

## PHYSICAL SENSORS

---

## СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

---

---

УДК 621.374

### ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ІНДУКТИВНИХ НЕГАСЕНСОРІВ

*М. А. Філінюк<sup>1</sup>, О. О. Лазарєв<sup>2</sup>, Л. Б. Ліщинська<sup>3</sup>, Д. В. Бондарюк<sup>4</sup>*

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

*<sup>1</sup> N\_Fil\_45@mail.ru, <sup>2</sup> L\_FiL1@mail.ru, <sup>3</sup> laalex@mail.ru, <sup>4</sup> bondaryuk@yandex.ru*

### ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ІНДУКТИВНИХ НЕГАСЕНСОРІВ

*М. А. Філінюк, О. О. Лазарєв, Л. Б. Ліщинська, Д. В. Бондарюк*

**Анотація.** Досліджені схеми однопараметричного та двопараметричного автогенераторних індуктивних негасенсорів, показано, що наявність від'ємної індуктивності призводить до підвищення чутливості сенсорів в 3-5 разів, визначені коефіцієнти збільшення абсолютної та відносної чутливостей, проведені дослідження впливу дестабілізуючих факторів на параметри негасенсорів.

**Ключові слова:** сенсор, автогенераторний сенсор, L-негатрон

### INVESTIGATION OF AUTOGENERATING INDUCTIVE NEGASENSORS

*М. А. Filinyuk, O. O. Lazarev, L. B. Lishchynska, D. V. Bondaryuk*

**Abstract.** Investigation circuits of one-parameter and two-parameter autogenerating inductive negasensors, shown that the negative capacitance and inductance increase the sensitivity of the sensors in 3-5 times, certain coefficients of increase of absolute and relative sensitivity, research of influence of destabilizing factors on the parameters of negasensors.

**Keywords:** sensor, autogenerating sensor, L-negatron

## ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОГЕНЕРАТОРНЫХ ИНДУКТИВНЫХ НЕГАСЕНСОРОВ

М. А. Филинчук, А. А. Лазарев, Л. Б. Лищинская, Д. В. Бондарюк

**Аннотация.** Исследованы схемы однопараметрического и двухпараметрического автогенераторных индуктивных негасенсоров, показано, что наличие отрицательной емкости и индуктивности приводит к повышению чувствительности сенсоров в 3-5 раз, определены коэффициенты увеличения абсолютной и относительной чувствительностей, исследования влияния дестабилизирующих факторов на параметры негасенсоров.

**Ключевые слова:** сенсор, автогенераторного сенсор, L-негатрон

### Вступ

Сучасний стан розвитку автоматизованих систем контролю та управління різноманітними технологічними та фізичними процесами характеризується широким використанням первинних засобів збору та обробки інформації. Сенсори входять до складу будь-якої інформаційно-вимірювальної або керуючої системи і значною мірою визначають її метрологічні характеристики [1,2]. Широкого використання набули багатопараметричні частотні сенсори здатні контролювати декілька параметрів одночасно, наприклад температуру, вологість, наближення об'єкту і т.д. [3,4]. Але недоліком більшості таких сенсорів є низьке значення чутливості та складність схемотехнічної реалізації. Підвищити ефективність сенсора можна за рахунок використання L-негатрона [5] – електронного приладу, що в деякому режимі роботи має від'ємне значення диференційної індуктивності [6]. Широке застосування таких сенсорів обмежується недостатньою глибиною дослідження їх основних параметрів.

### Мета та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження основних характеристик автогенераторних індуктивних негасенсоров на основі L-негатрона.

Для досягнення цієї мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- 1) Обґрунтування схем автогенераторних індуктивних сенсорів на L-негатроні;
- 2) Аналітичне визначення основних параметрів автогенераторних індуктивних сенсорів на L-негатроні;
- 3) Дослідження схем автогенераторних індуктивних сенсорів на L-негатроні.

### Обґрунтування схем автогенераторних індуктивних сенсорів на L-негатроні

Узагальнені високочастотні схеми автогенераторних індуктивних негасенсоров можуть бути представлені у вигляді на рис. 1. Вони складаються з резистора втрат  $R$ , індуктивності первинного вимірювального перетворювача (ПВП)  $L_x$ , для однопараметричного негасенсора, резистора ПВП  $R_x$  та від'ємної індуктивності  $L^{(-)}$ , для двухпараметричного негасенсора.

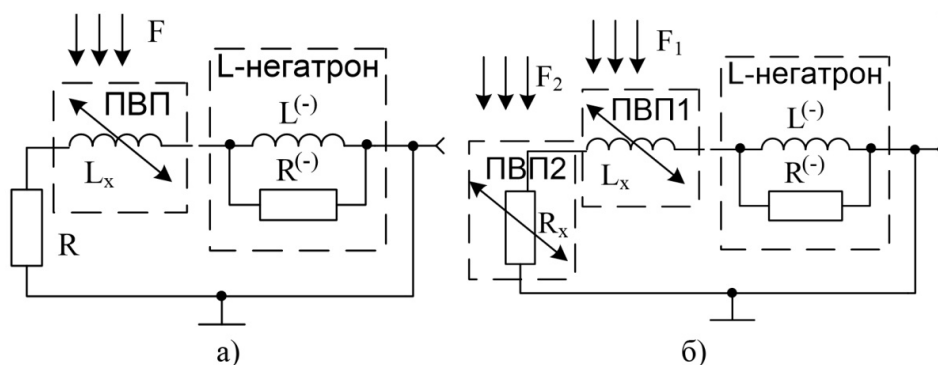


Рис. 1. Узагальнені високочастотні схеми однопараметричного (а) та двопараметричного (б) автогенераторних негасенсоров.

Автогенерація забезпечується від’ємним активним опором  $R^{(-)}$  L-негатрона. Дія інформаційного вимірювального параметра  $F$ , який впливає на параметри індуктивного та резистивного ПВП й призводить до зміни частоти коливань, що генерується: для однопараметричного негасенсора  $f_{ген} = F(L_x)$ ; для двопараметричного негасенсора  $f_{ген} = F(L_x, R_x)$ . Сумарна індуктивність кола рівна  $L_{\Sigma} = L_x + \frac{L^{(-)} \cdot R^{(-)2}}{R^{(-)2} + L^{(-)2}\omega}$ . Якщо  $|R^{(-)}| \gg |\omega L^{(-)}|$ , то

вираз спроститься  $L_{\Sigma} \approx |L_x + L^{(-)}|$ .

Розглянемо принцип роботи схем однопараметричного та двопараметричного автогенераторного індуктивного негасенсора електричні принципи схеми яких представлені на рис. 2 а, б. Частотозадаючим колом індуктивного автогенераторного сенсора є RL-коло, яке у випадку однопараметричного негасенсора складається з індуктивності  $L_x$ , первинного вимірювального перетворювача та активного опору втрат  $R$ , а у випадку двопараметричного – з індуктивності  $L_x$  ПВП1 та активного опору  $R_x$  ПВП2, наприклад фоторезистора. Частотозадаюче RL-коло послідовно з’єднано з схемотехнічним L-негатроном, в якості якого використана схемотехнічна реалізація на операційному підсилювачі LF357. L-негатрон виконаний на інверторі від’ємного опору, резистор  $R2$  та конденсатор  $C1$  утворюють коло позитивного зворотного зв’язку за струмом. Резистори  $R1$  та  $R2$  визначають коефіцієнт інверсії інвертора

$K_i = -R1 \cdot R2$  [7]. В результаті в діапазоні частот (0,325–2,54) МГц схема володіє негативною диференційною індуктивністю.

Вхідний імпеданс схеми L-негатрона визначається виразом [8],

$$Z_{ex} = \frac{R_1(-j(-1+K)R_2 + C\omega)}{jR_2 + C(1+K)\omega} = \text{Re}Z_{ex} + j\text{Im}Z_{ex},$$

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

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

а вихідна індуктивність L-негатрона:

де  $K_0$  – коефіцієнт підсилення схеми на низьких частотах,  $f_1$  – частота одиничного підсилення,  $f$  – робоча частота негасенсора.

Від’ємний активний опір L-негатрона забезпечує амплітудні умови генерації схеми, а частота сигналу на виході негасенсора визначається виразом

$$f = f_0' = \frac{R}{2\pi(L_x + L^{(-)})} \quad (1)$$

При наближенні металевого об’єкта до індуктивного ПВП індуктивність  $L_x$  збільшується, сумарна індуктивність  $|L_x + L^{(-)}|$  зменшується, так як  $L^{(-)} < 0$  і як результат збільшується частота вихідного сигналу. Для двопараметричного індуктивного автогенераторного негасенсора при наявності світлового потоку опір  $R_x$  фоторезистора

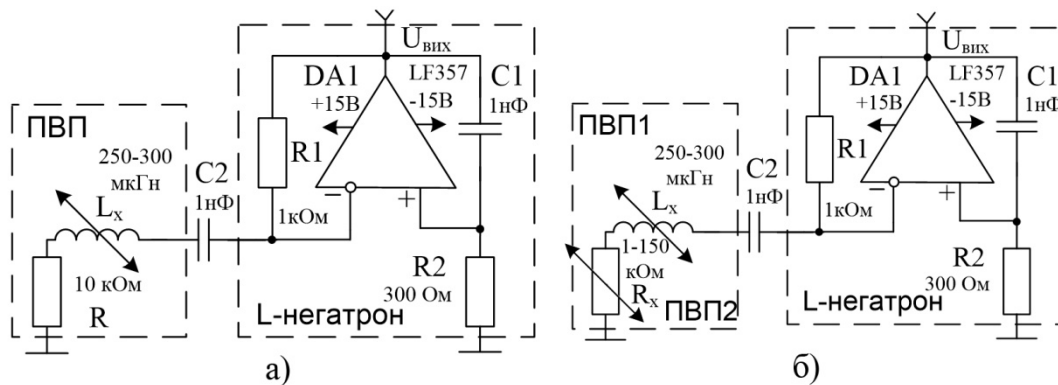


Рис. 2. Електричні принципи схеми однопараметричного (а) та двопараметричного (б) автогенераторних індуктивних негасенсорів.

зменшується і як наслідок частота сигналу зменшується.

**Аналітичне визначення основних параметрів автогенераторних індуктивних сенсорів на L-негатроні**

Включення в схему індуктивного сенсора L-негатрона дозволяє збільшити його чутливість та забезпечує режим автогенерації [8]. Абсолютна та відносна чутливості схеми без L-негатрона визначається виразами [9, 10]:

$$S(f_0, L_x) = -\frac{R}{2\pi L_x^2}; \quad (2)$$

$$S_{L_x}^{f_0} = \frac{df_0}{dL_x} \cdot \frac{L_x}{f_0} = -1. \quad (3)$$

При підключення до індуктивного ПВП L-негатрона, реалізованого на інверторі від'ємного опору, що містить ОП [11] абсолютна та відносна чутливості в даному випадку дорівнюють:

$$S(f_0', L_x) = -\frac{R}{2\pi(L_x + L^{(-)})^2}; \quad (4)$$

$$S_{L_x}^{f_0'} = \frac{df_0'}{dL_x} \cdot \frac{L_x}{f_0'} = \frac{L_x}{L_x + L^{(-)}}. \quad (5)$$

З виразів (4) і (5) видно, що так як  $L_x + L^{(-)} < L_x$ , та  $L^{(-)}$  є від'ємним, то значення відносної чутливості буде складати більше одиниці, і за умови, що  $L_x + L^{(-)} \rightarrow 0$  прямує до нескінченності.

Таким чином виходячи з виразів (2) та (4), а також (3) та (5) визначимо коефіцієнт збільшення абсолютної та відносної чутливості однопараметричного негасенсора на L-негатроні:

$$K_{S1} = \frac{S(f_0, L_x)}{S(f_0', L_x)} = \frac{(L_x + L^{(-)})^2}{L_x^2}; \quad (6)$$

$$K_{S2} = \frac{S_{L_x}^{f_0}}{S_{L_x}^{f_0'}} = -\frac{L_x + L^{(-)}}{L_x}. \quad (7)$$

З (6) та (7) слідує, що збільшення абсолютної та відносної чутливості при введенні L-негатрона відбулося у  $(L_x + L^{(-)})^2 / L_x^2$  та

$-(L_x + L^{(-)}) / L_x$  разів відповідно.

Для двопараметричного автогенераторного індуктивного негасенсора частота автогенерації  $f_0''$  дорівнює:

$$f_0'' = \frac{R_x}{2\pi L_\Sigma} = \frac{R_x}{2\pi(L_x + L^{(-)})}. \quad (8)$$

З (8) видно, що при наближенні металевого об'єкту, значення індуктивності  $L_x$  буде зростати, сумарна індуктивність зменшуватися, а частота генерації збільшуватися. Абсолютна і відносна чутливості по  $L_x$  та  $R_x$  будуть відповідно визначатися:

$$S(f_0'', L_x) = -\frac{R_x}{2\pi(L_x + L^{(-)})^2}; \quad (9)$$

$$S_{L_x}^{f_0''} = \frac{df_0''}{dL_x} \cdot \frac{L_x}{f_0''} = \frac{L_x}{L_x + L^{(-)}}; \quad (10)$$

$$S(f_0'', R_x) = -\frac{1}{2\pi(L_x + L^{(-)})}; \quad (11)$$

$$S_{R_x}^{f_0''} = \frac{df_0''}{dR_x} \cdot \frac{R_x}{f_0''} = 1. \quad (12)$$

З виразів (9–12) слідує, що так як  $L_x + L^{(-)} < L_x$ , та  $L^{(-)}$  є від'ємним, то значення відносної чутливості за індуктивністю буде складати більше одиниці.

Виходячи з виразів (2–3) та (9–12) визначимо коефіцієнт збільшення абсолютної та відносної чутливості двопараметричного негасенсора на L-негатроні:

$$K_{S3} = \frac{S(f_0, L_x)}{S(f_0'', L_x)} = \frac{(L_x + L^{(-)})^2}{L_x^2}; \quad (13)$$

$$K_{S4} = \frac{S_{L_x}^{f_0}}{S_{L_x}^{f_0''}} = -\frac{L_x + L^{(-)}}{L_x}; \quad (14)$$

$$K_{S5} = \frac{S(f_0, R_x)}{S(f_0'', R_x)} = \frac{R_x(L_x + L^{(-)})}{L_x^2}; \quad (15)$$

$$K_{S6} = \frac{S_{R_x}^{f_0}}{S_{R_x}^{f_0''}} = -1. \quad (16)$$

З виразів (13) та (14) слідує, що збільшення абсолютної та відносної чутливості за параметром індуктивності при введенні L-негатрона

відбулося у  $(L_x + L^{(-)})^2 / L_x^2$  та  $-(L_x + L^{(-)}) / L_x$  разів відповідно, а за параметром  $R_x$  відбулося збільшення тільки абсолютної чутливості на величину  $(R_x(L_x + L^{(-)})) / L_x^2$ .

### Дослідження схем автогенераторних індуктивних сенсорів на L-негатроні

Для перевірки коректності математичного апарату та роботи однопараметричного автогенераторного індуктивного негасенсора проведено моделювання схеми в програмному середовищі MicroCap 9.0, створено макет пристрою на операційному підсилювачі LF357 та проведено експериментальні дослідження його параметрів (рис. 3).

При відсутності металевого об'єкта в полі індуктивного ПВП його індуктивність дорівнює 250 мкГн. Часові діаграми сигналу на виході негасенсора наведено на рис. 4.

З графіку на рис. 4,а видно, що на виході схеми відбувається генерація сигналу, період якого становить 2,804 мкс, а відповідно значення частоти буде дорівнювати 357 кГц. За результатами макетних досліджень (рис. 4, б) значення частоти генерації становить 376 кГц. Відносна похибка між результатом теоретичного моделювання та експериментальним дослідженням становить 5,3%.

При внесенні металевого об'єкта в поле ПВП його індуктивність збільшуватиметься до значення 300 мкГн. Часові діаграми сигналу на виході негасенсора наведені на рис. 5.

З отриманої часової діаграми (рис. 5, а) видно, що період вихідного сигналу зменшився і становить 1,922 мкс, відповідно відбулося збільшення частоти до значення 520 кГц. З

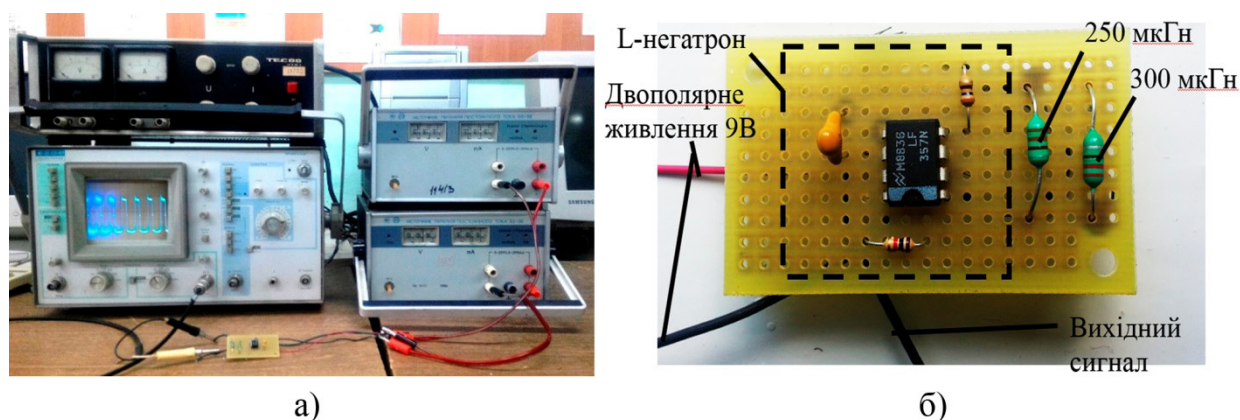


Рис. 3. Експериментальна установки (а) та макетний зразок однопараметричного індуктивного автогенераторного негасенсора.

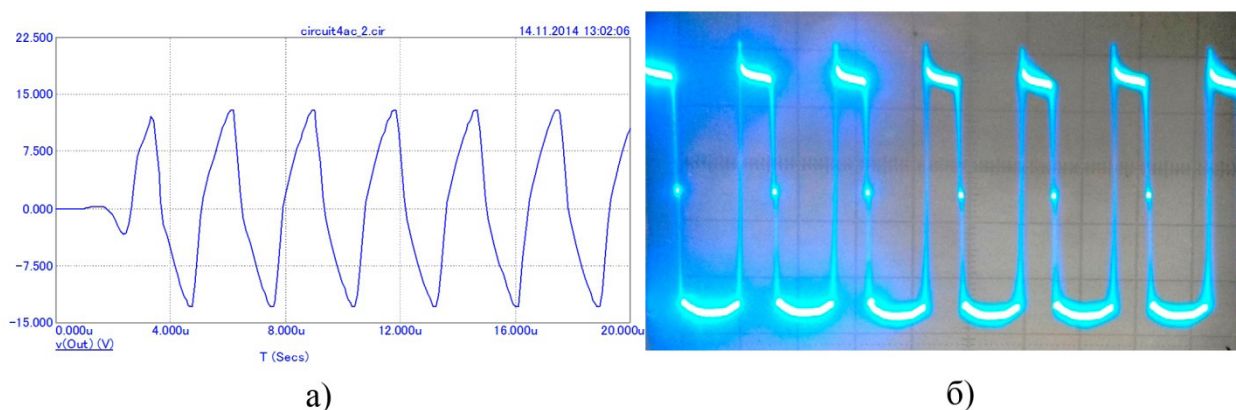


Рис. 4. Розрахункові часові діаграми сигналу на виході схеми в MicroCap 9.0 (а) та експериментальна осцилограма (б) автогенераторного індуктивного негасенсора при значенні індуктивності ПВП 250 мкГн.

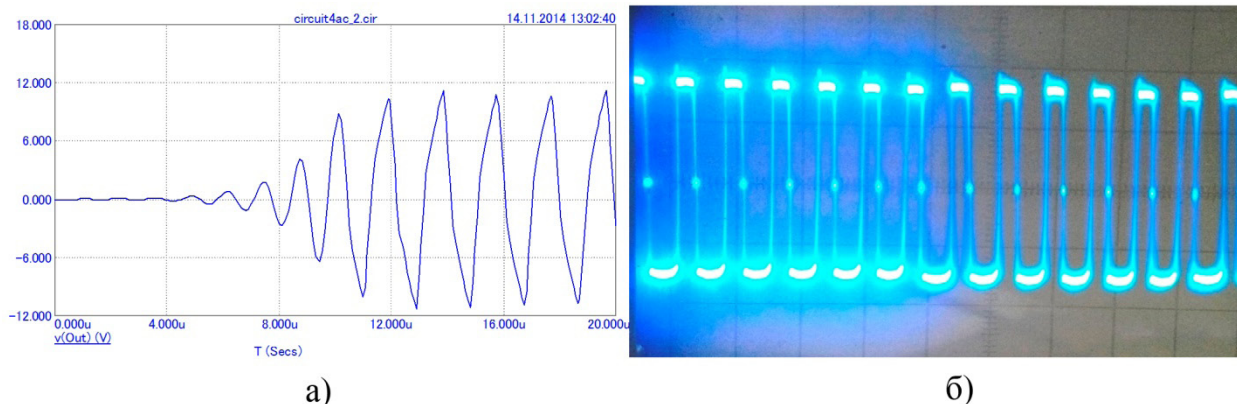


Рис. 5. Розрахункові часові діаграми сигналу на виході схеми в MicroCap 9.0 (а) та експериментальна осцилограма (б) автогенераторного індуктивного негасенсора при значенні індуктивності ПВП 300 мкГн.

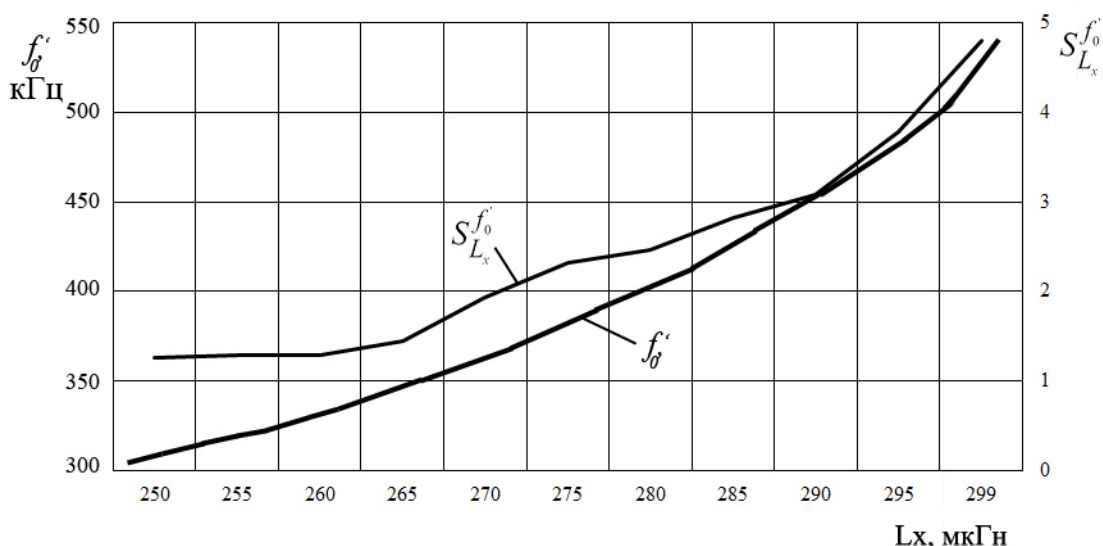


Рис. 6. Графік залежності частоти вихідного сигналу та відносної чутливості від індуктивності ПВП.

осцилограми (рис. 5, б) видно, що значення частоти генерації становить 562 кГц. В цьому випадку відносна похибка становить 8%.

Графік залежності частоти вихідного сигналу та відносної чутливості від індуктивності ПВП наведений на рис. 6

З графіку видно, що зі збільшенням індуктивності ПВП відбувається збільшення вихідної частоти індуктивного сенсора. З графіку видно, що із збільшенням індуктивності ПВП від 250 мкГн до 300 мкГн відбувається збільшення відносної чутливості від 1,2 до 4,9.

Проведено дослідження впливу температури в діапазоні від -40 °С до +60 °С на параметри

сенсорів. Для адекватного температурного моделювання враховані температурні коефіцієнти кожного елемента. Для однопараметричного негасенсора при значенні ідуктивності ПВП 250 мкГн та зміні температури відбувається зміна частоти (354–357) кГц. При значенні індуктивності ПВП 300 мкГн зміна частоти становить (523 –524) кГц. В цих випадках температурні коефіцієнти частоти (ТКЧ) відповідно дорівнюють:  $\alpha_{t_1} = -0,0847 \text{ (кГц/}^\circ\text{C)}$ ,  $\alpha_{t_2} = -0,0191 \text{ (кГц/}^\circ\text{C)}$ . Також проведено дослідження впливу зміни напруги живлення ОП на вихідну частоту негасенсора в діапазоні від  $\pm 10$  до  $\pm 15\text{В}$ .

При значенні індуктивності ПВП 250 мкГн та при зміні напруги живлення від  $\pm 10$  до  $\pm 15$ В відбувається зміна частоти (472,6–466,5) кГц. При значенні індуктивності ПВП 300 мкГн зміна частоти становить (572,6–581,2) кГц. Коефіцієнти які характеризують зміну вихідної частоти генерації негасенсора, при зміні напруги живлення дорівнюють:

$$\alpha_{U_1} = -1,22 \text{ (кГц / В)}, \quad \alpha_{U_2} = -1,72 \text{ (кГц / В)}.$$

Розрахунковим методом визначені значення вихідної потужності  $P_{\text{вих}}$  на навантаження негасенсора 50 Ом при значеннях індуктивності ПВП 250 мкГн та 300 мкГн:

$$P_{\text{вих1}}^{L_x=250} = 0,014 \text{ Вт}, \quad P_{\text{вих2}}^{L_x=300} = 0,0131 \text{ Вт}.$$

В цьому режимі коефіцієнт корисної дії негасенсора дорівнює 51%.

Для перевірки коректності роботи двопараметричного автогенераторного індуктивного негасенсора проведено моделювання в програмному середовищі MicroCap 9.0. Графіки залежностей частоти вихідного сигналу від зміни параметра індуктивного та резистивного ПВП наведені на рис. 7. Залежності відносної чутливості двухпараметричного негасенсора від значення індуктивності ПВП наведено на рис. 8. З рис. 7 слідує, що при відсутності освітленні резистивного ПВП ( $R_x = 1 \text{ кОм}$ ) та відсутності металевго об'єкта в полі індуктивного ПВП ( $L_x = 250 \text{ мкГн}$ ) вихідна частота генерації становить 472 кГц. При наближенні металевго об'єкта до індуктивного ПВП ( $L_x = 300 \text{ мкГн}$ ) відбувається збільшення частоти і її

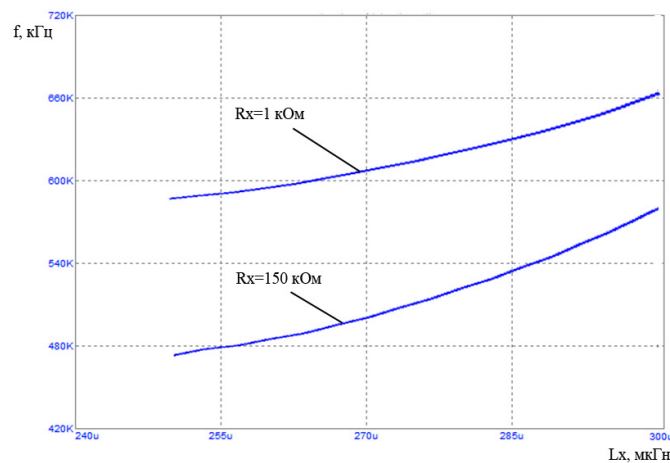


Рис. 7. Залежності частоти вихідного сигналу автогенераторного індуктивного негасенсора від параметрів індуктивного  $L_x$  та резистивного  $R_x$  ПВП.

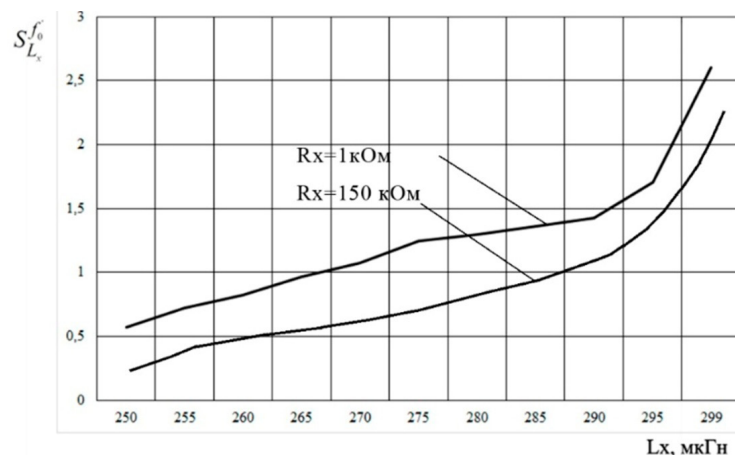


Рис. 8. Залежності відносної чутливості від значення індуктивності  $L_x$  ПВП.

максимальне значення становить 586 кГц. При освітленні фоторезистора ( $R_x=150$  кОм) та відсутності металевго об'єкта в полі індуктивного ПВП вихідна частота генерації дорівнює 597 кГц, при наближенні металевго об'єкта до індуктивного ПВП відбувається зростання частоти до значення 671 кГц. Із збільшенням індуктивності ПВП від 250 мкГн до 300 мкГн відбувається збільшення відносної чутливості при присутності освітлення від 0,25 до 2,28, а при відсутності освітлення від 0,7 до 2,8 (рис. 8). Проведені дослідження впливу температури на частоту двухпараметричного негасенсора в діапазоні від  $-40$  °С до  $+60$  °С показали, що при значенні ідуктивності ПВП 250 мкГн та зміні температури відбувається зміна частоти (571,2–572,4) кГц. При значенні індуктивності ПВП 300 мкГн зміна частоти становить (644,5–651,3) кГц.

При значенні опору фоторезистора 1 кОм та зміні температури відбувається зміна частоти від (580,1–581,6) кГц при значенні опору 150 кОм зміна частоти становить (655,7–659,4) кГц.

Розрахуємо ТКЧ для значень індуктивності 250 мкГн, 300 мкГн та для значень опору фоторезистора 1 кОм, 150 кОм.

$$\alpha_{t_3} = -0,0176 \text{ (кГц/}^\circ\text{C)}, \quad \alpha_{t_4} = -0,0931 \text{ (кГц/}^\circ\text{C)},$$

$$\alpha_{t_5} = -0,061 \text{ (кГц/}^\circ\text{C)}, \quad \alpha_{t_6} = -0,0172 \text{ (кГц/}^\circ\text{C)}.$$

Проведені дослідження впливу зміни напруги живлення ОП на вихідну частоту негасенсора в діапазоні від  $\pm 10$  до  $\pm 15$ В, показали що при значенні індуктивного ПВП 250 мкГн, та резистивного ПВП 1кОм відбувається зміна частоти (485,3–474) кГц, а при значеннях індуктивного ПВП 300 мкГн та резистивного ПВП 150 кОм частота змінюється в межах (663,5–656,5) кГц.

$$\alpha_{U_3} = -2,26 \text{ (кГц/В)}, \quad \alpha_{U_4} = -1,4 \text{ (кГц/В)}.$$

Розрахунковим методом визначено значення вихідної потужності  $P_{\text{вих}}$  на навантаження негасенсора 50 Ом при значеннях індуктивності ПВП 250 мкГн та 300 мкГн і значенні опору фоторезистора 1 кОм та 150

кОм:  $P_{\text{вих}3}^{Lx=250} = 0,0158 \text{ Вт}$ ,  $P_{\text{вих}4}^{Lx=300} = 0,014 \text{ Вт}$ . В цьому режимі коефіцієнт корисної дії негасенсора дорівнює 63%

## Висновки

1) Дослідження однопараметричного та двухпараметричного сенсорів на L-негатроні показали, що в наслідок потенційної нестійкості забезпечується режим автогенерації. Двопараметричний сенсор дозволяє здійснювати одночасний контроль по двом параметрам одночасно, що розширює функціональні можливості його застосування.

2) Використання в сенсорах L-негатрона дозволяє збільшити абсолютну і відносну чутливість по індуктивному параметру відповідно в  $(L_x + L^{(-)})^2 / L_x^2$  та  $-(L_x + L^{(-)}) / L_x$  разів, а по резистивному параметру відповідно у

$R_x(L_x + L^{(-)}) / L_x^2$  разів. Експериментальні дослідження в діапазоні частот показали можливість забезпечити збільшення чутливості однопараметричного сенсора в 5 разів та двухпараметричного в 3 рази в порівнянні з чутливістю пасивного ПВП.

3) Дослідження впливу температури в діапазоні від  $-40$  °С до  $+60$  °С показали, що температурні коефіцієнти частоти змінюються в залежності від величини індуктивності ПВП для однопараметричного сенсора від  $(-0,0874 \dots -0,0191)$  кГц/°С, а для двухпараметричного сенсора при зміні індуктивності ПВП (250...300) мкГн в діапазоні  $(-0,0176 \dots -0,0931)$  кГц/°С, та при зміні опору від 1 кОм до 150 кОм в діапазоні  $(-0,061 \dots -0,0172)$  кГц/°С. ККД обох негасенсорів складає порядка 51%.

## Список використаної літератури

[1]. Winntsy Y. D. Resistive, Tsapatsitive, Indutstive, and Magnetits Sensor Technologies / Y. D. Winntsy – TsRTs. Press. Talor and Frantsis Group, – 2014. – 408 p. – ISBN 978-1439812440.

[2]. Mohan Mathur R. Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems / R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma – Wiley-IEEE Press, – 2002. – 518 p. – ISBN 0-471-20643-1.

[3]. Ershov M. Negative tsapatsitantse effetst in semitsondutstor devices. / M. Ershov, H. Ts. Liu, L. Li, M. Buchanan, Z. R. Wasilewski, Andrew K. Jonscher. – IEEE Transatstions on Eletstron Devitises, – 1998. – #10. – pp. 2196-2206. – DOI: 10.1109/16.725254

[4]. Jatsob Fraden Handbook of Modern



Sensors: Physics, Designs, and Applications / Jatsob Fraden Springer Science & Business Media. – 2010. – 678 p. – ISBN 9781441964663.

[5]. Filynyuk M. A. Chastotni datchyky na L-, C-nehatronakh Filynyuk M. A., Lazaryev O. O., Lobodzins'ka R. F. // Vymiryuval'na ta obchyslyuval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2004. – №1. – S. 84–89.

[6]. Filynyuk N.A. Short historical review of development of scientific branch “negatronics” / N.A. Filynyuk, A.A. Lazarev – AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2014. – Volume 68, Issue 2, – P. 172–177.

[7]. Voytsekhovs'ka O.V. Doslidzhennya skhemotekhnichnoyi realizatsiyi L-nehatroniv na operatsynomu pidlylyuvachi / O.V. Voytsekhovs'ka, O.O. Lazaryev, L.I. Pokotylyuk, R.Yu. Chekhmestruk // Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. – 2012. – №4. s. 68-73.

[8]. Lazaryev O.O. Doslidzhennya vplyvu L-nehatroniv na chutlyvist' ta stiy-kist' induktyvnykh sensoriv / O.O. Lazaryev, M.A. Filynyuk, L.B. Lishchyns'ka, D.V. Bondaryuk // Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. – 2015. – №1(221). s. 140-144.

[9]. Filynyuk M. A. LC-nehatrony ta yikh zastosuvannya: monohrafiya / M.A. Filynyuk, O.O. Lazaryev, O.V. Voytsekhovs'ka – Vinnytsya VNTU, 2012. – 308 s. ISBN 978-966-641-452-9

[10]. Filynyuk M. A. Analiz chutlyvosti elektrychnykh kil z L-, S-nehatronamy / M. A. Filynyuk, O. O. Lazaryev // Visnyk ZhITI. – 2003. – №2. – S. 92-98.

[11]. Filynyuk N.A. Informatsyonnie ustroystva na kombynyrovannikh dynamycheskykh nehatronakh / N.A. Filynyuk, E.V. Voytsekhovskaya, L.B. Lishchynskaya – LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 160 s.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2015 р.