

УДК 621.3.088.3

М.А. Філінюк, д.т.н., проф.  
О.О. Лазарев, асист.  
Вінницький державний технічний університет

### АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ КІЛ З L-, C-НЕГАТРОНАМИ

Проведено аналіз чутливості 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 у 20–30 разів більша у порівнянні з прототипом.

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.

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  $C_{\Sigma}$ .

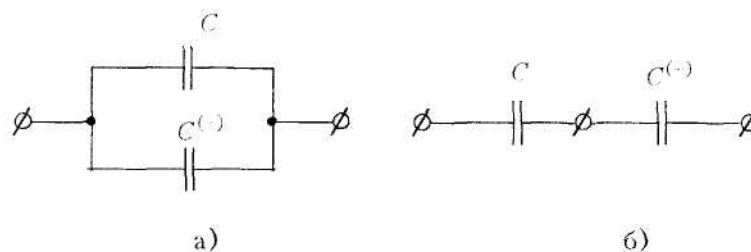


Рис. 1. Паралельне (а) та послідовне (б) з'єднання від'ємної ємності  $C^{(-)}$  з додатною ємністю  $C$  електронного кола

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

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

Визначимо вплив на чутливість сумарної ємності  $C_{\Sigma}$  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:

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

З виразу (1) видно, що, коли  $C^{(-)} < 0$ , то таке включення ємностей, за виконання умови  $|C^{(-)}| < 2C$ , дозволяє зменшити сумарна ємність кола в  $\frac{C}{C + C^{(-)}}$  разів. За умови, що  $C = |C^{(-)}|$ , 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  $C_{\Sigma}$  кола від значення від'ємної ємності  $C^{(-)}$  зображений на рис. 2, а.

У цьому випадку абсолютна чутливість сумарної ємності кола буде визначатися виразом:

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

а відносна

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

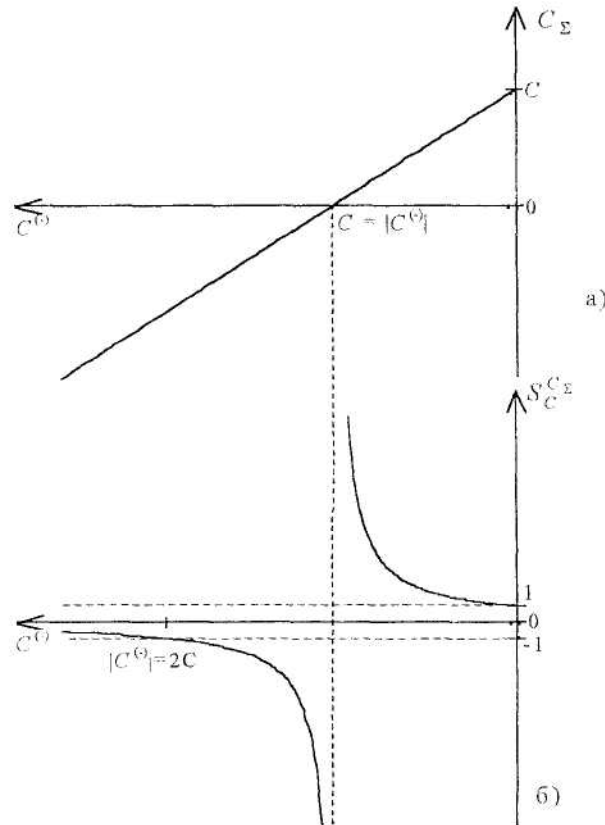


Рис. 2. Залежність сумарної ємності  $C_{\Sigma}$  паралельного з'єднання додатної  $C$  і від'ємної  $C^{(-)}$  ємностей (а) та залежність відносної чутливості сумарної ємності  $S_C^{C_{\Sigma}}$  (б) від значення  $C^{(-)}$

З (2) видно, що абсолютна чутливість у цьому випадку дорівнює 1, тобто дорівнює абсолютній чутливості 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 впливає з виразу (3), за виконання умови  $|C^{(-)}| < 2C$ , збільшується в  $\frac{C}{C + C^{(-)}}$  разів, тобто в стільки ж разів, в скільки відбулося при цьому зменшення сумарної ємності кола  $C_{\Sigma}$ . За виконання умови  $C = |C^{(-)}|$ , значення відносної чутливості прямує в нескінченність,  $S_C^{C_{\Sigma}} \rightarrow \infty$  (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  $|C^{(-)}| > C/2$  маємо збільшення сумарної ємності кола в  $\frac{C^{(-)}}{C + C^{(-)}}$  разів. У випадку, коли  $C = |C^{(-)}|$ , значення сумарної ємності прямує до нескінченності,  $C_{\Sigma} \rightarrow \infty$ . Тобто послідовне з'єднання від'ємної та додатної ємностей можна використовувати для одержання надвеликих ємностей. Графік залежності сумарної ємності  $C_{\Sigma}$  кола від значення від'ємної ємності  $C^{(-)}$  зображений на рис. 3, а.

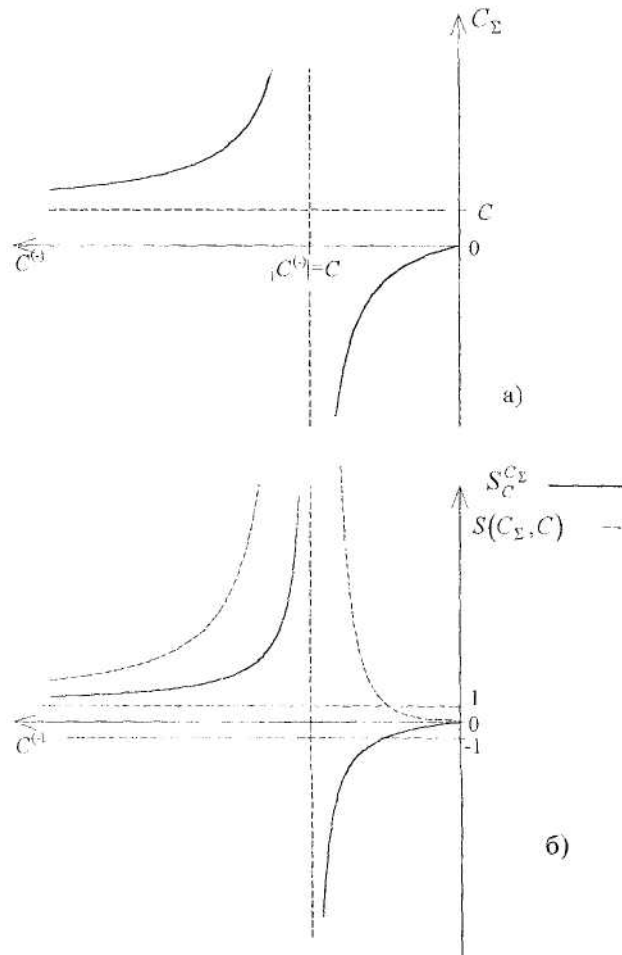


Рис. 3. Залежність сумарної ємності  $C_{\Sigma}$  послідовного з'єднання додатної  $C$  і від'ємної  $C^{(-)}$  ємностей та залежність абсолютної і відносної чутливостей сумарної ємності до зміни додатної ємності  $C$   $S(C_{\Sigma}, C)$ ,  $S_{C_{\Sigma}}^{C_{\Sigma}}$  (б) від значення від'ємної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

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

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

Відносна чутливість сумарної ємності дорівнює:

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

З виразів (4), (5) видно, що за виконання умови  $|C^{(-)}| > C/2$  значення абсолютної та модуль відносної чутливостей сумарної ємності більше одиниці, тобто у 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,  $S(C_{\Sigma}, C) \rightarrow \infty$ ,  $S_{C_{\Sigma}}^{C_{\Sigma}} \rightarrow \infty$  (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  $C_{\Sigma}$ , відносної  $S_{C_{\Sigma}}^{C_{\Sigma}}$  та абсолютної  $S(C_{\Sigma}, C)$  чутливостей у порівнянні до випадку без від'ємної ємності  $C^{(-)}$ . Що пояснюється тим, що в цьому випадку сумарна ємність  $C_{\Sigma}$  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 вищезгаданих виразів, матимемо математичні вирази для чутливості сумарної індуктивності електронних кіл з L-негатронами (табл. 1).

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	$S_{L_{\Sigma}}^{L_{\Sigma}} = \frac{L^{(-)}}{L + L^{(-)}}$	$S_{L_{\Sigma}}^{L_{\Sigma}} = \frac{L}{L_{\Sigma}} = \frac{L}{L + L^{(-)}}$

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 за прототип. На схемі:  $C_{\phi}$  – баластна ємність,  $C_x$  – ємність первинного ємнісного вимірювального перетворювача, **B** – вимірювальний блок,  $U_{вих1}$  – напруга на виході давача,  $U_r$  – генератор змінної напруги.

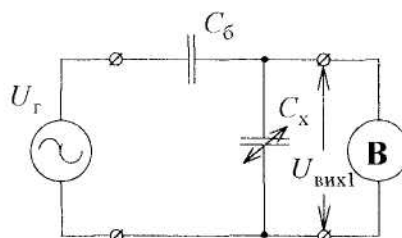


Рис. 4. Схема ємнісного давача (прототипу)

Даний давач буде характеризуватися такими основними параметрами:

1) напруга на виході давача:

$$U_{вих1} = U_r \frac{C_{\phi}}{C_x + C_{\phi}}; \tag{6}$$

2) крутизна перетворення (абсолютна чутливість) давача:

$$K_{\text{пер1}} = -U_r \frac{C_6}{(C_x + C_6)^2}; \quad (7)$$

3) відносна чутливість давача:

$$S_{C_x}^{U_{\text{вих1}}} = -\frac{C_x}{C_x + C_6}. \quad (8)$$

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

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

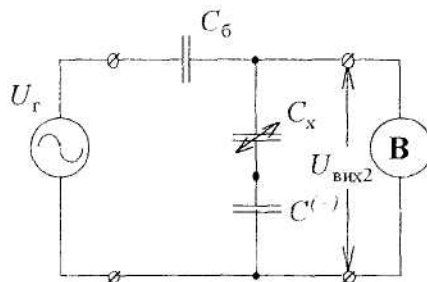


Рис. 5. Схема ємнісного давача з послідовним С-негатроном

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 навуугою,  $|C^{(-)}| < C_{\text{наб}}$  [5].

При цьому умова стійкості даної схеми давача запишеться у вигляді:

$$|C^{(-)}| < (C_6 \cdot C_x) / (C_6 + C_x). \quad (9)$$

Визначимо основні параметри давача з С-негатроном.

Напруга на виході давача дорівнює:

$$U_{\text{вих2}} = U_r \frac{C_6 (C^{(-)} + C_x)}{C_6 (C^{(-)} + C_x) + C_x C^{(-)}}. \quad (10)$$

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

$$K_{\text{пер2}} = \frac{dU_{\text{вих2}}}{dC_x} = -U_r \frac{C_6 C^{(-)2}}{(C_x C^{(-)} + C_6 C^{(-)} + C_6 C_x)^2}. \quad (11)$$

З (10) визначимо відносну чутливість давача:

$$S_{C_x}^{U_{\text{вих2}}} = \frac{dU_{\text{вих2}}}{dC_x} \frac{C_x}{U_{\text{вих2}}} = -\frac{C_x C^{(-)2}}{(C_x C^{(-)} + C_6 C^{(-)} + C_6 C_x)(C^{(-)} + C_x)}. \quad (12)$$

З одержаних виразів (10)–(12) видно, що за наближення до межі стійкості, що впливає 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 частотно-незалежними.

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  $C^{(-)} = -C_x$ . Схема даного негасенсора (сенсора на базі негатрона) на базі схемотехнічного аналога С-негатрона зображена на рис. 6.

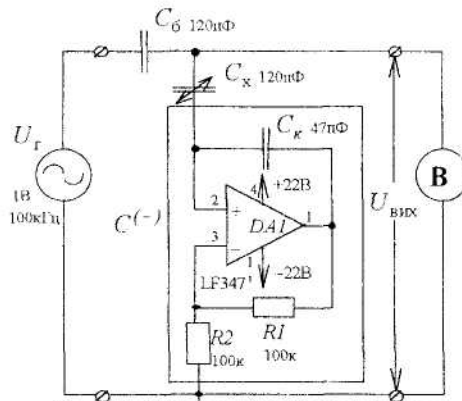


Рис. 6. Схема ємнісного негасенсора

Результати досліджень зведені в табл. 2.

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 $C_k = 33 пФ$	1,61	-3,11	-0,23
$C_k = 47 пФ$	2,81	-27,23	-1,16
$C_k = 53 пФ$	4,76	-119,43	-2,99
експеримент: якщо $C_k = 33 пФ$	1,59	-3,0	-0,23
$C_k = 47 пФ$	2,61	-23,2	-1,07
$C_k = 53 пФ$	3,74	-70,2	-2,25

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 рази в порівнянні з прототипом. Невелика розбіжність між теоретичними даними та результатами експерименту, наведеними в табл. 2, пояснюється, в першу чергу, тим, що при теоретичному аналізі, для більшої 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 частотну залежність коефіцієнта підсилення операційного підсилювача.

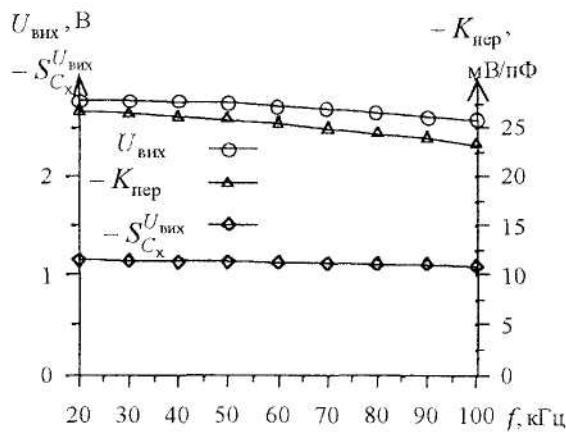


Рис. 7. Частотні залежності основних параметрів ємнісного негасенсора

Типова схема індуктивного давача з вимірювальним колом у вигляді подільника напруги зображена на рис. 8 [4]. Вона містить:  $L_6$  – баластну індуктивність,  $L_x$  – індуктивність первинного вимірювального перетворювача, **В** – вимірювальний блок,  $U_r$  – генератор змінної напруги. Дану схему візьмемо за прототип. Визначимо основні параметри даного давача.

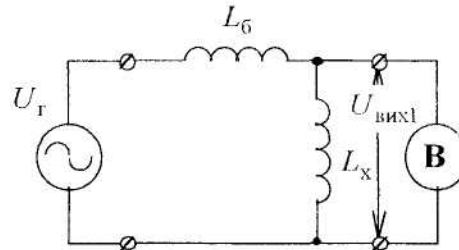


Рис. 8. Схема індуктивного давача (прототипу)

Виходячи з рис. 8, напруга на виході давача дорівнює:

$$U_{\text{вих1}} = U_r \frac{L_6}{L_x + L_6}. \tag{13}$$

Виходячи з (13), крутизна перетворення (абсолютна чутливість) давача дорівнює:

$$K_{\text{пер1}} = U_r \frac{L_6}{(L_x + L_6)^2}. \tag{14}$$

З урахування виразу (14) відносна чутливість давача дорівнює:

$$S_{L_x}^{U_{\text{вих1}}} = \frac{L_6}{L_x + L_6} < 1. \tag{15}$$

З (15) видно, що відносна чутливість даного давача завжди менша одиниці.

Розглянемо аналогічний індуктивний давач, але з паралельно ввімкнутою від'ємною індуктивністю  $L^{(-)}$  (індуктивний негасенсор) (рис. 9).

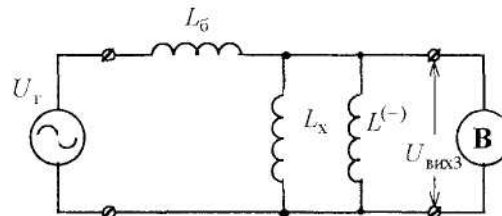


Рис. 9. Індуктивний негасенсор з паралельним  $L$ -негатроном

З урахуванням того, що загальною умовою стійкості електронної схеми з від'ємною індуктивністю, що керується напругою, є вираз  $|L^{(-)}| > L_{\text{наб}}$ . [5], одержимо умову стійкості даного негасенсора:

$$|L^{(-)}| > (L_6 \cdot L_x) / (L_6 + L_x). \tag{16}$$

Визначимо основні параметри індуктивного негасенсора:

Виходячи з рис. 9, напруга на виході негасенсора дорівнює:

$$U_{\text{вих3}} = U_r \frac{L_x L^{(-)}}{L_x L_6 + L_6 L^{(-)} + L_x L^{(-)}}. \tag{17}$$

Виходячи з (17), визначимо крутизну перетворення (абсолютну чутливість):

$$K_{\text{пер3}} = \frac{dU_{\text{вих3}}}{dL_x} = U_r \frac{L_6 L^{(-)2}}{(L_6 L_x + L_6 L^{(-)} + L_x L^{(-)})^2} \tag{18}$$

та відносну чутливість даного негасенсора:

$$S_{L_x}^{U_{\text{вих3}}} = - \frac{L_6 L^{(-)}}{L_6 (L^{(-)} + L_x) + L_x L^{(-)}}. \tag{19}$$



З одержаних виразів (17)–(19) видно, що за наближення до межі стійкості, що впливає з (16), напруга на виході давача, крутизна перетворення та відносна чутливість давача прямують до нескінченності. Фактично це свідчить про те, що схема набуває значної чутливості і переходить в нестійкий режим роботи.

Проведене теоретичне дослідження індуктивного негасенсора з паралельним L-негатроном показало, що у даному випадку збільшується напруга на виході давача, збільшується крутизна перетворення та відносна чутливість давача. При цьому ці параметри давача теоретично є частотонезалежними. На практиці частотні залежності цих параметрів будуть визначатися впливом паразитних елементів схеми та частотними залежностями використаних елементів схеми.

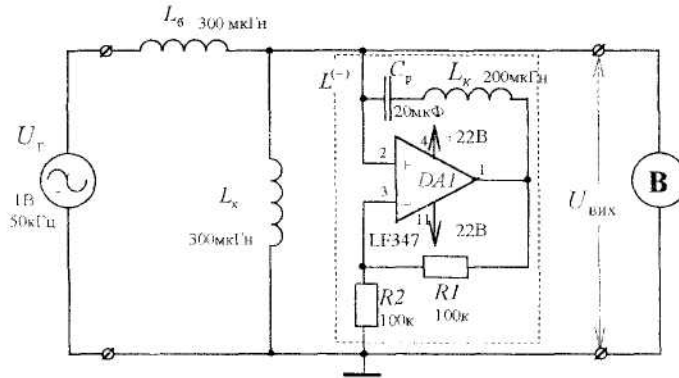


Рис. 10. Схема індуктивного негасенсора на базі схемотехнічного аналога L-негатрона

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  $L^{(-)} = -L_k$ . Схема даного негасенсора на базі схемотехнічного аналога L-негатрона зображена на рис. 10. Результати дослідження схеми зведені в табл. 3.

Таблиця 3  
Розрахункові та експериментальні дані дослідження індуктивного негасенсора

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

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 з прототипами.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Філішюк М.А.* До питання визначення паукового напрямку "Негатроніка" // Вісник ВПІ. – 1999. – № 3. – С. 79–81.
2. *Филановский И.М., Персианов А.Ю., Рыбин В.К.* Схемы с преобразователями сопротивления. – Л.: Энергия, 1973. – 192 с.
3. *Філішюк М.А., Аніфілов Р.А.* Аналіз принципу дуальності у застосуванні до RLC-негатронів // Вісник ВПІ. – 2000. – № 1. – С. 91–94.
4. *Левшина Е.С., Новицкий П.В.* Электрические измерения физических величин: Измерительные преобразователи. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
5. *Бенинг Ф.* Отрицательное сопротивление в электронных схемах. – М.: Сов. радио, 1975. – 286 с.
6. *Філішюк М.А., Лазарев О.О.* Дослідження енергетичних властивостей нелінійної ємності // Вісник ВПІ. – 2000. – № 4. – С. 94–97.

ФІЛИШЮК Микола Антонович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури Вінницького державного технічного університету.

Наукові інтереси:

- негатроніка (теорія та практика створення і використання пристроїв з від'ємними опором, ємністю, індуктивністю);
- активні НВЧ фільтри;
- інформаційні пристрої на узагальнених перетворювачах імітансу;
- методи та засоби вимірювання потенційно-нестійких чотириполосників.

E-mail: Filinyuk@vstu.vinnica.ua

ЛАЗАРЄВ Олександр Олександрович – асистент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури Вінницького державного технічного університету.

Наукові інтереси:

- негатроніка.

Подано 08.11.2002