

О. О. Лазарєв, к.т.н., доцент,
М. А. Філінюк, д.т.н., професор,
Л. Б. Ліщинська, д.т.н., професор,
Д. В. Бондарюк, аспірант

Вінницький національний технічний університет,
 Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СХЕМОТЕХНІЧНОГО L-НЕГАТРОНА

Розроблено математичну модель L-негатрона, проведено обґрунтування його еквівалентної схеми. Визначено аналітичні вирази для параметрів L-негатрона, що дає змогу на етапі проектування електронних пристроїв провезти аналіз впливів L-негатрона на параметри схеми та синтезувати пристрої з необхідними характеристиками.

Ключові слова: L-негатрон, математична модель, негатроніка.

Вступ. Розвиток сучасної інформаційної техніки нерозривно пов'язаний з пошуком нової елементної бази, що володіє розширеними функціональними можливостями [1]. Цим вимогам відповідають негатрони – електронні пристрої та їх схемотехнічні аналоги, що володіють у певному режимі роботи від'ємним значенням основного диференціального параметра: активного опору (R-негатрон), ємності (C-негатрон) або індуктивності (L-негатрон). R-негатрони отримали досить широке застосування як в інформаційній техніці [2], так і в енергетиці та транспорті [3, 4]. Значні успіхи досягнуті в розробці теорії застосування C-негатронів [5, 6].

Розробка інформаційних пристроїв на основі L-негатронів відбувається повільніше. Це пов'язано з відсутністю фізичних L-негатронів з відповідними для застосування технічними параметрами. Нині вирішення цієї проблеми досягається шляхом побудови схемотехнічних аналогів L-негатронів на основі операційних підсилювачів [7]. При розробці математичних моделей таких схемотехнічних L-негатронів робиться припущення про незалежність параметрів операційного підсилювача від частоти, що веде до зростання похибки проектування радіоелектронних приладів на основі схемотехнічних L-негатронів [8]. Подолання цього недоліку потребує розробки математичної моделі схемотехнічного L-негатрона, що враховує частотні властивості операційного підсилювача (ОП).

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка математичної моделі схемотехнічного L-негатрона, що враховує частотні властивості операційного підсилювача.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

- 1) обґрунтування еквівалентної схеми схемотехнічного L-негатрона;
- 2) визначення аналітичних виразів для параметрів L-негатрона;
- 3) перевірка адекватності та коректності розробленої математичної моделі.

Обґрунтування еквівалентної схеми схемотехнічного L-негатрона. Схемотехнічний L-негатрон реалізується на перетворювачах від'ємного імпеданса, що реалізуються на активному приладі (наприклад операційному підсилювачі), охопленому позитивним зворотним зв'язком. Найбільш доцільно від'ємну індуктивність реалізувати на інверторі від'ємного опору шляхом перетворення додатної ємності, що спростить виконання L-негатрона в інтегральному виді [7]. На рис. 1 наведено схему реалізації L-негатрона, входом якої є інвертувальний вхід ОП.

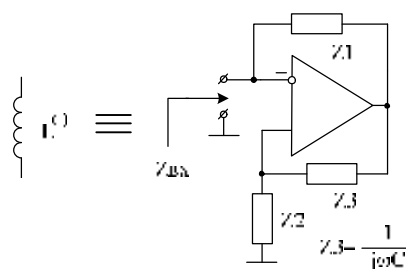


Рис. 1. Високочастотна електрична схема реалізації L-негатрона на ОП

Вхідний імпеданс схеми визначається відомим виразом [6, 9] $Z_{ax} = -(Z_2 \cdot Z_1) / Z_3$. Використовуючи як Z_3 конденсатор $C1$, а замість Z_2 та Z_1 – резистори $R1$, $R2$, отримаємо:

$$Z_{ex} = -(R_1 \cdot R_2) / \frac{1}{j\omega C}. \quad (1)$$

Вираз (1) для вхідного імпедансу схеми, представленій на рис. 1, визначений за умови використання ідеального операційного підсилювача, що не відповідає реальному ОП, в якого коефіцієнт підсилення є частотозалежним.

Розрахуємо вхідний імпеданс схеми при використанні неідеального операційного підсилювача, апроксимуючи частотну залежність його коефіцієнта підсилення у вигляді [6]:

$$\dot{K} = K_0 / (1 + j \frac{f}{f_1} K_0), \quad (2)$$

де K_0 – коефіцієнт підсилення схеми на низьких частотах, f_1 – частота одиничного підсилення. Також врахуємо комплексний характер вхідного і вихідного опорів ОП шляхом введення в схему (рис. 1) опорів $Z_{вух_{оп}}$, $Z_{вх1_{оп}}$, $Z_{вх2_{оп}}$, $Z_{вх3_{оп}}$.

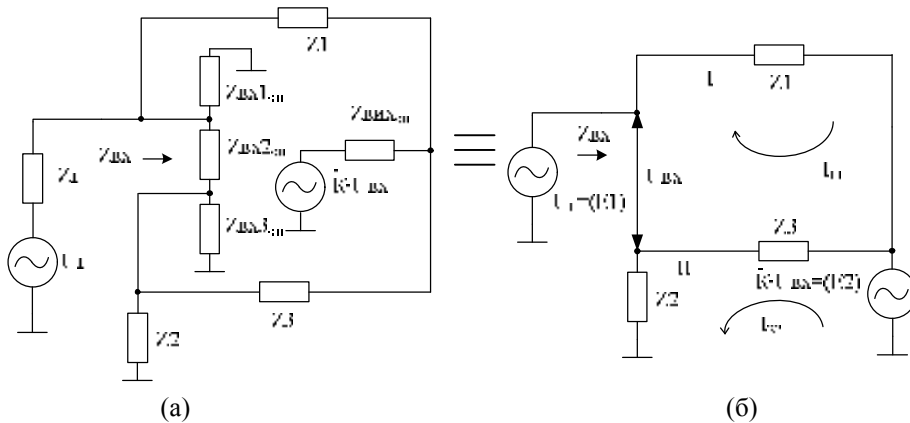


Рис. 3. Узагальнена (а) та спрощена (б) еквівалентні схеми схемотехнічного L-негатрона. На схемі Z_{Γ} – опір генератора високочастотного сигналу; U_{Γ} – напруга генератора

Використовуючи метод контурних струмів [10] для схеми, зображеної на рис. 3, а, запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{K} \cdot U_{ex} = Z_{вух_{оп}} \cdot I_{11} + Z_3 \cdot I_{11} + Z_2 \cdot I_{11} - \\ - I_{22} \cdot Z_{вух_{оп}} + Z_3 \cdot I_{44} \\ \dot{K} \cdot U_{ex} + U_{\Gamma} = I_{22} (Z_{\Gamma} + Z_1 + Z_{вух_{оп}}) + \\ + I_{33} \cdot Z_{\Gamma} - I_{11} \cdot Z_{вух_{оп}} + Z_1 \cdot I_{44} \\ U_{\Gamma} = I_{33} (Z_{\Gamma} + Z_{вх1_{оп}}) + I_{22} \cdot Z_{\Gamma} \\ 0 = I_{44} (Z_1 + Z_3 + Z_{вх2_{оп}}) + I_{11} \cdot Z_3 + I_{22} \cdot Z_1 \end{cases}$$

де I_{11} , I_{22} , I_{33} , I_{44} – контурні струми.

Для спрощення математичного аналізу введемо ряд допущень, вважаючи, що $Z_{вх1_{оп}} \gg Z_{\Gamma}$, $Z_{вх2_{оп}} \gg Z_{\Gamma}$, $Z_{вх3_{оп}} \gg Z_{\Gamma}$,

В результаті отримаємо еквівалентну схему ОП, зображену на рис. 2.

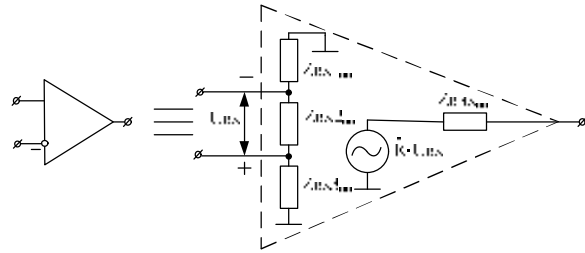


Рис. 2. Високочастотна еквівалентна схема ОП. На схемі $Z_{вх1_{оп}}$, $Z_{вх2_{оп}}$, $Z_{вх3_{оп}}$ – вхідні опори ОП; $Z_{вух_{оп}}$ – вихідний опір ОП; U_{ex} – вхідна напруга

Щоб знайти вхідний імпеданс схеми L-негатрона, зображеної на рис. 1 з урахуванням високочастотної еквівалентної схеми ОП (рис. 2), представимо схему рис. 1 у вигляді рис. 3, а.

$Z_{вух_{оп}} \ll Z_1$, $Z_{вух_{оп}} \ll Z_2$, $Z_{вух_{оп}} \ll Z_3$
 $Z_{вух_{оп}} \approx 0$, $Z_{вх1_{оп}} \approx \infty$, $Z_{вх2_{оп}} \approx \infty$,
 $Z_{вх3_{оп}} \approx \infty$, $Z_{\Gamma} \approx 0$. З урахуванням зроблених допущень, схему на рис. 3, а представимо у вигляді схеми, що зображена на рис. 3, б.

Для цієї схеми:

$$\begin{cases} E_1 = Z_1 \cdot I_{11} + (Z_2 + Z_3) \cdot (I_{11} + I_{22}) \\ E_2 = (Z_2 + Z_3) \cdot (I_{11} + I_{22}). \end{cases} \quad (3)$$

З урахуванням того, що $E_2 = -U_{ex} \cdot \dot{K}$, а $U_{ex} = E_1 - Z_2 (I_{11} + I_{22})$, знаходимо $E_2 = -(E_1 - Z_2 (I_{11} + I_{22})) \cdot \dot{K}$. Після виконаних перетворень система рівнянь (3) набуде вигляду:

$$\begin{cases} E_1 = Z_1 \cdot I_{11} + (Z_2 + Z_3) \cdot (I_{11} + I_{22}) \\ E_1 = \frac{(Z_2 + Z_3)(I_{11} + I_{22}) - Z_2(I_{11} + I_{22}) \cdot \dot{K}}{-\dot{K}} \end{cases} \quad (4)$$

Вхідний імпеданс схеми визначається за формулою

$$Z_{ex} = U_{\Gamma} / I_{ex} \quad (5)$$

Оскільки $U_{\Gamma} = E_1$ та $I_{ex} = I_{11}$, розв'язавши систему рівнянь (4), отримаємо вираз для струму I_{11} :

$$I_{ex} = I_{11} = \frac{E_1 \cdot Z_2 + E_1 \cdot Z_3 + E_1 \cdot \dot{K} \cdot Z_3}{Z_1(Z_2 + Z_3 - \dot{K} \cdot Z_2)} \quad (6)$$

В результаті знаходимо:

$$Z_{ex} = \frac{U_{\Gamma}}{I_{ex}} = \frac{E_1}{I_{11}} = \frac{Z_1(Z_2 + Z_3 - \dot{K} \cdot Z_2)}{Z_2 + Z_3 + \dot{K} \cdot Z_3} = \quad (7)$$

$$= \operatorname{Re} Z_{ex} + j \operatorname{Im} Z_{ex}$$

де

$$\operatorname{Im} Z_{ex} = \frac{f_1 f K_0^2 R_1 (1 + 2C\pi R_2 (-f_1 + 2Cf^2 \pi R_2))}{-4Cf^2 f_1 K_0^2 \pi R_2 + f^2 K_0^2 (1 + 4C^2 f^2 \pi^2 R_2^2) + f_1^2 ((1 + K_0)^2 + 4C^2 f^2 \pi^2 R_2^2)}; \quad (8)$$

$$\operatorname{Re} Z_{ex} = \frac{R_1 (f_1^2 + f_1^2 K_0 + f^2 K_0^2 - 4Cf^2 f_1 K_0^2 \pi R_2 + 4C^2 f^2 (-f_1^2 (-1 + K_0) + f^2 K_0^2) \pi^2 R_2^2)}{-4Cf^2 f_1 K_0^2 \pi R_2 + f^2 K_0^2 (1 + 4C^2 f^2 \pi^2 R_2^2) + f_1^2 ((1 + K_0)^2 + 4C^2 f^2 \pi^2 R_2^2)} \quad (9)$$

Використовуючи (8), знайдемо вираз для значення вхідної від'ємної індуктивності $L^{(-)}$ L-негатрона на частотах, менших максимальної частоти одиничного підсилення ОП [6]:

$$L^{(-)} = \frac{f_1 K_0^2 R_1 (1 + 2C\pi R_2 (-f_1 + 2Cf^2 \pi R_2))}{2\pi (-4Cf^2 f_1 K_0^2 \pi R_2 + f^2 K_0^2 (1 + 4C^2 f^2 \pi^2 R_2^2) + f_1^2 ((1 + K_0)^2 + 4C^2 f^2 \pi^2 R_2^2))} \quad (10)$$

З аналізу одержаних виразів (7–10) видно, що схемотехнічний L-негатрон має від'ємну індуктивність $L^{(-)}$ і від'ємний активний опір $R^{(-)}$. З урахуванням цього, спрощену фізичну еквівалентну схему L-негатрона представимо у вигляді рис. 4.

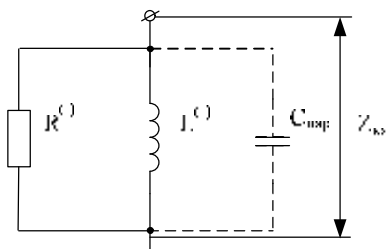


Рис. 4. Еквівалентна схема досліджуваного L-негатрона. $R^{(-)}$ – від'ємний активний опір; $L^{(-)}$ – від'ємна індуктивність; $C_{нар}$ – паразитна додатна ємність

Виходячи з одержаних виразів математичної моделі, ми встановили, що еквівалентна схема (рис. 4) досліджуваного L-негатрона складається з паралельно з'єднаних від'ємної

індуктивності, активного опору та паразитної додатної ємності. Враховуючи те, що в реальних схемах завжди існує міжелектродна паразитна ємність, тому в запропоновану схему введено ємність $C_{нар}$. Частотна залежність коефіцієнта \dot{K} призводить до частотної залежності $L^{(-)}$, $R^{(-)}$. На високих частотах L-негатрон втрачає від'ємну індуктивність та від'ємний активний опір.

Визначення аналітичних виразів для параметрів L-негатрона. До основних параметрів L-негатрона відносяться: уявна $\operatorname{Im} Z_{ex}$ та дійсна $\operatorname{Re} Z_{ex}$ складові його вхідного імпеданса, що визначаються виразами (8) та (9); еквівалентна індуктивність $L^{(-)}$, що визначається виразом (10); максимальна робоча частота.

Знайдемо аналітичний вираз для визначення максимальної робочої частоти L-негатрона. Для цього, використовуючи (8), знайдемо частоту, що відповідає екстремуму функції $\operatorname{Im} Z_{ex}$ шляхом розв'язання рівняння:

$$\frac{d \operatorname{Im} Z_{ex}}{df} = (f \cdot f_1 K_0^2 R_1 (-K_0^2 + 6Cf_1 K_0^2 \pi R_2 + C^2 K_0 (f_1^2 - 4(2f^2 + f_1^2) K_0) \pi^2 R_2^2 + 8C^3 f_1 (f_1^2 + 2f^2 K_0^2) \pi^3 R_2^3 - 16C^4 f^4 K_0^2 \pi^4 R_2^4) / \quad (11)$$

$$/ (\pi (-4Cf^2 f_1 K_0^2 \pi R_2 + f^2 K_0^2 (1 + 4C^2 f^2 \pi^2 R_2^2) + f_1^2 ((1 + K_0)^2 + 4C^2 f^2 \pi^2 R_2^2)))^2 = 0$$

Одержане рівняння має п'ять розв'язків. Відкинемо від'ємні розв'язки, оскільки значення максимальної частоти не повинне бути від'ємним, також відкинемо нульовий

розв'язок. Нас цікавить корінь, в якому функція має максимально від'ємне значення, оскільки він буде визначати максимальну частоту L-негатрона:

$$f_1 = \frac{\sqrt{2\pi C^3 R_2^3 f_1 - C^2 R_2^2} - \frac{2\sqrt{2\pi^3 C^7 R_2^7 f_1^3}}{K_0} - \sqrt{2\pi C^5 R_2^5 f_1}}{2\pi C^5 R_2^2}; \quad (12)$$

$$f_2 = \frac{\sqrt{2\pi C^5 R_2^5 f_1 - C^2 R_2^2} + \frac{2\sqrt{2\pi^3 C^7 R_2^7 f_1^3}}{K_0} + 2\pi C^3 R_2^3 f_1}{2\pi C^2 R_2^2}. \quad (13)$$

Два додатні корені (12) і (13) описують два екстремуми функції (8), в яких реактивний опір має максимальне від'ємне значення та максимальне додатне значення. Проаналізувавши отримані вирази для коренів, доходимо висновку, що (13) є найменшим коренем та відповідно визначає максимальну робочу частоту L-негатрона.

На рис. 5 зображені графіки частотної залежності реактивного $\text{Im}Z_{ex}$ та активного $\text{Re}Z_{ex}$ імпедансів L-негатрона і графік частотної залежності від'ємної індуктивності $\frac{\text{Im}Z_{ex}}{2\pi f}$ L-негатрона та залежність максимальної робочої частоти L-негатрона f_2 від зміни частоти одиничного підсилення f_1 .

Перевірка адекватності та коректності розробленої математичної моделі. Досліджено залежності основних параметрів L-негатрона в діапазоні частот при таких значеннях елементів схеми:

$R_1 = 1000 \text{ Ом}, R_2 = 300 \text{ Ом}, C = 1 \text{ нФ}.$ Параметри операційного підсилювача LF357: $K_0 = 200000, f_1 = 20 \text{ МГц}.$

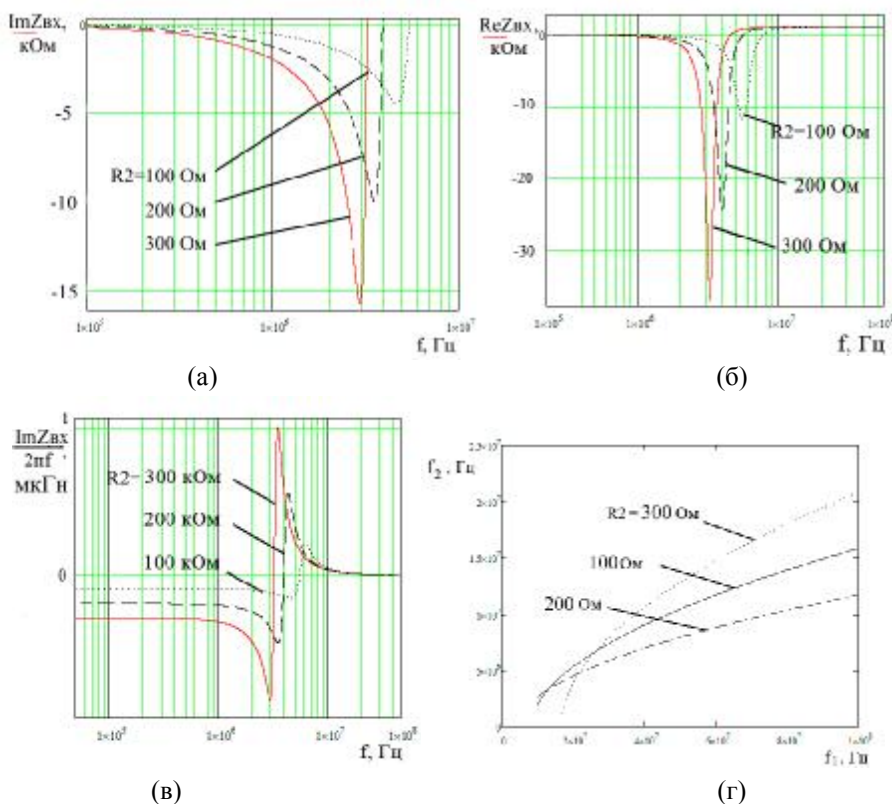


Рис. 5. Графіки частотної залежності реактивного $\text{Im}Z_{ex}$ (а), активного $\text{Re}Z_{ex}$ (б) імпедансів L-негатрона, від'ємної індуктивності (в) та залежність максимальної робочої f_2 частоти схеми від зміни частоти одиничного підсилення f_1 (г)

З рис. 5, а видно, що реактивний опір має від'ємне значення та зі зростанням частоти збільшується за модулем і має максимальне від'ємне значення $-15,8$ кОм на частоті $2,95$ МГц. Ця частота є максимальною робочою частотою L-негатрона, після якої він втрачає властивість від'ємної індуктивності. З рис. 5, б видно, що активний опір є від'ємним, починаючи з частоти 6 кГц, та зі зростанням частоти збільшується за модулем і має максимальне від'ємне значення $-36,9$ кОм на частоті $3,24$ МГц.

З рис. 5, в випливає, що значення від'ємної індуктивності при $R2 = 300$ кОм становить -292 мкГн в діапазоні частот від 1 кГц до 1 МГц. Після частоти 1 МГц значення від'ємної індуктивності збільшується за модулем і максимальне значення становить -851 мкГн на частоті $2,95$ МГц. Зі зростанням частоти одиничного підсилення f_1 робоча частота також зростає (рис. 5, г). При зміні частоти одиничного підсилення f_1 від 10 до 100 МГц робоча частота L-негатрона змінюється від 2 до 15 МГц. Таким чином, максимальна частота L-негатрона буде визначатися частотними властивостями обраного операційного підсилювача та становити $(0,15..0,2)f_1$.

Проведені дослідження впливу параметрів схеми на значення основних параметрів L-негатрона показали, що зі зростанням величини резистора $R2$ від 100 - 300 кОм відбувається зменшення значення від'ємної індуктивності від 95 - 292 мкГн. З виразу (13) видно, що опір $R1$ не впливає на максимальну робочу частоту, а впливають C та $R2$. На рис. 6 зображено графіки залежності максимальної робочої частоти від параметрів C та $R2$.

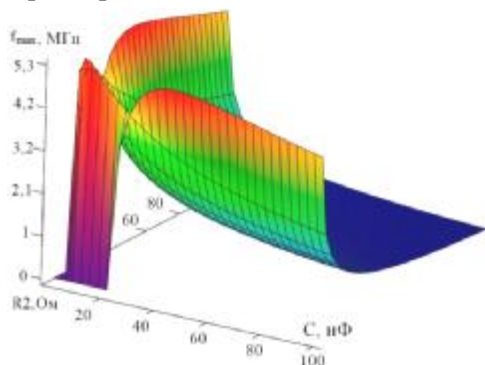


Рис. 6. Залежність зміни вихідного значення робочої частоти L-негатрона від зміни значень параметрів $R2$ та C

З рис. 6 видно, що можна оптимізувати розглянуту схему за максимальною робочою

частотою. Наприклад, при $C = 5$ пФ, $R2 = 10$ Ом, $R1 = 6000$ Ом значення максимальної робочої частоти L-негатрона буде збільшено з $2,95$ до 6 МГц.

З метою підтвердження адекватності отриманих результатів проведено моделювання схеми рис. 7.

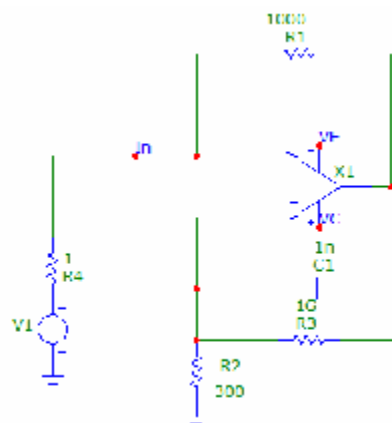


Рис. 7. Електрична принципова схема L-негатрона в програмному середовищі Micro-Cap

За результатами моделювання досліджено частотні залежності активного та реактивного опорів (рис. 8).

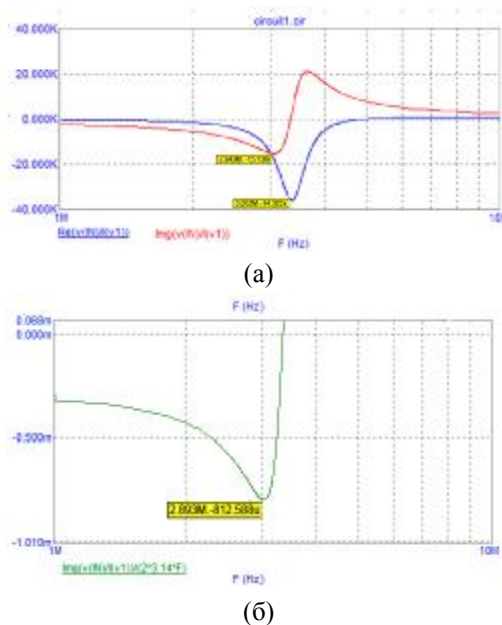


Рис. 8. Графіки частотної залежності активного та реактивного опорів (а) і частотної залежності від'ємної індуктивності L-негатрона (б), промодельованого в програмному середовищі Micro-Cap

З рис. 8, а видно, що реактивний опір має від'ємне значення і зі зростанням частоти збільшується, але за значенням відрізняється

від математично розрахованого, і його максимальне від'ємне значення – $-15,1$ кОм на частоті $2,84$ МГц. Тобто відносна похибка за реактивним опором становить $4,6\%$, а за максимальною робочою частотою – $3,8\%$. Активний опір зі зростанням частоти збільшується за модулем і має максимальне від'ємне значення $-34,3$ кОм на частоті $3,06$ МГц, відносна похибка становить відповідно $7,5\%$ по модулю та $5,5\%$ по частоті.

З рис. 8, б випливає, що значення від'ємної індуктивності збільшується за модулем і максимальне значення становить -812 мкГн на частоті $2,89$ МГц, що відрізняється від розрахункового відповідно на $4,8$ і 2% .

Отримані графіки моделювання якісно повторюють графіки залежностей, отриманих при математичних розрахунках (рис. 5, 6), що підтверджує адекватність та коректність виведеної математичної моделі.

Висновки:

1) Розроблено математичну модель L-негатрона на інверторі від'ємного опору на операційному підсилювачі, що дозволило визначити еквівалентну схему цього L-негатрона, частотну залежність його параметрів, максимальну робочу частоту, що дає змогу на етапі проектування електронних пристроїв визначити вплив L-негатрона на параметри схеми та синтезувати пристрої з необхідними характеристиками.

2) Визначено аналітичні вирази для параметрів L-негатрона. Виділено дійсну складову вхідного імпеданса схемотехнічного L-негатрона, на їх основі знайдено вирази для значення вхідної від'ємної індуктивності $L^{(-)}$ та вхідного від'ємного опору $R^{(-)}$ L-негатрона. Визначено максимальну частоту L-негатрона та показано, що вона становить $(0,15..0,2)f_1$.

3) На частотах, більших 1 МГц, теоретично розраховане значення від'ємної індуктивності збільшується за модулем і максимальне значення становить -851 мкГн на частоті $2,95$ МГц, що відрізняється від отриманих значень при моделюванні на $4,8$ і 2% відповідно. Реактивний опір має від'ємне значення та зі зростанням частоти збільшується за модулем. Його розраховане максимальне від'ємне значення – $-15,8$ кОм на частоті $2,95$ МГц, що відрізняється від результатів моделювання на $4,6$ і $3,8\%$ відповідно. Активний опір є від'ємним, починаючи з частоти 6 кГц, та зі зростанням

частоти збільшується за модулем і має максимальне від'ємне значення $-36,9$ кОм на частоті $3,24$ МГц, що відрізняється від результатів моделювання на $7,5$ і $5,5\%$.

Список літератури

1. 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, 2014. – Vol. 68, Issue 2, – P. 172–177.
2. Филинюк Н. А. Информационные устройства на комбинированных динамических негatronах / Н. А. Филинюк, Е. В. Войцеховская, Л. Б. Лищинская. – LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 160 с.
3. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / П. А. Воронин. – М. : Издат. дом Додэка-XXI, 2005. – 384 с.
4. Mohan Mathur R. Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems / R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma. – Wiley-IEEE Press, 2002. – 495 p.
5. Negative capacitance effect in semiconductor devices / M. Ershov, H. C. Liu, L. Li et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1998. – № 10. – P. 2196–2206.
6. Филинюк М. А. LC-негатрони та їх застосування : [монографія] / Филинюк М. А., Лазарев О. О., Войцеховська О. В. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 308 с.
7. Дослідження схемотехнічної реалізації L-негатронів на операційному підсилювачі / О. В. Войцеховська, О. О. Лазарев, Л. І. Покотилук, Р. Ю. Чехмestрук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 4. – С. 68–73.
8. Jaikla W. Floating positive and negative inductance simulators based on OTAs / W. Jaikla, M. Siripruchyanan // Communications and Information Technologies : International Symposium. – 2006. – P. 344–347.
9. Patent USA № 29080. Int. Cl.2 H03H 7/00, H03H 11/00. Compensated transformer circuit utilizing negative capacitance simulating circuit / F. J. Kiko. Claimer and patent holder F. J. Kiko. – № 426826; published 17.12.76.
10. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2002. – 638 с.

References

1. Filinyuk, N. A. and Lazarev, A. A. (2014) Short historical review of development of scientific branch “negatronics”. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 68 (2), pp. 172–177.
2. Filinyuk, N. A., Vojcehovskaja E. V. and Lishhinskaja L. B. (2013) Information devices based on combined dynamic negatron. LAP Lambert Academie Publishing, 160 p. [in Russian].
3. Voronin, P. A. (2005) Semiconductor keys of force: families, characteristics, application. Moscow: Izdat. dom Dodeka-XXI, 384 p. [in Russian].
4. Mohan, Mathur R. and Rajiv, K. Varma (2002) Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems. *Wiley-IEEE Press*, 495 p.
5. Ershov, M. H., Liu, C., Li, L. et al. (1998) Negative capacitance effect in semiconductor devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, (10), pp. 2196–2206.
6. Filinyuk, M. A. Lazarev, A.A. and Vojcehovs'ka, O.V. (2012) LC-negatrons and their application. Vinnicja: VNTU, 308 p. [in Ukrainian].
7. Vojcehovs'ka, O. V., Lazarev, O. O., Pokotiljuk, L. I. and Chehmestruk, R. Ju. (2012) The research of circuit realization of L-negatrons on operational amplifier. *Visnyk Hmelnyc'kogo nacional'nogo universitetu*, (4), pp. 68–73 [in Ukrainian].
8. Jaikla, W. and Siripruchyanan, M. (2006) Floating positive and negative inductance simulators based on OTAs. *Communications and Information Technologies: International Symposium*, pp. 344–347.
9. Patent USA № 29080. Int. Cl.2 H03H 7/00, H03H 11/00. Compensated transformer circuit utilizing negative capacitance simulating circuit. F. J. Kiko. Claimer and patent holder F. J. Kiko. № 426826; published 17.12.76.
10. Bessonov, L. A. (2002) Theoretic foundations of electrical engineering. Electric circuits. Moiscow: Gardariki, 638 p. [in Russian].

O. O. Lazarev, PhD, associate professor,

M. A. Filinyuk, D.Tech.Sc., professor,

L. B. Lishhinskaja, D.Tech.Sc, professor,

D. V. Bondaryuk, postgraduate

Vinnytsia National Technical University

Hmel'nickoe highway, 95, Vinnytsia, 21021, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF CIRCUIT L-NEGATRON

In the article mathematical model of L-negatron is developed. The substantiation of its equivalent circuit is made. Analytical formulae for L-negatron parameters that help at the stage of electronic devices design to make the analysis of L-negatron influence on the parameters of the circuit and to synthesize devices with desired characteristics are determined.

It is proved that the presence of negative active resistance and inductance in L-negatron leads to potential instability inductive sensor circuits. It is shown that the instability provides the autogeneration to build frequency inductive sensors.

The autogeneration conditions are determined. It is shown that sensors containing L-negatron can operate in autogeneration and sensitivity of these sensors to 10 times higher compared to the prototype.

At the frequencies more than 1 MHz theoretical value of negative inductance increases in magnitude and maximum value is -851 uH at a frequency of 2.95 MHz. The reactance is negative – -15.8 kohm at a frequency of 2.95 MHz. The resistance is negative at a frequency 6 MHz and with increasing frequency it also increases.

Keywords: L-negatron, mathematical model, negatronics.