

О. О. Лазарєв¹
 О. В. Войцеховська¹
 С. А. Коцур¹
 Р. П. Паламарчук¹

АВТОГЕНЕРАТОРНІ СЕНСОРИ НА БАЗІ RLC-НЕГАТРОНІВ

¹Вінницький національний технічний університет

У багатьох сферах сучасної діяльності людини широке застосування знаходять різні сенсори, які стають основними елементами, що визначають технічні та економічні характеристики інформаційних систем та систем керування. Тому дослідження сенсорів та покращення їх технічних параметрів є актуальною задачею. Покращити технічні параметри сенсорів можна, використовуючи досягнення сучасного напрямку електроніки — негатроніки. Так, використання RLC-негатронів дає можливість підвищити чутливість та завадозахищеність сенсорів з одночасним спрощенням їх схемотехнічної реалізації.

Розроблено математичні моделі автогенераторних сенсорів на RLC-негатронах. Визначено основні параметри RLC-сенсорів, зокрема резонансну частоту, абсолютну та відносну чутливості, а також визначені необхідні умови для збудження автоколиваний. Отримані аналітичні вирази показали, що значення абсолютної чутливості залежить від значення резонансної частоти, проте як відносна чутливість є частотонезалежною та безрозмірною величиною. Визначено коефіцієнти, які показують, що включення від'ємної ємності та індуктивності приводить до підвищення чутливості автогенераторних сенсорів. Запропоновані схеми автогенераторних сенсорів дозволяють збільшити відносну чутливість сенсорів та покращити точність вимірювання.

Для перевірки адекватності отриманих теоретичних положень проведено схемотехнічне моделювання запропонованих схем частотних автогенераторних сенсорів. Результати досліджень показали, що ці схеми дозволяють збільшити відносну чутливість сенсорів до 10 разів.

Запропоновано схеми генераторних датчиків температури на статичному та динамічному негатронах. Перевагами схем є схемотехнічна простота, висока надійність, малі габарити та вага, мале значення споживаної потужності. Проведене комп'ютерне моделювання показало підвищення чутливості сенсорів в діапазоні температур від -40°C до 50°C .

Ключові слова: автогенераторний сенсор, чутливість, вимірювальний перетворювач, коливальний контур, негатрон, від'ємна індуктивність, від'ємний опір, від'ємна ємність.

Вступ

Автоматизація технологічних процесів, ефективне управління різними агрегатами, машинами, механізмами потребують вимірювання різних фізичних величин. Для цього використовуються різноманітні датчики. Датчики або сенсори є елементами багатьох систем автоматики — з їх допомогою отримують інформацію про параметри контрольованої системи або пристрою [1], [2]. Використання при проектуванні сенсорів останніх досягнень електроніки дозволяє покращити їх технічні характеристики, і, як наслідок, якість та надійність роботи пристроїв автоматики різних технологічних процесів.

Одним з перспективних напрямків електроніки є негатроніка, використання досягнень якої уже сьогодні забезпечило розвиток низки електронних систем. Науковий напрямок «Негатроніка» вперше визначено професором М. А. Філінюком у 1985 р. [3]—[5].

Метою досліджень є покращення технічних характеристик сенсорів за рахунок використання негатронів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:
 – аналіз технічної реалізації генераторів для автогенераторних сенсорів;

- розробка математичних моделей автогенераторних сенсорів на RLC-негатронах;
- розробка та дослідження автогенераторних сенсорів температури.

Аналіз технічної реалізації генераторів для автогенераторних сенсорів

Технічні параметри автогенераторних сенсорів значною мірою визначаються схемою задавального автогенератора. Існує два основних технічних рішення: використання традиційних RC- і LC-генераторів на транзисторах та використання генераторів на базі негатронів (рис. 1) [6].

Класичні RC- і LC-генератори широко і успішно використовуються у діапазоні відносно невисоких частот (до декількох ГГц). Враховуючи, що зі зростанням частоти, ефективність більшості радіочастотних сенсорів дистанційного контролю зростає, перевагу необхідно віддавати схемам побудови генераторів на базі напівпровідникових негатронів [5], які здатні працювати на частотах у декілька десятків ГГц.

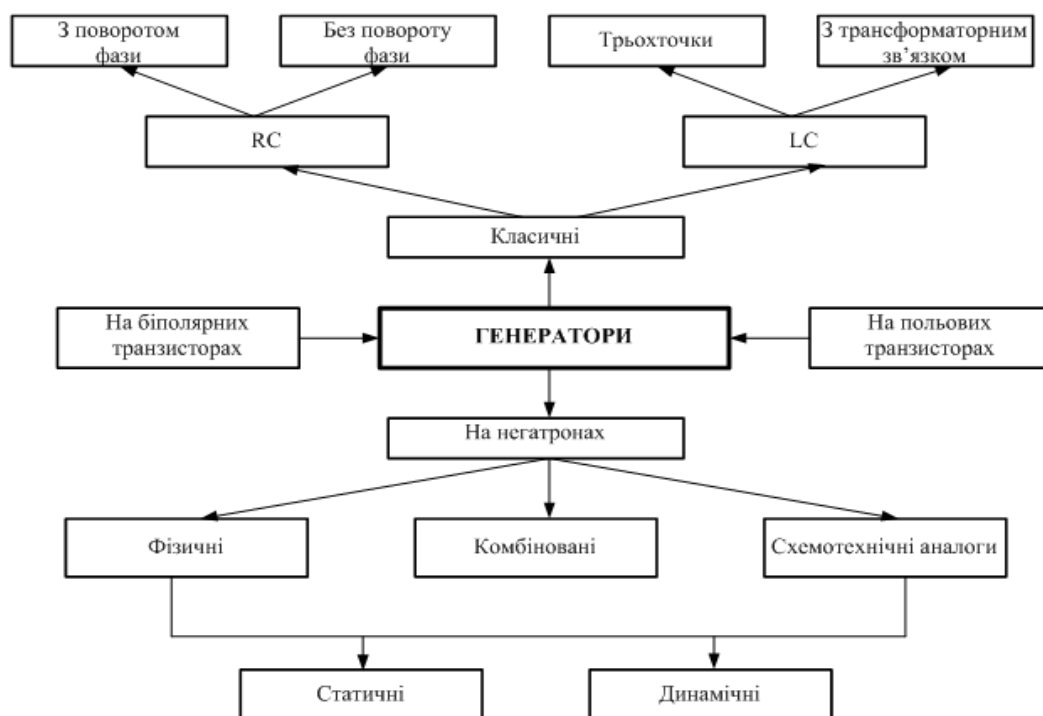


Рис. 1. Класифікація технічної реалізації генераторів для автогенераторних сенсорів

Генератори на базі схмотехнічних аналогів негатронів, внаслідок впливу паразитних перехресних зв'язків знаходять використання на високих частотах і у низькочастотних областях НВЧ діапазону. Генератори на базі фізичних негатронів (тунельних, лавинних, інжекційно-пролітних діодах, діодах Ганна та ін.) мають суттєві обмеження щодо реалізації електричного і механічного підстроювання. Це також обмежує їх використання при реалізації радіочастотних сенсорів дистанційного контролю, але вони мають найвищі граничні частоти генерації [5].

Більшість з вищевказаних недоліків відсутні у комбінованих негатронів [7]. Такі негатрони відносяться до групи динамічних негатронів, що дозволяє для реалізації генераторів використовувати в них негативний зворотний зв'язок за постійним струмом. А це забезпечує підвищення режимної і температурної стабільності, що неможливо реалізувати в генераторах на базі статичних негатронів. Вони знаходять застосування при створенні газових аналізаторів, сенсорів освітлення, індуктивних сенсорів, медичних сенсорів та ін. Новим перспективним напрямком є створення сенсорів фізичних величин на базі LC-негатронів, які забезпечують суттєве збільшення їх чутливості [8].

Розробка математичних моделей автогенераторних сенсорів на RLC-негатронах

Використання RLC-негатронів дозволяє в десятки разів збільшити чутливість аналогових індуктивних та ємнісних сенсорів та забезпечити режим автогенерації.

Широко застосовуються ємнісні та індуктивні частотні сенсори, селективне коло яких — паралельний коливальний контур — містить ємність C_x або індуктивність L_x первинного вимірюва-

льного перетворювача, а також від'ємну ємність або індуктивність, включені в коло послідовно або паралельно. Такі сенсори характеризуються резонансною частотою f_0 , абсолютною $S(f_0, C_x)$ та відносною $S_{C_x}^{f_0}$ чутливостями та коефіцієнтами збільшення абсолютної α та відносної β чутливостей.

Від'ємна ємність може бути реалізована як за рахунок фізичних процесів в напівпровідникових структурах [9], [10], так і схемотехнічно на конверторах від'ємного опору [11]. Наявність від'ємного активного опору $R^{(-)}$, що входить до складу еквівалентної схеми негatronів [7], буде забезпечувати можливість роботи сенсорів в режимі автогенерації коливань, що виключає в даному випадку необхідність використання зовнішнього автогенератора.

Основні параметри автогенераторних ємнісних та індуктивних сенсорів, за умови, що активні опори котушок індуктивності та ємностей є значно меншими за характеристичний опір контуру і ними можна знехтувати, зведені в таблицю.

Основні параметри ємнісних та індуктивних сенсорів

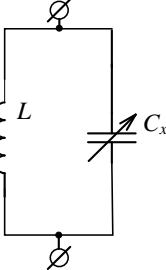
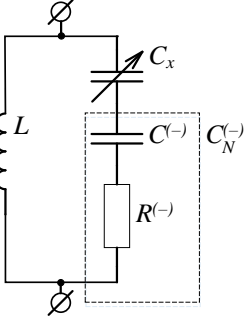
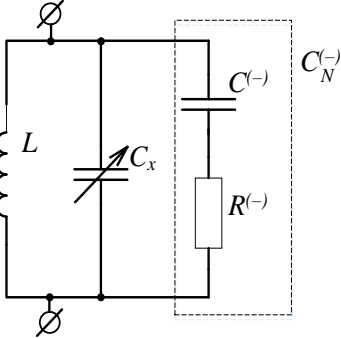
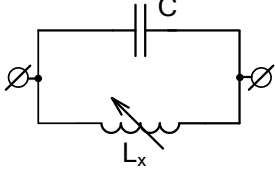
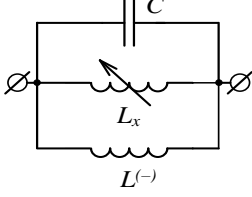
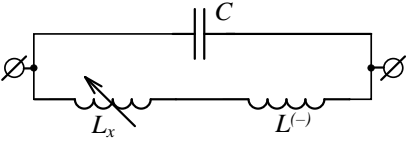
Схема	Основні параметри
Ємнісні сенсори	
 <p>Паралельний коливальний контур частотного ємнісного сенсора</p>	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_x}}; \tag{1}$ $S(\omega_0, C_x) = \frac{d\omega_0}{dC_x} = -\frac{\omega_0}{2C_x}; \tag{2}$ $S_{C_x}^{\omega_0} = \frac{d\omega_0}{dC_x} \frac{C_x}{\omega_0} = -\frac{1}{2} \tag{3}$
 <p>Селективне коло ємнісного сенсора з послідовним включенням С-негатрона</p>	$\omega'_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_{\Sigma_1}}}, \tag{1}$ <p>де $C_{\Sigma_1} = \frac{C_x C^{(-)}}{C_x + C^{(-)}}$;</p> $S(\omega'_0, C_x) = -\frac{1}{2LC_x^2 \omega'_0}; \tag{5}$ $S_{C_x}^{\omega'_0} = -\frac{C^{(-)}}{2(C^{(-)} + C_x)}; \tag{6}$ $\alpha_1 = \frac{S(\omega'_0, C_x)}{S(\omega_0, C_x)} = \frac{C^{(-)} \omega'_0}{(C^{(-)} + C_x) \omega_0}; \tag{7}$ $\beta_1 = \frac{S_{C_x}^{\omega'_0}}{S_{C_x}^{\omega_0}} = \frac{C^{(-)}}{C^{(-)} + C_x} \tag{8}$
 <p>Селективне коло ємнісного сенсора з паралельним включенням С-негатрона</p>	$\omega''_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_{\Sigma_2}}}, \tag{9}$ <p>де $C_{\Sigma_2} = C_x + C^{(-)}$,</p> $S(\omega''_0, C_x) = \frac{\omega''_0}{2(C^{(-)} + C_x)}; \tag{10}$ $S_{C_x}^{\omega''_0} = -\frac{C_x}{2(C^{(-)} + C_x)}; \tag{11}$ $\alpha_2 = \frac{S(\omega''_0, C_x)}{S(\omega_0, C_x)} = \frac{C_x \omega''_0}{(C^{(-)} + C_x) \omega_0}; \tag{12}$ $\beta_2 = \frac{S_{C_x}^{\omega''_0}}{S_{C_x}^{\omega_0}} = \frac{C_x}{C^{(-)} + C_x} \tag{13}$

Схема	Основні параметри
Індуктивні сенсори	
 <p data-bbox="295 510 769 562">Паралельний коливальний контур частотно індуктивного сенсора</p>	$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_x C}}; \quad (14)$ $S(\omega_0, L_x) = \frac{d\omega_0}{dL_x} = -\frac{\omega_0}{2L_x}; \quad (15)$ $S_{L_x}^{\omega_0} = \frac{d\omega_0}{dL_x} \frac{L_x}{\omega_0} = -\frac{1}{2} \quad (16)$
 <p data-bbox="322 824 742 875">Селективне коло індуктивного сенсора з паралельним включенням L-негатрона</p>	$\omega'_0 = 2\pi f'_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\Sigma 1} C}}, \quad (17)$ <p data-bbox="849 651 1029 712">де $L_{\Sigma 1} = \frac{L_x L^{(-)}}{L_x + L^{(-)}}$;</p> $S(\omega'_0, L_x) = -\frac{1}{2CL_x \omega'_0}; \quad (18)$ $S_{L_x}^{\omega'_0} = -\frac{L^{(-)}}{2(L^{(-)} + L_x)} \quad (19)$
 <p data-bbox="322 1115 742 1167">Селективне коло індуктивного сенсора з послідовним включенням L-негатрона</p>	$\omega''_0 = 2\pi f''_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\Sigma 2} C}}, \quad (20)$ <p data-bbox="849 987 1029 1025">де $L_{\Sigma 2} = L_x + L^{(-)}$,</p> $S(\omega''_0, L_x) = -\frac{\omega''_0}{2(L_x + L^{(-)})}, \quad (21)$ $S_{L_x}^{\omega''_0} = -\frac{L_x}{2(L^{(-)} + L_x)} \quad (22)$

Аналіз наведених формул (див. табл.) показав, що для ємнісних сенсорів з послідовним включенням С-негатрона в контурі можливий резонанс тільки за умови, якщо $C_{\Sigma 1} > 0$, тобто коли $|C^{(-)}| > C_x$. Коефіцієнти підвищення чутливості $\alpha_1 > 1$, $\beta_1 > 1$, якщо $|C^{(-)}| > C_x$. Для схеми коливального контуру з паралельним включенням С-негатрона в контурі можливий резонанс, якщо $C_{\Sigma 2} > 0$, тобто якщо $|C^{(-)}| < C_x$, а коефіцієнти підвищення чутливості $\alpha_2 > 1$, $\beta_2 > 1$ якщо $|C^{(-)}| > \frac{C_x}{2}$.

При цьому слід зазначити, що послідовне включення С-негатрона має низку переваг порівняно з паралельним включенням: по-перше, дозволяє збільшити відносну чутливість сенсора в більшу кількість разів, так як $\beta_1/\beta_2 > 1$ за умови, що значення C_x та $\Delta = |C^{(-)} + C_x|$ в обох випадках однакові; по-друге, напруга на виході такого сенсора буде більша, внаслідок резонансу напруг, що покращує заводозахищеність сенсора.

Для індуктивних сенсорів з паралельним включенням L-негатрона в контурі можливий резонанс тільки за умови, якщо $L_{\Sigma 1} > 0$, тобто коли $|L^{(-)}| > L_x$ та збільшується чутливість, якщо $|L^{(-)}| > L_x$. Для схеми коливального контуру з послідовним включенням L-негатрона в контурі можливий резонанс, якщо $L_{\Sigma 2} > 0$, тобто $|L^{(-)}| < L_x$, а чутливість підвищується, якщо $|C^{(-)}| > \frac{C_x}{2}$.

Отже, введення негатронів в селективне коло сенсорів підвищує чутливість та сприяє покращення точності вимірювань.

Розробка та дослідження автогенераторних сенсорів температури

Генераторний сенсор температури з частотним виходом на R-негатроні S-типу

Запропоновано генераторний сенсор температури, що реалізований на генераторі релаксаційних коливань на R-негатроні S-типу. Як R-негатрон можна використовувати наприклад, динистор або його схемотехнічний аналог. Автоколивання в схемі виникають лише тоді, коли положення рівноваги є нестійким. Це буде тоді, коли єдина точка рівноваги знаходиться на спадній ділянці ВАХ R-негатрона. Схема генераторного сенсора температури показана на рис. 2а. В схемі використовується термістор NTC C620 з номінальним опором 22 кОм при температурі 25 °С та допуском 5 %. Температурний коефіцієнт опору — 3 %/К. Коефіцієнт $B = 3300$ К.

Зі зміною температури буде змінюватися опір терморезистора, що зумовить зміни частоти сигналу на виході. Графік залежності частоти сигналу на виході автогенераторного сенсора від температури показано на рис. 2б.

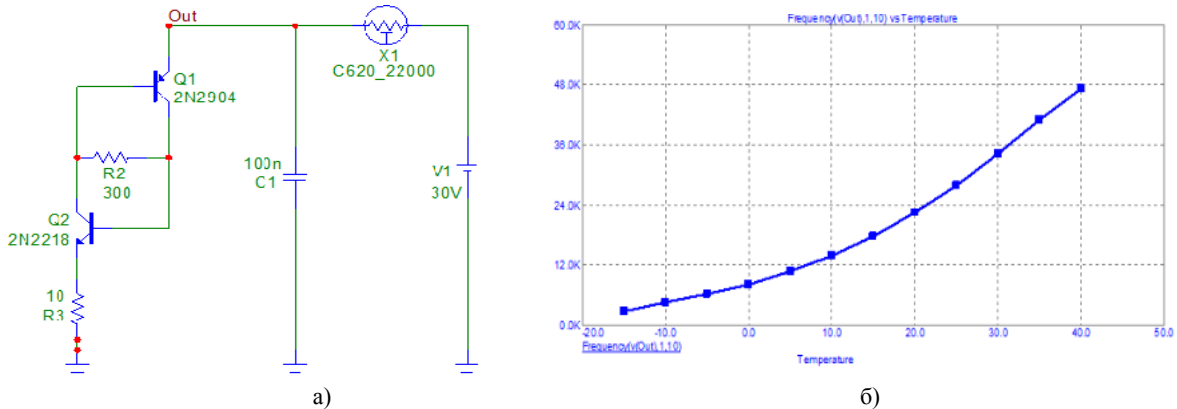


Рис. 2: а — схема генераторного сенсора температури на R-негатроні S-типу;
б — залежність частоти сигналу на виході сенсора від температури

З отриманого графіка випливає, що за температури -15 °С частота сигналу на виході становить 2,76 кГц. За температури 40 °С частота сигналу на виході становить 47,2 кГц. Середнє значення крутизни перетворення складає 0,808 кГц/°С. Таким чином, використовуючи всього три елементи: динистор (або інший R-негатрон S-типу), конденсатор та терморезистор, можна реалізувати високочутливий сенсор температури з частотним виходом, малими розмірами та масою, малим значенням споживаної потужності. Замість резистора R3 можна використовувати корисне навантаження, що забезпечить автоматичну температурну регуляцію цільового параметра (наприклад, швидкість обертання вентилятора в системі охолодження).

Генераторний сенсор температури на динамічному R-негатроні на польовому транзисторі

В основі генераторного сенсора температури (рис. 3а) лежить динамічний транзисторний негатрон на польовому транзисторі, еквівалентну схему якого на робочій частоті можна представити у вигляді послідовного з'єднання індуктивності та від'ємного активного опору [3], наявність якого дозволяє реалізувати автогенераторний режим роботи.

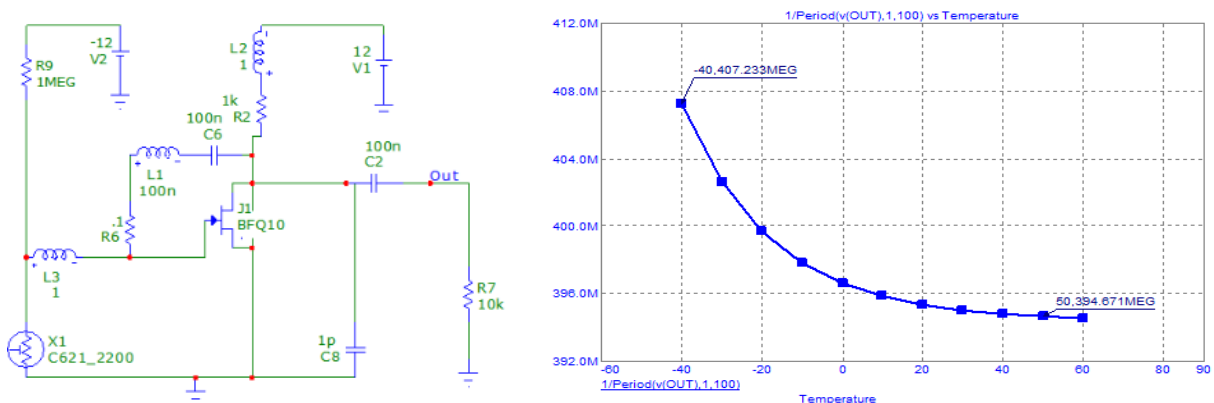


Рис. 3: а — генераторний сенсор температури на динамічному негатроні;
б — залежність його частоти від температури

Зі зміною температури змінюється опір терморезистора, що зумовлює зміну напруги зміщення на затворі польового транзистора, що в свою чергу змінює значення еквівалентної індуктивності, яка реалізується динамічним негатроном. Еквівалентна індуктивність динамічного негатрона разом з ємністю С8 утворюють коливальний контур, який визначає частоту сигналу на виході. Отже, зміна температури приводить до зміни частоти сигналу на виході (рис. 3б).

З графіків видно, що за температури -40°C частота сигналу на виході становить 407,23 МГц, а за температури 50°C частота сигналу на виході — 394,67 МГц. Середнє значення крутизни перетворення складає $-126,7$ кГц/ $^{\circ}\text{C}$.

Висновки

1. Досліджено схеми селективних кіл індуктивних та ємнісних частотних сенсорів на RLC-негатронах. Визначені основні параметри таких сенсорів, зокрема резонансна частота, абсолютна та відносна чутливості. Показано, що використання від'ємних індуктивностей та ємностей дозволяє до 10 разів збільшити чутливість частотних сенсорів у порівнянні до прототипів (схем без негатронів).

2. Запропоновано схеми автогенераторних високочутливих сенсорів температури з частотним виходом. Проведене моделювання показало, що для схеми на статичному негатроні за температури -15°C частота сигналу на виході становить 2,76 кГц. За температури 40°C частота сигналу на виході становить 47,2 кГц. Середнє значення крутизни перетворення складає 0,808 кГц/ $^{\circ}\text{C}$. Для схеми на динамічному негатроні за температури -40°C частота сигналу на виході 407,23 МГц. За температури 50°C частота сигналу на виході 394,67 МГц. Середнє значення крутизни перетворення складає $-126,7$ кГц/ $^{\circ}\text{C}$.

Перевагами схем є схемотехнічна простота, висока надійність, малі габарити та вага, мале значення споживаної потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Г. Виглеб, *Датчики*. Москва: Мир, 1989, 196 с.
- [2] Э. И. Арш, *Автогенераторные методы и средства измерений*. Москва: Машиностроение, 1979, 256 с.
- [3] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, *Активні УВЧ і НВЧ фільтри*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010, 396 с.
- [4] М. А. Філінюк, *Основи негатроніки*, том I. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006.
- [5] М. А. Філінюк, *Основи негатроніки*, том II. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006.
- [6] А. М. Пашаев, Ф. Д. Касимов, О. Н. Негоденко, и Н. А. Филинюк, *Физико-технологические и схемотехнические основы негатроники*. Баку, Азербайджан: Элм, 2008, 433 с.
- [7] Н. А. Филинюк, Е. В. Войцеховская, и Л. Б. Лишинская, *Информационные устройства на комбинированных динамических негатронах*. Saarbrucken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, 2013.
- [8] М. А. Філінюк, О. О. Лазарев, та О. В. Войцеховська, *LC-негатрони та їх застосування*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012, 308 с.
- [9] T. Srimani, et. al., "Negative capacitance carbon nanotube FETs," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 39, no. 2, pp. 304-307, 2018.
- [10] S. C. Chang, et al, "Physical origin of transient negative capacitance in a ferroelectric capacitor," *Physical Review Applied*, vol. 9, no. 1, pp. 14-18, 2018.
- [11] A. N. Beal, J. N. Blakely, N. Corron "Extended-Bandwidth Negative Impedance Converters by Nested Networks," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 65, no. 9, pp. 1134-1138, 2018.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем і телебачення ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 28.05.2019

Лазарев Олександр Олександрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроніки та наносистем, e-mail: lazarev.vntu@gmail.com ;

Войцеховська Олена Валеріївна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри телекомунікаційних, e-mail: vojcehovska.o.v@vntu.edu.ua ;

Коцур Сергій Антонович — провідний інженер центру комп'ютерних технологій, e-mail: Santas2767@gmail.com ;

Паламарчук Роман Петрович — студент факультету інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем, e-mail: rporskiy@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. O. Lazariiev¹
O. V. Voitsekhovska¹
S. A. Kotsur¹
R. P. Palamarchuk¹

Self-oscillation Sensors Based on RLC-negatrons

¹Vinnitsia National Technical University

Various sensors are more and more frequently used in all areas of modern human activity. They become the main elements that determine the technical and economic characteristics of information and control systems. Therefore, the researching sensors and improving their technical parameters is an actuality task. In many cases, it is possible to improve the technical parameters of the sensors, using the achievements of the modern direction of electronics, such as negatronics. Thus, using of RLC-negatrons allows increasing the sensitivity and noise immunity of sensors while simplifying their circuit design.

The mathematical models of self-oscillation sensors on RLC-negatrons are developed. The basic parameters of RLC sensors, in particular resonant frequency, absolute and relative sensitivity, are determined, and the necessary conditions for excitation of self-oscillations are determined. The obtained analytical expressions have shown that the value of absolute sensitivity depends on the value of the resonance frequency; however, the relative sensitivity is frequency independent and dimensionless. There have been determined the coefficients that show that the inclusion of negative capacitance and inductance leads to increased sensitivity of auto-generator sensors. The proposed circuits of auto-generator sensors allow increasing the relative sensitivity of the sensors and improve the accuracy of the measurement.

In order to verify the adequacy of the obtained theoretical positions, a schematic design of the proposed circuits of frequency auto-generator sensors was carried out. The obtained results showed that those circuits allow increasing the relative sensitivity of sensors up to 10 times.

The circuits of auto-generator temperature sensors on static and dynamic negatrons are proposed. The advantages of the circuits are circuitry simplicity, high reliability, small dimensions and weight, low power consumption. The conducted computer simulation showed sensitivity increase in the temperature range from -40°C to 50°C .

Keywords: self-oscillation sensor, sensitivity, measuring transducer, oscillatory circuit, negatron, negative inductance, negative resistance, negative capacitance.

Lazariiev Oleksandr O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electronics and Nanosystems, e-mail: alexander.lazarev.vntu@gmail.com ;

Voitsekhovska Olena V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Telecommunication Systems and Television; e-mail: vojcehovska.o.v@vntu.edu.ua ;

Kotsur Serhii A. — Leading Engineer of Computer Technology Center, e-mail: Santas2767@gmail.com ;

Palamarchuk Roman P. — Student of the Department of Information Communications, Radio Electronics and Nanosystems, e-mail: rporitskiy@gmail.com

А. А. Лазарев¹
Е. В. Войцеховская¹
С. А. Коцур¹
Р. П. Паламарчук¹

Автогенераторные сенсоры на основе RLC-негатронов

¹Винницкий национальный технический университет

Во многих сферах современной деятельности человека широкое применение находят разные сенсоры, которые становятся основными элементами, определяющими технические и экономические характеристики информационных систем и систем управления. Поэтому, исследования сенсоров и улучшение их технических параметров является актуальной задачей. Улучшить технические параметры сенсоров можно, используя достижения современного направления электроники — негatronики. Так, использование RLC-негатронов позволяет повысить чувствительность и помехозащищенность сенсоров при одновременном упрощении их схемотехнической реализации.

Разработаны математические модели автогенераторных сенсоров на RLC-негатронах. Определены основные параметры RLC-сенсоров, в частности резонансная частота, абсолютная и относительная чувствительности, а также определены необходимые условия для возбуждения автоколебаний. Полученные аналитические выражения показали, что значение абсолютной чувствительности зависит от значения резонансной частоты, однако относительная чувствительность является частотнонезависимой и безразмерной величиной. Определены коэффициенты, показывающие, что включение отрицательной емкости и индуктивности приводит к повышению чувствительности автогенераторных сенсоров. Предложенные схемы автогенераторных сенсоров позволяют увеличить относительную чувствительность сенсоров и улучшить точность измерения.

Для проверки адекватности полученных теоретических положений было проведено схемотехническое моделирование предложенных схем частотных автогенераторных сенсоров. Полученные результаты показали, что данные схемы позволяют увеличить относительную чувствительность сенсоров до 10 раз.

Предложены схемы генераторных датчиков температуры на статическом и динамическом негатронах. Преимуществами схем являются схемотехническая простота, высокая надежность, малые габариты и вес, малое значение потребляемой мощности. Проведенное компьютерное моделирование показало повышение чувствительности сенсоров в диапазоне температур от -40°C до 50°C .

Ключевые слова: автогенераторные сенсоры, чувствительность, измерительный преобразователь, колебательный контур, негатрон, отрицательная индуктивность, отрицательное сопротивление, отрицательная емкость.

Лазарев Александр Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроники и наносистем, e-mail: alexander.lazarev.vntu@gmail.com ;

Войцеховская Елена Валериевна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: vojcehovska.o.v@vntu.edu.ua ;

Коцур Сергей Анатольевич — ведущий инженер центра компьютерных технологий, e-mail: Santas2767@gmail.com ;

Паламарчук Роман Петрович — студент факультета инфокоммуникаций, радиоэлектроники и наносистем, e-mail: rporitskiy@gmail.com