УДК 621.396

О. О. ЛАЗАРЄВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ДАВАЧІВ НА БАЗІ L-, C-НЕГАТРОНІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Досліджена чутливість електронних кіл з L-, C-негатронами. На базі одержаних теоретичних положень розроблені та досліджені схеми індуктивного та ємнісного давачів з L-, C-негатронами. Показано, що чутливість таких давачів в 20-30 разів більша у порівнянні до прототипів.

Ключові слова: індуктивний сенсор, ємнісний сенсор, від'ємна ємність, від'ємна індуктивність, L-, C-негатрони.

Abstract

An analysis of the sensitivity of electronic circuits with L-, C-negatrons was carried out. On the basis of the obtained theoretical positions, the schemes of inductive and capacitive sensors with L- and C-negatrons were developed and investigated. It is shown that the sensitivity of such sensors is 20-30 times larger in comparison with prototypes.

Keywords: inductive sensor, capacitive sensor, negative capacitance, negative inductance, L-, C-negatrons.

Вступ

Одним з перспективних шляхів підвищення ефективності елементів та пристроїв інформаційних систем є використання нової елементної бази, зокрема L-, C-негатронів. L-негатронами називають електронні прилади, що в деякому режимі роботи мають від'ємне значення диференційної індуктивності, і, в залежності від виду вебер-амперної характеристики, їх можна поділити на N- та S-типу [1]. C-негатронами називають електронні прилади, що в деякому режимі роботи мають від'ємне значення диференційної ємності, і, в залежності від виду кулон-вольтної характеристики, їх можна поділити на N- та S-типу [1]. Фактично L-, C-негатрони є багатофункціональними елементами, що дозволяє розробляти на їх основі різноманітні як аналогові, так і цифрові електронні пристрої, як то перемикачі, генератори, перетворювачі, активні фільтри та інші. Для проектування інформаційних пристроїв на базі L-, C-негатронів необхідні методи, які б враховували особливості цих елементів. Чутливість є одним з основних питань синтезу електронних пристроїв. Потенційна-нестійкість пристроїв на базі L-, C-негатронів робить питання чутливості для цих пристроїв ще більш актуальним, внаслідок їх більшої чутливості до зміни різних параметрів елементів схеми.

Дослідження чутливості електронних кіл з L-, C-негатронами

Основним параметром C-негатронів є величина від'ємної диференційної ємності $C^{(-)}$. Взагалі можливі два типи включення від'ємної ємності в електричне коло: паралельно та послідовно до додатної ємності кола C (рис. 1). Основний параметр, яким буде характеризуватися таке коло - це сумарна ємність C_Σ.

За відсутності в колі від'ємної ємності $C^{(-)}$, сумарна ємність кола дорівнює $C_\Sigma = C$, абсолютна та відносна чутливості [2] сумарної ємності кола в цьому випадку відповідно дорівнюють:

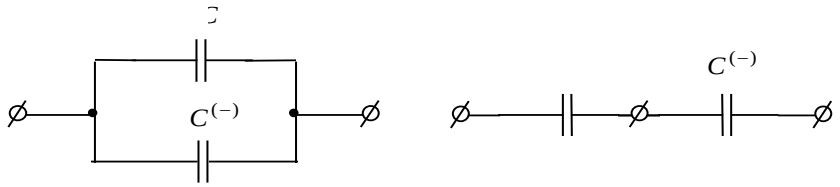
$$S(C_\Sigma, C) = \frac{dC_\Sigma}{dC} = 1,\ S_C^{C_\Sigma} = \frac{dC_\Sigma}{dC}\frac{C}{C_\Sigma} = 1.$$

Визначимо вплив на чутливість сумарної ємності C_Σ кола включення послідовно або паралельно від'ємної ємності $C^{(-)}$.

Сумарна ємність паралельного з'єднання від'ємної та додатної ємностей (рис. 1, а) визначається за формулою:

$$C_{\Sigma} = C + C^{(-)} \qquad (1)$$

З виразу (1) видно, що, так як $C^{(-)}<0$, то таке включення ємностей, за виконання умови $\left|C^{(-)}\right| < 2C$, дозволяє зменшити сумарна ємність кола в $\frac{C}{C + C^{(-)}}$ разів. За умови, що $C = \left|C^{(-)}\right|$, то сумарна ємність кола дорівнює нулю, тобто $C_{\Sigma} = 0$. Отже таке включення від'ємної ємності $C^{(-)}$ можна використовувати для повної або часткової компенсації небажаної паразитної додатної ємності кола C. Графік залежності сумарної ємності C_{Σ} кола від значення від'ємної ємності $C^{(-)}$ зображений на рис. 2,а.



а) б)

Рисунок 1 - Паралельне (а) та послідовне (б) з'єднання від'ємної ємності $C^{(-)}$ з додатною ємністю C електронного кола

В цьому випадку абсолютна чутливість сумарної ємності кола буде визначатися виразом

$$S(C_{\Sigma}, C) = \frac{dC_{\Sigma}}{dC} = 1, \qquad (2)$$

а відносна

$$S_C^{C_{\Sigma}} = \frac{C}{C_{\Sigma}} = \frac{C}{C + C^{(-)}}. \qquad (3)$$

З (2) видно, що абсолютна чутливість в цьому випадку дорівнює 1, тобто дорівнює абсолютній чутливість сумарної ємності, коли від'ємна ємність $C^{(-)}$ відсутня. Таким чином можна зробити висновок, що паралельне ввімкнення від'ємної ємності $C^{(-)}$ до додатної ємності C кола не спричиняє до зміни абсолютної чутливості кола. Тоді як відносна чутливість, як це випливає з виразу (3), за виконання умови $\left|C^{(-)}\right| < 2C$, збільшується в $\frac{C}{C + C^{(-)}}$ разів, тобто в стільки ж разів, в скільки відбулося при цьому зменшення сумарної ємності кола C_{Σ}. За виконання умови $C = \left|C^{(-)}\right|$, значення відносної чутливості прямує в нескінченність, $S_C^{C_{\Sigma}} \to \infty$ (рис. 2,б). Практично це свідчить про те, що схема переходить в нестійкий режим роботи.

Розглянемо послідовне з'єднання від'ємної $C^{(-)}$ та додатної C ємностей (рис. 1,б). Сумарна ємність такого кола буде визначатися виразом:

$$C_{\Sigma} = \frac{C \cdot C^{(-)}}{C + C^{(-)}}.$$

З одержаного виразу видно, що за умови $\left|C^{(-)}\right| > C/2$ маємо збільшення сумарної ємності кола в $\frac{C^{(-)}}{C + C^{(-)}}$ разів. В випадку, коли $C = \left|C^{(-)}\right|$, то значення сумарної ємності прямує до нескінченості, $C_{\Sigma} \to \infty$. Тобто послідовне з'єднання від'ємної та додатної ємностей можна використовувати для

одержання надвеликих ємностей. Графік залежності сумарної ємності C_Σ кола від значення від'ємної ємності $C^{(-)}$ зображений на рис. 3,а.

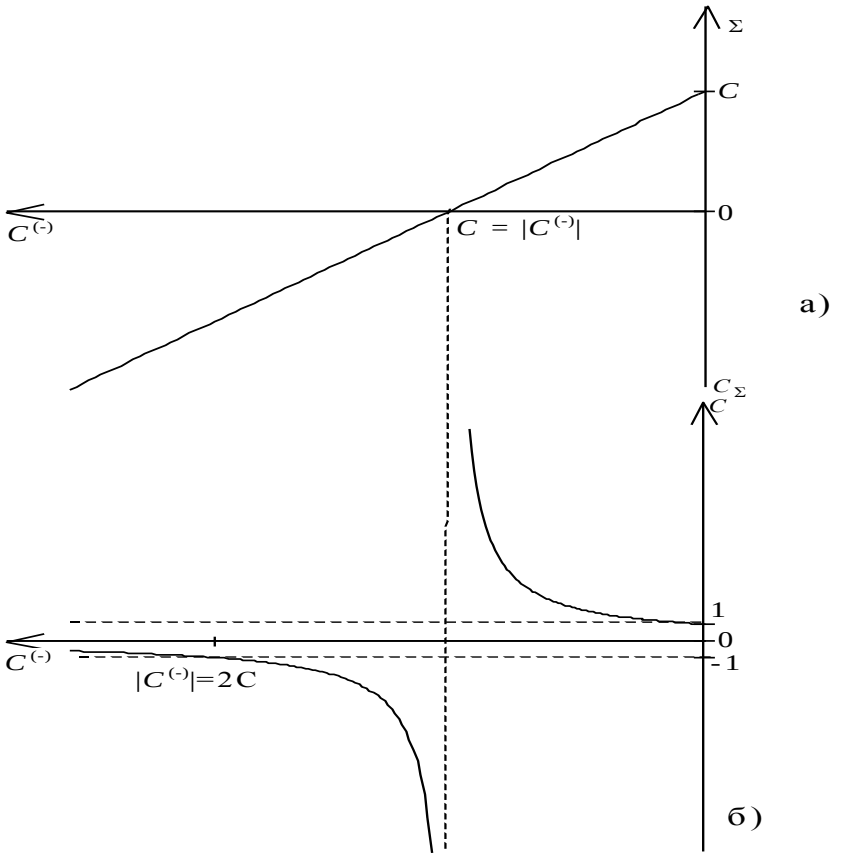


Рисунок 2 - Залежність сумарної ємності C_Σ паралельного з'єднання додатної C та від'ємної $C^{(-)}$ ємностей (а) та залежність відносної чутливості сумарної ємності $S_C^{C_\Sigma}$, (б) від значення $C^{(-)}$

Абсолютна чутливість сумарної ємності до зміни значення додатної ємності в цьому випадку дорівнює:

$$S(C_\Sigma, C) = \frac{dC_\Sigma}{dC} = \left(\frac{C^{(-)}}{C + C^{(-)}}\right)^2. \qquad (4)$$

Відносна чутливість сумарної ємності дорівнює:

$$S_C^{C_\Sigma} = \frac{C^{(-)}}{C + C^{(-)}}. \qquad (5)$$

З виразів (4), (5) видно, що за виконання умови $\left|C^{(-)}\right| > C/2$, значення абсолютної та модуль відносної чутливостей сумарної ємності більше одиниці, тобто в цьому випадку абсолютна чутливість більша в $\left(\frac{C^{(-)}}{C + C^{(-)}}\right)^2$ разів, а відносна - в $\frac{C^{(-)}}{C + C^{(-)}}$ разів, ніж за відсутності від'ємної ємності $C^{(-)}$ в колі. Таким чином при збільшенні сумарної ємності в *k* разів відбувається збільшення

відносної чутливості сумарної ємності також в k разів, а абсолютної - в k^2 разів. При рівності за модулем значень від'ємної та додатної ємностей ($C = |C^{(-)}|$), значення абсолютної та відносної чутливостей прямує в нескінченність, $S(C_\Sigma, C) \to \infty$, $S_C^{C_\Sigma} \to \infty$ (рис. 3,б). Практично це свідчить про те, що схема переходить в нестійкий режим роботи. За виконання умови $|C^{(-)}| < C/2$ ми маємо зменшення сумарної ємності кола C_Σ, відносної $S_C^{C_\Sigma}$ та абсолютної $S(C_\Sigma, C)$ чутливостей у порівняні до випадку без від'ємної ємності $C^{(-)}$. Що пояснюється тим, що в цьому випадку сумарна ємність C_Σ кола буде визначатися в основному значенням від'ємної ємності $C^{(-)}$.

Виходячи з дуальності від'ємної ємності та від'ємної індуктивності [3] та застосувавши дуальні перетворення до вище одержаних виразів, одержимо математичні вирази для чутливості сумарної індуктивності електронних кіл з L-негатронами (табл. 1).

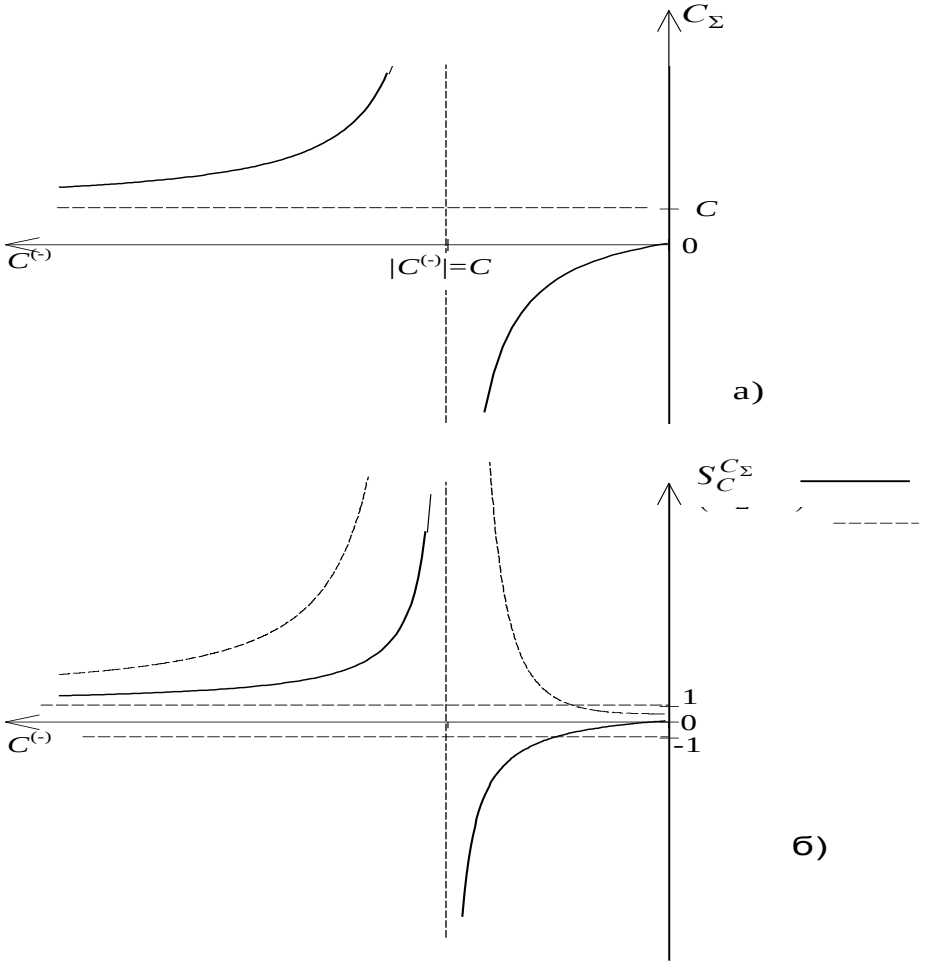
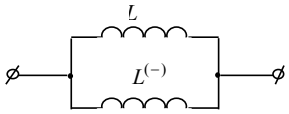
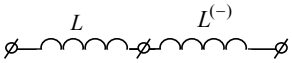


Рисунок 3 - Залежність сумарної ємності C_Σ послідовного з'єднання додатної C та від'ємної $C^{(-)}$ ємностей та залежність абсолютної та відносної чутливостей сумарної ємності до зміни додатної ємності С $S(C_\Sigma, C)$, $S_C^{C_\Sigma}$ (б) від значення від'ємної ємності $C^{(-)}$

Таблиця 1- Чутливість електронних кіл з L-негатронами

	Паралельне коло	Послідовне коло
Схема електрична		
Сумарна індуктивність кола	$L_\Sigma = \frac{L \cdot L^{(-)}}{L + L^{(-)}}$	$L_\Sigma = L + L^{(-)}$
Абсолютна чутливість	$S(L_\Sigma, L) = \frac{dL_\Sigma}{dL} = \left(\frac{L^{(-)}}{L + L^{(-)}}\right)^2$	$S(L_\Sigma, L) = \frac{dL_\Sigma}{dL} = 1$
Відносна чутливість	$S_L^{L_\Sigma} = \frac{L^{(-)}}{L + L^{(-)}}$	$S_L^{L_\Sigma} = \frac{L}{L_\Sigma} = \frac{L}{L + L^{(-)}}$

Розробка та дослідження давачів на базі L-, C-негатронів

Проведений аналіз чутливості кіл з L-, C-негатронами показав, що наявність в електронному колі від'ємної ємності або індуктивності призводить до збільшення абсолютної та відносної чутливостей загальної ємності або індуктивності кола до зміни значень ємності або індуктивності кола. Цю властивість L-, C-негатронів можна використовувати для підвищення чутливості ємнісних та індуктивних давачів і, відповідно, точності вимірювання неелектричних фізичних величин.

Типова схема ємнісного давача з вимірювальним колом у вигляді подільника напруги зображена на рис. 4 [4]. Дану схему візьмемо в якості прототипу. На схемі: $C_б$ - баластна ємність, C_x - ємність первинного ємнісного вимірювального перетворювача, **В** - вимірювальний блок, $U_{вих1}$ - напруга на виході давача, $U_г$ - генератор змінної напруги.

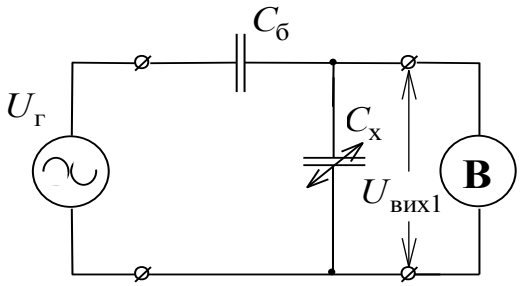


Рисунок 4 - Схема ємнісного давача (прототипу)

Даний давач буде характеризуватися такими основними параметрами:

1) Напруга на виході давача:

$$U_{вих1} = U_г \frac{C_б}{C_x + C_б}. \qquad (6)$$

2) Крутизна перетворення (абсолютна чутливість) давача:

$$K_{пер1} = -U_г \frac{C_б}{(C_x + C_б)^2}. \qquad (7)$$

3) Відносна чутливість давача:

$$S_{C_x}^{U_{вих1}} = -\frac{C_x}{C_x + C_б} \tag{8}$$

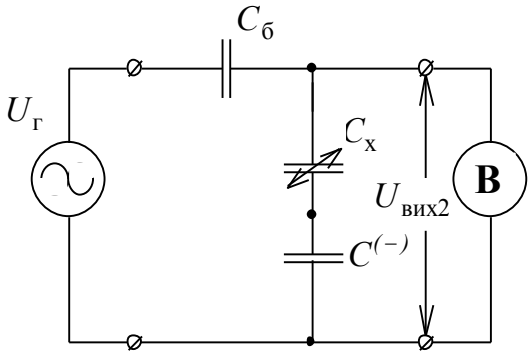


Рисунок 5 - Схема ємнісного давача з послідовним С-негатроном

Таким чином, як видно з виразу (8), модуль відносної чутливості схеми давача прототипу завжди менше одиниці, $\left|S_{C_x}^{U_{вих1}}\right| < 1$.

Розглянемо схему аналогічного ємнісного давача, але з послідовним ввімкненням від'ємної ємності $C^{(-)}$ (рис. 5).

Наявність в схемі давача від'ємної ємності робить схему потенційно нестійкою. Для визначення умови стійкості схеми ємнісного давача, зображеного на рис. 5, скористуємося умовою стійкості для електронних схем з від'ємною ємністю, що керується напругою, $\left|C^{(-)}\right| < C_{навантажен\ ня}$ [5]. При цьому умова стійкості даної схеми давача запишеться в вигляді:

$$\left|C^{(-)}\right| < (C_б \cdot C_x)/(C_б + C_x). \tag{9}$$

Визначимо основні параметри давача з С-негатроном.

Напруга на виході давача дорівнює:

$$U_{вих2} = U_г \frac{C_б(C^{(-)} + C_x)}{C_б(C^{(-)} + C_x) + C_x C^{(-)}}. \tag{10}$$

Виходячи з (10) крутизна перетворення (абсолютна чутливість) давача дорівнює:

$$K_{пер2} = \frac{dU_{вих2}}{dC_x} = -U_г \frac{C_б C^{(-)2}}{(C_б C^{(-)} + C_б C^{(-)} + C_б C_x)^2}. \tag{11}$$

З (10) визначимо відносну чутливість давача:

$$S_{C_x}^{U_{вих2}} = \frac{dU_{вих2}}{dC_x}\frac{C_x}{U_{вих2}} = -\frac{C_x C^{(-)2}}{(C_x C^{(-)} + C_б C^{(-)} + C_б C_x)(C^{(-)} + C_x)}. \tag{12}$$

З одержаних виразів (10) – (12) видно, що за наближення до межі стійкості, що випливає з (9), напруга на виході давача, крутизна перетворення та відносна чутливість давача з С-негатроном прямують до нескінченності.

Проведене теоретичне дослідження ємнісного давача з послідовним С-негатроном показало, що в даному випадку збільшується напруга на виході давача, а також можливе значне збільшення відносної та абсолютної чутливостей давача. При цьому ці параметри давача є частотонезалежними.

Комп'ютерне моделювання

Для перевірки одержаних теоретичних положень проведемо експериментальне дослідження роботи схеми давача з послідовним С-негатроном. Для цього від'ємну ємність реалізуємо за допомогою конвертора від'ємного опору мостового типу на операційному підсилювачі [5]. Співвідношенням резисторів *R1, R2* задано коефіцієнт підсилення операційного підсилювача рівний двом. При цьому реалізована від'ємна ємність $C^{(-)} = -C_к$. Схема даного негасенсора (сенсора на базі негатрона) на базі схемотехнічного аналога С-негатрона зображена на рис. 6. Результати досліджень зведені в табл. 2. На рис. 7 зображені графіки частотних залежностей параметрів негасенсора. Для даної схеми максимально одержана крутизна перетворення склала -70,2 мВ/пФ, тобто вдалося збільшити крутизну перетворення в 33,7 разів в порівняні до прототипу. Невелика розбіжність між теоретичними даними та результатами експерименту, наведеними в табл. 2, пояснюється в першу чергу тим, що при теоретичному аналізу, для більшою простоти, враховувалась тільки від'ємна ємність С-негатрона, проте як реальний С-негатрон містить також і інші додаткові елементи, як то активний опір [6], та частотною залежністю коефіцієнта підсилення операційного підсилювача.

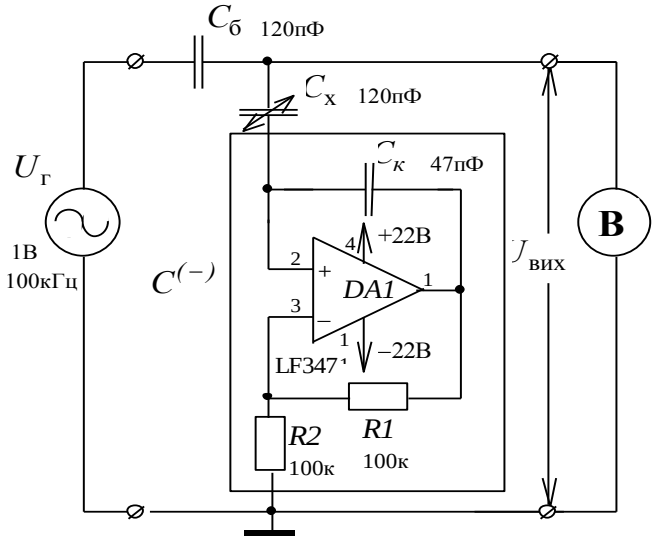


Рисунок 6 - Схема ємнісного негасенсора

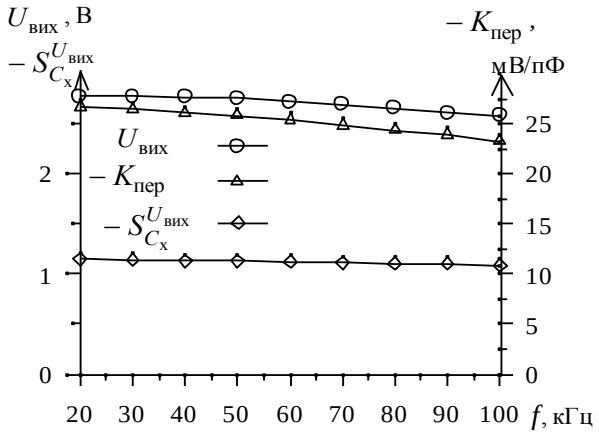


Рисунок 7 - Частотні залежності основних параметрів ємнісного негасенсора

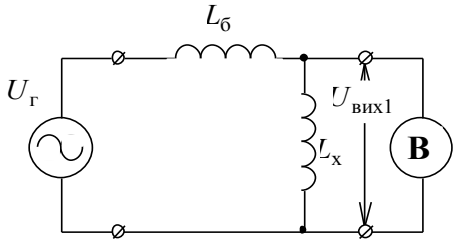


Рисунок 8 - Схема індуктивного давача (прототипу)

Таблиця 2 -Розрахункові та експериментальні дані дослідження основних параметрів ємнісного негасенсора

	$U_{вих}$,В	$K_{пер}$, мВ/пФ	$S_{C_x}^{U_{вих}}$
Для прототипу (схеми без С-негатрона)	0,5	-2,08	-0,5
Для негасенсора			
теоретично: якщо $C_к$ =33пФ	1,61	-3,11	-0,23
$C_к$ =47пФ	2,81	-27,23	-1,16
$C_к$ =53пФ	4,76	-119,43	-2,99
експеримент:якщо $C_к$ =33пФ	1,59	-3,0	-0,23
$C_к$ =47пФ	2,61	-23,2	-1,07
$C_к$ =53пФ	3,74	-70,2	-2,25

Для перевірки одержаних теоретичних положень проведемо експериментальне дослідження схеми давача з паралельним L-негатроном. Для цього від'ємну індуктивність реалізуємо за допомогою конвертора від'ємного опору мостового типу на операційному підсилювачі [5]. При цьому реалізована від'ємна індуктивність $L^{(-)} = -L_к$. Схема даного негасенсора на базі схемотехнічного аналога L-негатрона зображена на рис. 9. Результати дослідження схеми зведені в табл. 3.

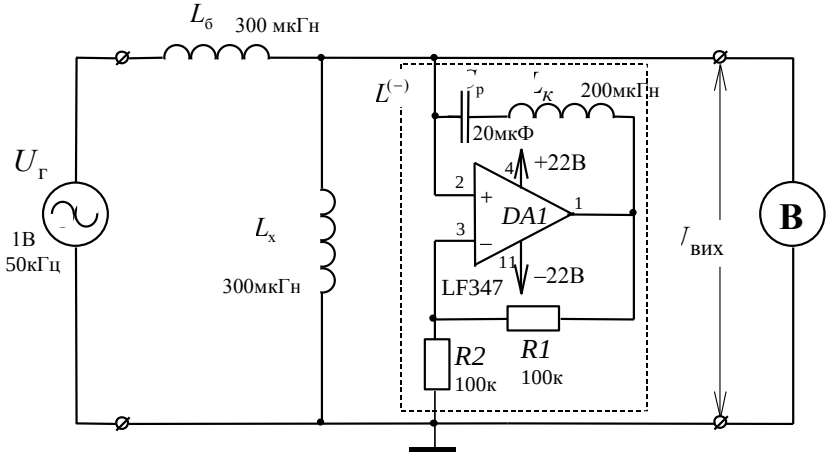


Рисунок 9 - Схема індуктивного негасенсора на базі схемотехнічного аналога L-негатрона

Таблиця 3 - Розрахункові та експериментальні дані дослідження індуктивного негасенсора

	$U_{вих}$, В	$K_{пер}$, мВ/мкГн	$S_{L_x}^{U_{вих}}$
Для прототипа (схеми без L-негатрона)	0,5	0,83	0,5
Для негасенсора			
теоретично: якщо $L_к$ =180мкГн	3	30	3
$L_к$ =200мкГн	2	13,3	2
$L_к$ =300мкГн	1	3,3	1
експеримент: якщо $L_к$ =180мкГн	2,46	20,3	2,48
$L_к$ =200мкГн	1,82	11,1	1,83
$L_к$ =300мкГн	0,98	3,2	0,99

Запропонована схема індуктивного негасенсора дозволила збільшити крутизну перетворення давача в 24,5 рази, відносну чутливість і напругу - в 5 разів. Основні параметри негасенсора мало залежать від частоти. Так при зміні частоти вхідного сигналу в діапазоні від 30 кГц до 90кГц, зміна крутизни перетворення не перевищували 3%.

Висновки

Проведений аналіз чутливості кіл з L-, C-негатронами показав, що наявність в електронному колі від'ємної ємності або індуктивності призводить до збільшення абсолютної та відносної чутливостей загальної ємності або індуктивності кола до зміни значень ємності або індуктивності кола. Цю властивість можна використовувати для підвищення чутливості ємнісних та індуктивних давачів і, відповідно, точності вимірювання неелектричних фізичних величин. На базі одержаних теоретичних положень розроблені та досліджені схеми індуктивного та ємнісного давачів з L-, C-негатронами. Показано, що чутливість таких давачів в 20-30 разів більша у порівнянні до прототипів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Філинюк М.А. До питання визначення наукового напрямку "Негатроніка" / Філинюк М.А. // Вісник ВПІ. - 1999. - №3. - С.79-81.
2. Филановский И.М. Схемы с преобразователями сопротивления / Филановский И.М., Персианов А.Ю., Рыбин В.К.. - Л.: Энергия, 1973. - 192 с.
3. Філинюк М.А. Аналіз принципу дуальності у застосуванні до RLC-негатронів / Філинюк М.А., Анфілов Р.А. // Вісник ВПІ. - 2000. - №1. - С.91-94.
4. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин: Измерительные преобразователи. / Левшина Е.С., Новицкий П.В. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 320с.
5. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах / Бенинг Ф. - М.: Сов. радио, 1975. - 286с.
6. Філінюк М.А. Дослідження енергетичних властивостей нелінійної ємності / Філінюк М.А., Лазарєв О.О. // Вісник ВПІ. - 2000. - №4. - С. 94-97.
7. Filinyuk N.A. Short historical review of development of scientific branch “negatronics” / N.A. Filinyuk A.A. Lazarev // AEU - International Journal of Electronics and Communications, Volume 68, Issue 2, February 2014, P. 172-177, ISSN 1434-8411, http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2013.07.015.
8. Філинюк М.А. LC-негатрони та їх застосування: монографія / М.А. Філинюк, О.О. Лазарев, О.В. Войцеховська. - Вінниця: ВНТУ, 2012. - 308 с.

Лазарєв Олександр Олександрович – канд. техн. наук, доцент кафедри електроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: Alexander.Lazarev.VNTU@gmail.com.

Lazarev Alexander A. — Ph.D., assistant professor of the Department of Electronics and Nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Alexander.Lazarev.VNTU@gmail.com.