ утворюють коло негативного зворотного зв'язку, що визначає коефіцієнт підсилення $K_n = \frac{R1 + R2}{R2}$. Коефіцієнт конверсії визначається виразом $K_k = 1 - K_n = 1 - \frac{R1 + R2}{R2}$. За умови, що $K_n > 1$, тобто якщо $R1 > 0$, коефіцієнт конверсії є від'ємним $K_k < 0$. Ємність C_n є навантаженням конвертора та утворює коло позитивного зворотного зв'язку за напругою. Вхідний імпеданс схеми $Z_{ex} = K_k Z_n = \left(1 - \frac{R1 + R2}{R2}\right) \frac{1}{j\omega C_n}$. Ємність на вході конвертора визначається виразом $C_{ex} = K_k C_n$. Якщо $R1 = R2$, то коефіцієнт підсилення $K_n = 2$, коефіцієнт конверсії $K_k = -1$, ємність на вході $C_{ex} = -C_n$. Схема працює як U-III.

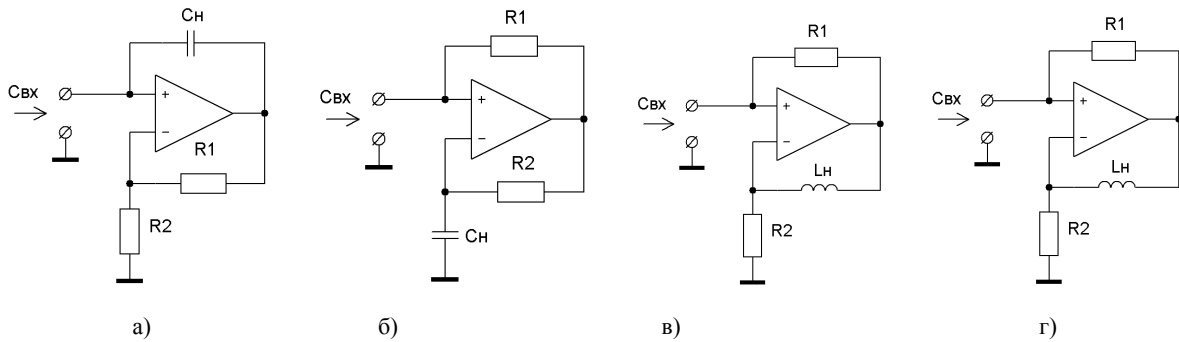


Рис. 3. Схематехнічні С-негатрони на операційних підсилювачах: на конверторів від'ємного опору з позитивним зворотним зв'язком за напругою (а), на конверторів від'ємного опору з позитивним зворотним зв'язком за струмом (б), на інверторі від'ємного опору з позитивним зворотним зв'язком за струмом (в), на інверторі від'ємного опору з позитивним зворотним зв'язком за напругою (г)

На рис. 4 показані графіки частотної залежності активної та реактивної складових вхідного опору та значення ємності С-негатрона одержані шляхом комп'ютерного моделювання схеми рис. 3а в програмі MicroCap 9 при використанні операційного підсилювача LF357.

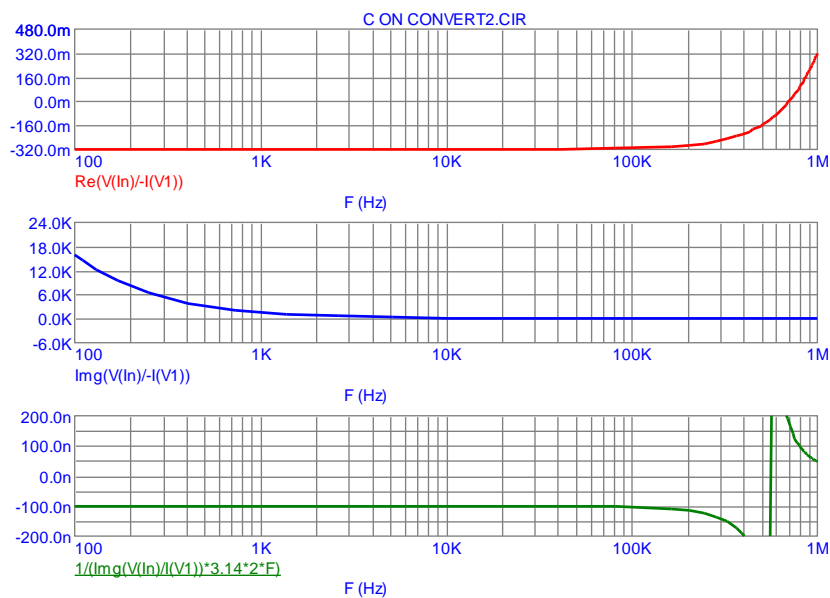


Рис. 4. Частотні залежності активної та реактивної складових вхідного опору та значення ємності С-негатрона

З графіків видно, що ємність є від'ємною та її значення на низьких частотах становить -100нФ , що узгоджується з розрахунковим значенням за одержаними вище теоретичними виразами. Максимальна частота від'ємної ємності становить 564кГц . Під максимальною частотою в даному випадку розуміємо частоту, на якій від'ємне значення параметра переходить у додатне значення. Активний опір є від'ємним і становить на низьких частотах $-318,6\text{мОм}$. Максимальна частота від'ємного активного опору становить 705кГц . Необхідно зауважити, що дане значення від'ємного активного опору виникає внаслідок частотної залежності коефіцієнта підсилення і не враховує активний опір виводів конденсатора та з'єднань. При їх врахуванні значення від'ємного активного опору буде відповідно більшим. Так якщо при моделюванні врахувати опір виводів, наприклад 1Ом , то значення від'ємного активного опору становитиме $-1,318\text{Ом}$.

Перевагою схематехнічної реалізації L-, С-негатронів на ОП є схематехнічна простота, проте недоліком є відносно малий частотний діапазон роботи, що обмежується частотами до 100МГц при використанні найвисокочастотних ОП, з частотами одиничного підсилення в декілька ГГц. Більш ефективними є L-, С-негатрони на перетворювачах імпедансу, що реалізується на окремих транзисторах [1].

Дослідження схемотехнічного С-негатрона на біполярних транзисторах

Схема С-негатрона на двох біполярних транзисторах наведена на рис. 5. На транзисторах реалізованих підсилювач напруги з коефіцієнтом підсилення 2. Додатна ємність C_4 1нФ при цьому буде перетворюватися у від'ємну вхідну ємність -1нФ. На транзисторі Q1 реалізований підсилювач з спільним колектором, що має коефіцієнт підсилення за напругою близько одиниці, на транзисторі Q2 – підсилювач зі спільною базою, в якому резисторами R2, R5 задано коефіцієнт підсилення 2.

На рис. 6 наведені частотні залежності активного та реактивного опорів та вхідної ємності С-негатрона.

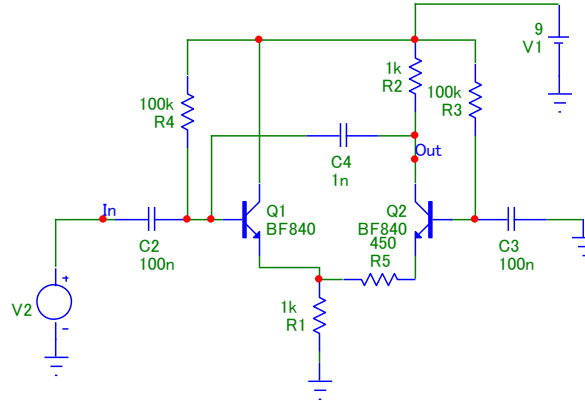


Рис. 5. Схемотехнічний С-негатрон на біполярних транзисторах

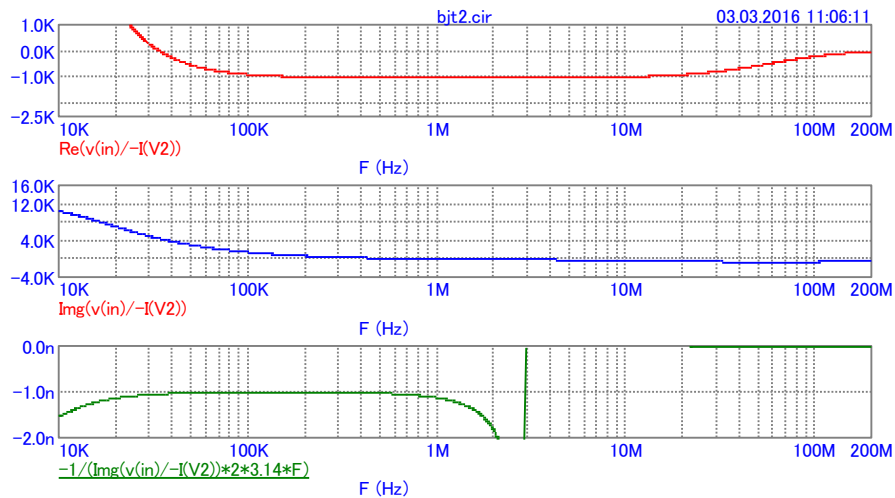


Рис. 6. Частотні залежності вхідного імпедансу С-негатрона

З наведених на рис. 6 графіків видно, що схема реалізує від'ємну ємність -1нФ в діапазоні частот від 10кГц до 3МГц, від'ємний активний опір -1кОм в діапазоні частот 20кГц – 200МГц. В схемі використані біполярні транзистори BF840 з граничною частотою $f_T=380$ МГц. Перевагою даного С-негатрона є менша кількість транзисторів та більший частотний діапазон роботи.

Більш ефективними є L-, С-негатрони на перетворювачах імпедансу, що реалізується на транзисторних конвеєрах струму [21].

Дослідження схемотехнічного С-негатрона на конвеєрах струму

Схема С-негатрона на транзисторних конвеєрах струму наведена на рис. 7. Кожен конвеєр струму реалізується на одному біполярному транзисторі [1]. На рис. 8 наведені частотні залежності активного та реактивного опорів та вхідної ємності.

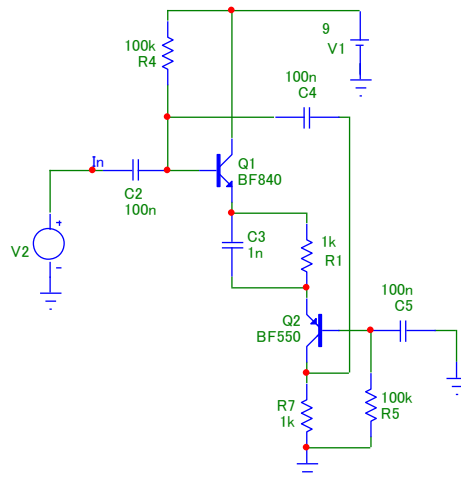


Рис. 7. Схемотехнічний С-негатрон на конвеєрах струму на біполярних транзисторах

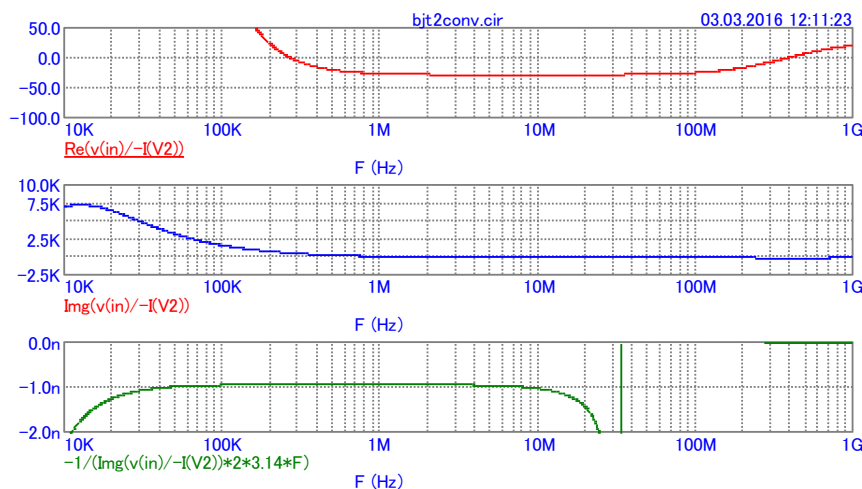


Рис. 8. Частотні залежності вхідного імпедансу С-негатрона

З наведених графіків на рис. 8 видно, що схема реалізує від'ємну ємність $-1nF$ в діапазоні частот від 10кГц до 30МГц та від'ємний опір -27 Ом в діапазоні частот 300кГц – 350МГц. В схемі використовуються транзистори BF840 та BF550 з граничною частотою $f_T = 325 \text{ МГц}$. У порівнянні до попередньої схеми використання конвеєрів струму дозволило збільшити максимальну частоту від'ємної ємності в 10 разів при використанні таких же транзисторів.

Висновки

Розглянуті схемотехнічні реалізації L-, С-негатронів на операційних підсилювачах, біполярних транзисторах та конвеєрах струму. Показано, що схемотехнічні L-, С-негатрони на конвеєрах струму мають найбільшу, серед розглянутих схем, максимальну частоту від'ємної ємності. Показано, що реалізовані схемотехнічні С-негатрони мають еквівалентну схему, що складається з послідовних від'ємного активного опору та від'ємної ємності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Філінюк М. А. LC-негатрони та їх застосування : монографія / М.А. Філінюк, О.О. Лазарев, О.В. Войцеховська ; Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Вінницький національний технічний університет. - Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2012. - 307 с.
2. Філінюк, М. А. (2003). Аналіз чутливості електричних кіл з L-, С-негатронами / М.А. Філінюк, О.О. Лазарев // Вісник ЖІТІ. – 2003. - № 2. – С. 92-98.
3. Філінюк М.А. Частотні датчики на L-, С- негатронах / М.А. Філінюк, О.О. Лазарев, Р.Ф. Ло-

бодзинська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2004. – №1. – С. 84-89.

4. Лазарев О.О. Ємнісний негасенсор з частотним виходом / О.О. Лазарев, М.А. Філінюк, Д.В. Бондарюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. - №3. - С.109-112.

5. Філінюк М. А. Дослідження автогенераторних індуктивних негасенсорів / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев, Л. Б. Ліщинська, Д. В. Бондарюк // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2015. - Т. 12, № 2. - С. 27-35.

6. Filynyuk N. A. Capacitive negasensor with frequency output / N.A. Filynyuk, A.A. Lazarev, D.V. Bondaryuk, A.V. Prykmeta // Control and Communications (SIBCON), 2013 International Siberian Conference on. – 2013. - P.1-3. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693566.

7. N. A. Filynyuk, A. A. Lazarev, A. V. Prikmeta and D. V. Bondaryuk, "Smart negasensor on C-negatrons," Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2013 23rd International Crimean Conference, Sevastopol, 2013, pp. 434-435.

8. Лазарев О. О. Дослідження стійкості та чутливості елементів автоматики на базі L-, C- негatronів: дисертація канд. техн. наук: 05.13.05 / Вінницький держ. технічний ун-т. - Вінниця, 2003. – 246с.

9. A. Lazarev, K. Koval, A. Prykmeta and D. Bondaryuk, "Active tunable filters based on C-negatrons," Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2012 International Conference on, Lviv-Slavske, 2012, pp. 63-63.

10. Лазарев О.О. Дослідження паралельного коливального контуру з LC-негатронами /О.О. Лазарев, О.В. Войцеховська, Л.Б. Ліщинська, Н. В. Ткачук // Вісник ВПІ. – 2012ю - №2. - С.190-195.

11. Лазарев О.О. Оптикоелектронний нейронний елемент на C-негатроні / М.А. Філінюк, О.О. Лазарев, Т.В. Басюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця, 2008. – №2 (16). – С. 191-196.

12. Лазарев О.О. Аналіз методів та засобів з схмотехнічної реалізації негatronів на перетворювачах імпедансу / О.О. Лазарев, О.В. Войцеховська, Л.Б. Ліщинська // Вісник Хмельницького національного університету – 2011. – №6. – С. 49 - 54.

13. Філінюк, М. А. Дослідження енергетичних властивостей нелінійної ємності / М.А. Філінюк, О.О. Лазарев // Вісник ВПІ. - 2000. - № 4. – С. 94-97.

14. Лазарев, О. О. Взаємозв'язок типу внутрішнього зворотного зв'язку з типом C-негатрона / О.О. Лазарев, М.А. Філінюк М.А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. - № 5. – С. 127-133.

15. Лазарев О.О. Дослідження впливу типу зворотного зв'язку на тип L-негатрона / О. О. Лазарев, О.В. Войцеховська, Л.Б. Ліщинська // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2009. – №3 (16). – С. 29-35.

16. Філінюк, М. А. Дослідження енергетичних властивостей нелінійної індуктивності / М.А. Філінюк, О.О. Лазарев // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. - № 2. – С. 44-46.

17. Лазарев О.О. Дослідження схмотехнічних реалізації C-негатронів на інверторах від'ємного опору /О.О. Лазарев, М.А. Філінюк, Р.Ю. Чехмestрук, К.В. Огородник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. -2011. - № 2. – С.72-76.

18. Лазарев О.О. Дослідження схмотехнічних реалізацій C-негатронів на конверторах від'ємного опору / О.О. Лазарев, М.А. Філінюк, Р.Ю. Чехмestрук, К.В. Огородник // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. - 2011. - №4. – 10 с. Режим доступу до журн.: http://nbuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_4/2011-4.files/uk/11oolnrc_ua.pdf

19. Лазарев О.О. Дослідження схмотехнічної реалізації L-негатронів на операційному підсилювачі / О.О. Лазарев, О.В. Войцеховська, Л.І. Покотилук, Р.Ю. Чехмestрук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. - №4. - С. 68-73.

20. Лазарев О.О. Математична модель схмотехнічного L-негатрона / О.О. Лазарев, М.А. Філінюк, Л.Б. Ліщинська, Бондарюк Д.В. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – №1(221). - С. 140-144.

21. Філінюк М.А. Критериальная оценка эффективности токовых конвейеров /М.А. Філінюк, О.О. Лазарев, Л.Б. Ліщинська, В.П. Стахов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - 2013. - № 8(64). - С. 17 – 21.

Лазарев Александр Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький національний технічний університет.