

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

PHYSICAL SENSORS

УДК 621.374

ІНДУКТИВНО–РЕЗИСТИВНИЙ ГЕНЕРАТОРНИЙ ДАТЧИК

Л. Б. Ліщинська¹, Я. С. Рожкова², М. А. Філінюк³

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

¹L_Fil1@mail.ru, ²Rozhkova.yana@gmail.com, ³N_Fil_45@mail.ru

ІНДУКТИВНО-РЕЗИСТИВНИЙ ГЕНЕРАТОРНИЙ ДАТЧИК

Л. Б. Ліщинська, Я. С. Рожкова, М. А. Філінюк

Анотація. В статті розроблено математичну модель двохпараметричного індуктивно-резистивного генераторного датчика, досліджено його основні параметри в залежності від параметрів компонентів. На основі проведених досліджень визначено оптимальні значення параметрів, що забезпечують максимальну чутливість пристрою.

Ключові слова: Іммітанс, узагальнений перетворювач імітансу (УПІ), польовий транзистор, датчик

INDUCTIVELY-RESISTIVE GENERATOR SENSOR

L.B. Lishchinskaya, Y.S. Rozhkova, M.A. Filinyuk

Abstract. In this article, a mathematical model of a two-parameter inductively-resistive generating sensor, its basic parameters and the parameters of components in a certain range of frequencies were investigated. The results of the research gave an opportunity to find optimal values parameters, which help to make functionality of the sensor the most effective.

Keywords: Immitance, generalized immitance convertor (GCI), field transistor, sensor

ИНДУКТИВНО-РЕЗИСТИВНЫЙ ГЕНЕРАТОРНИЙ ДАТЧИК

Л. Б. Лищинская, Я. С. Рожкова, Н. А. Филинук

Аннотация. В статье разработана математическая модель двухпараметрического индуктивно-резистивного генераторного датчика, исследованы его основные параметры в зависимости от параметров компонентов. На основе проведённых исследований определены оптимальные значения параметров, которые обеспечивают максимальную чувствительность прибора.

Ключевые слова: Иммитанс, обобщённый преобразователь иммитанса (ОПИ), полевой транзистор, датчик

Вступ

Серед сучасних електричних первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) найбільш широку групу утворюють іммітансні ПВП, вихідний параметр яких залежить від зміни RLC-параметра, що змінюється під впливом фізичної величини F [1, 2]. Комбінація таких ПВП з активними пристроями дозволяє створювати генераторні датчики, що спрощують перетворення вимірюваного аналогового параметра в цифровий сигнал, а також вирішувати питання безпровідної передачі сигналу датчика на відстань [3]. Комбінуючи такі іммітансні ПВП з багатопараметричними однокристальними перетворювачами іммітансу на базі транзисторів можливе вирішення задачі багатофункціональності [4], коли вихідний сигнал залежить від декількох фізичних величин. Такі датчики є особливо ефективними в системах контролю. А також при реалізації так званих «інтелектуальних» датчиків [5], що мають декілька ПВП, коли вихідний сигнал визначається величиною фізичного впливу на один з ПВП, а другий ПВП реагує на вплив параметра, що «заважає» (наприклад, температура), забезпечуючи автоматичну корекцію вихідного сигналу.

Мета та задачі роботи

Метою роботи є розширення функціональних можливостей і покращення метрологічних характеристик іммітансних генераторних датчиків за рахунок використання для їх реалізації багатопараметричного узагальненого перетворювача іммітансу (УПІ) [6].

Для досягнення цієї мети в роботі вирішуються задачі розробки математичної моделі індуктивно-резистивного генераторного датчика на основі двохпараметричного УПІ на базі польового транзистора, дослідження його чутливості і стабільності в діапазонах частот, температур і перетворюваних іммітансів для оптимізації їх значень.

$$Y_{\text{вих}} = \frac{GR_i + j\Omega_s \xi (1 + s_0 (R_1 + \omega L_i))}{R_i (1 + R_1 (s_0 + G)) + jR_1 \Omega_s (1 + R_i s_0) + j\omega L_i \Omega_s (s_0 \xi R_1 + 1)} \quad (4)$$

та його еквівалентної індуктивності:

$$L_{\text{вих}} = \frac{1}{\omega \text{Im}(Y_{\text{вих}})} = \frac{R_i [R_1 (G + s_0) [R_1 (G + s_0) + 2] + 1] - L_1 \Omega_s [\xi s_0 (R_1 s_0 - 1) + G]}{\omega \Omega_s [[R_1 (s_0 + G) + 1] (s_0 R_1 + 1)] \xi + GR_1 (R_i s_0 - 1)} \quad (5)$$

З урахуванням підключення до виходу схеми резонуючої ємності $C_{\text{ен}}$ одержуємо вираз для функції перетворення, що визначає залежність частоти генерації схеми від параметрів ПВП:

Розробка математичної моделі

В основі індуктивно-резистивного генераторного датчика лежить двохпараметричний УПІ, узагальнена високочастотна схема якого представлена на рис. 1.

Його вихідна перетворена провідність $Y_{\text{вих}}$ залежить від перетворюваних імпедансів Z_1, Z_2 та параметрів матриці провідності ПТ ($y_{11}, y_{12}, y_{21}, y_{22}$), що використовується в якості УПІ [7]:

$$Y_{\text{вих}} = Y_{22} - \frac{Y_{12} \cdot Y_{21}}{Y_{11} + 1/Z_1}, \quad (1)$$

$$\text{де: } [Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{11} + Z_2 \Delta y}{1 + Z_2 \sum y} & \frac{y_{12} - Z_2 \Delta y}{1 + Z_2 \sum y} \\ \frac{y_{21} - Z_2 \Delta y}{1 + Z_2 \sum y} & \frac{y_{22} + Z_2 \Delta y}{1 + Z_2 \sum y} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\sum y = y_{11} + y_{12} + y_{21} + y_{22}; \quad \Delta y = y_{11} y_{22} - y_{21} y_{12}.$$

Використовуючи Т-подібну фізичну еквівалентну схему ПТ [8] в діапазоні частот, де $\Omega_s^2 \ll 1$ та можна знехтувати паразитними елементами корпусу та виводів, а також застосовуючи однополіусну апроксимацію для частотної залежності крутизни ПТ, знаходимо матрицю провідності ПТ:

$$[y_a] = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_s^2}{R_i} + j \frac{\Omega_s}{R_i} & -j \frac{\Omega_s \xi}{R_i} \\ s_0 - j \Omega_s s_0 & G + j \frac{\Omega_s \xi}{R_i} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де: $\Omega_s = \omega/\omega_s$; $\omega_s = 1/R_i C_{3b}$; R_i – диференціальний опір між затвором та витком; $\xi = C_{3b}/C_{3c}$; C_{3b} та C_{3c} – ємність затвор-виток та затвор-стік, відповідно; $s = s_0/(1 + j\Omega_s)$, s_0 , – низькочастотне значення крутизни ПТ.

Підставляючи (3) в (1), з урахуванням (2), за умови, що $Z_1 = j\omega L_1$ та $Z_2 = R_1$, отримуємо аналітичні вирази для вихідної провідності двохпараметричного УПІ

$$f_{\text{ген}} = \frac{\text{Im}(Y_{\text{вих}})}{2\pi C_{\text{ген}}} = \frac{\Omega_s \left[\left[R_1 (s_0 + G) + 1 \right] (s_0 R_1 + 1) \right] \xi + G R_1 (R_i s_0 - 1)}{2\pi R_i C_{\text{ген}} \left[R_1 (G + s_0) \left[R_1 (G + s_0) + 2 \right] + 1 \right] - L_1 \Omega_s \left[\xi s_0 (R_i s_0 - 1) + G \right]}. \quad (6)$$

Використовуючи (6) знаходимо коефіцієнти перетворення ПВП по активній

$$F_R = \frac{\text{Im}(Y_{\text{вих}})}{2\pi C_{\text{ген}} R_1} = \frac{\Omega_s \left[\left[R_1 (s_0 + G) + 1 \right] (s_0 R_1 + 1) \right] \xi + G R_1 (R_i s_0 - 1)}{2\pi R_i C_{\text{ген}} R_1 \left[R_1 (G + s_0) \left[R_1 (G + s_0) + 2 \right] + 1 \right] - L_1 \Omega_s \left[\xi s_0 (R_i s_0 - 1) + G \right]} \quad (7)$$

та індуктивній складовим

$$F_L = \frac{\text{Im}(Y_{\text{вих}})}{2\pi C_{\text{ген}} L_1} = \frac{\Omega_s \left[\left[R_1 (s_0 + G) + 1 \right] (s_0 R_1 + 1) \right] \xi + G R_1 (R_i s_0 - 1)}{2\pi R_i C_{\text{ген}} L_1 \left[R_1 (G + s_0) \left[R_1 (G + s_0) + 2 \right] + 1 \right] - L_1 \Omega_s \left[\xi s_0 (R_i s_0 - 1) + G \right]}. \quad (8)$$

Чутливості датчика по цим складовим з урахуванням (6), будуть рівними:

$$S_L = \frac{\Omega_s^2 \left[G + s_0 \xi (R_i s_0 - 1) \right] \left[\xi (R_i s_0 + 1) \left[R_1 (s_0 + G) + 1 \right] + G R_1 (R_i s_0 - 1) \right]}{\left[L_1 \Omega_s \left[\xi s_0 (R_i s_0 - 1) + G \right] - 2\pi C_{\text{ген}} R_i \left[R_1 (s_0 + G) \left[R_1 (s_0 + G) + 2 \right] + 1 \right] \right]^2}, \quad (9)$$

$$S_R = \frac{\Omega_s \left[L_1 s_0^2 \Omega_s \xi - 2\pi C_{\text{ген}} R_i \left[R_1 (s_0 + G) + 1 \right] 2(s_0 + G) \left[G R_1 (R_i s_0 - 1) + \xi (R_i s_0 + 1) \right] \right]}{\left[L_1 \Omega_s \left[G + \xi s_0 (R_i s_0 - 1) \right] - 2\pi C_{\text{ген}} R_i \left[R_1 (s_0 + G) \left[R_1 (s_0 + G) + 2 \right] + 1 \right] \right]^2} - \frac{\Omega_s \left[G (R_i s_0 - 1) + \xi \left[2s_0 \left[R_1 (s_0 + G) + 1 \right] + G \right] \right]}{L_1 \Omega_s \left[G + \xi s_0 (R_i s_0 - 1) \right] - 2\pi C_{\text{ген}} R_i \left[R_1 (s_0 + G) \left[R_1 (s_0 + G) + 2 \right] + 1 \right]}. \quad (10)$$

Система рівнянь (4–10) утворюють математичну модель індуктивно-резистивного генераторного датчика на базі УПІ з польовим транзистором, включеним за схемою зі спільним витоком і описує взаємозв'язок параметрів фізичної еквівалентної схеми УПІ з параметрами датчика.

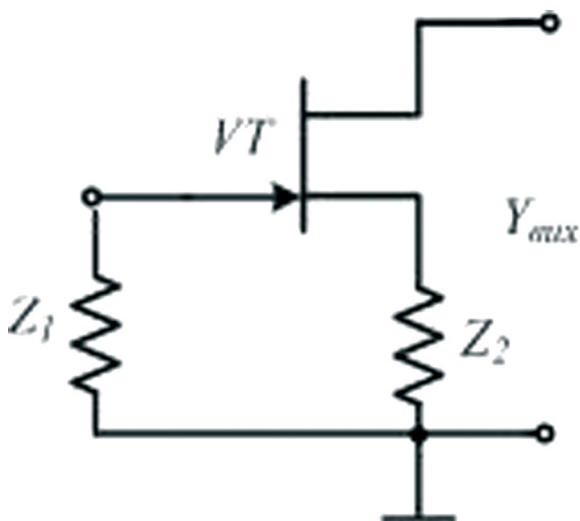


Рис. 1. Високочастотна схема двохпараметричного УПІ на основі ПТ

Результати дослідження

На рис. 2 зображено електрична принципова схема двохпараметричного індуктивно-резистивного генераторного датчика [9]. Польовий транзистор *VT1* працює в режимі багатопараметричного конвертора імітансу та перетворює опір індуктивного *LI* та резистивного *RI* первинних вимірювальних перетворювачів в індуктивний вихідний опір УПІ з від'ємною активною складовою. Вихідна індуктивність резонує з ємністю конденсатора *C3*, забезпечуючи баланс фаз. Від'ємний активний вихідний опір компенсує активні втрати та забезпечує баланс амплітуд, що призводить до генерації схеми на частоті $f_{\text{ген}}$.

В процесі чисельного експерименту визначались значення основних параметрів датчика (оптимальні параметри первинних вимірювальних перетворювачів, коефіцієнти перетворення

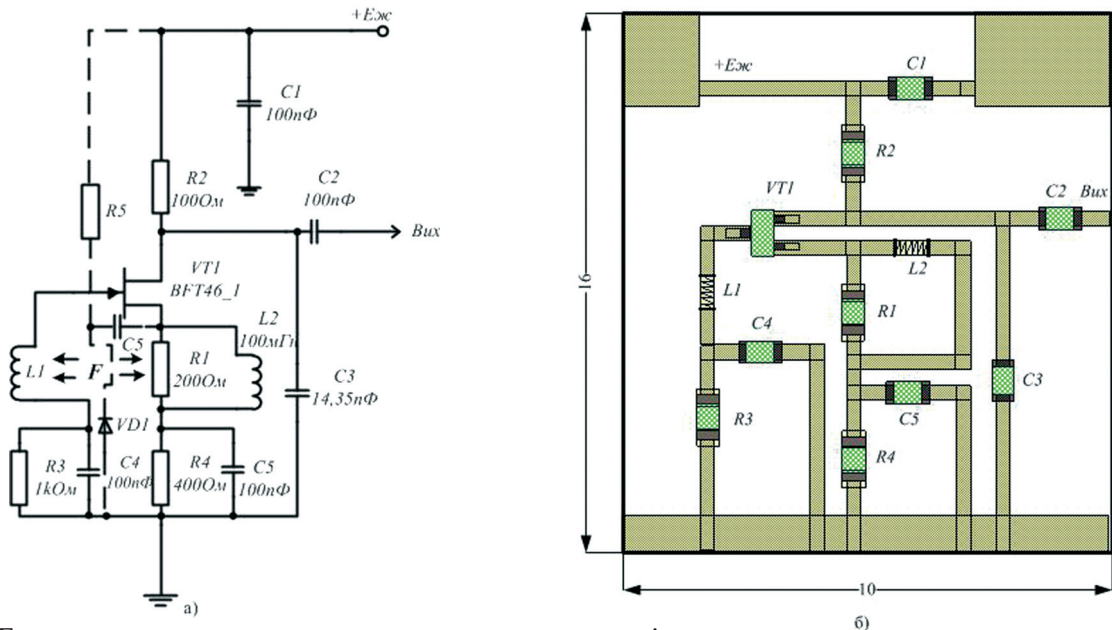


Рис. 2. Електрична принципова схема двохпараметричного індуктивно-резистивного генераторного датчика (а) та його топологія (б)

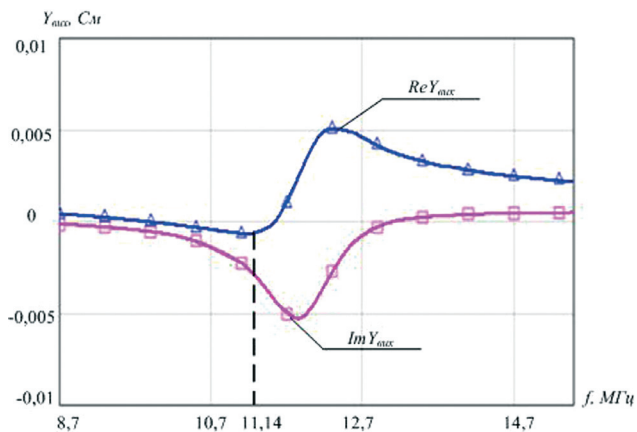


Рис. 3. Залежність вихідної провідності УПІ $Y_{вих}$ від робочої частоти f

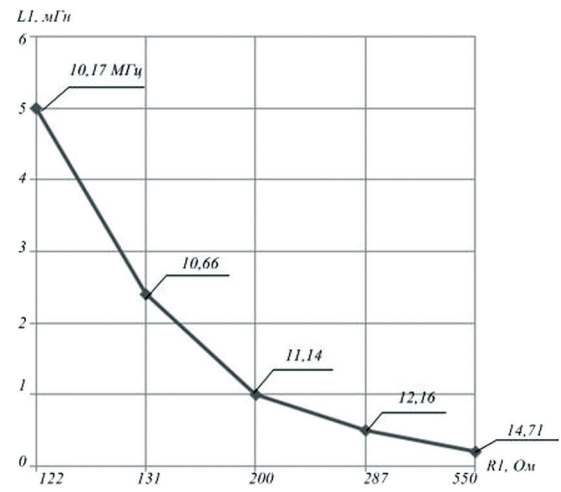


Рис. 4. Залежність зміни оптимальних значень індуктивності $L1$ від опору $R1$ при різних частотах генерації

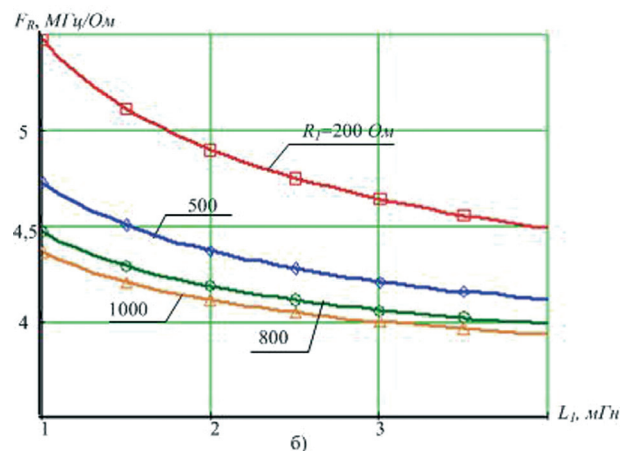
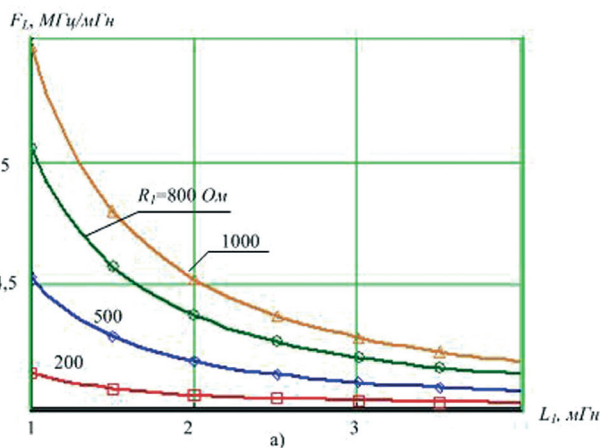


Рис. 5. Залежності коефіцієнтів перетворення від індуктивності першого чутливого елемента при різних значеннях резистора $R1$: а) індуктивна складова коефіцієнта перетворення; б) резистивна складова коефіцієнта перетворення

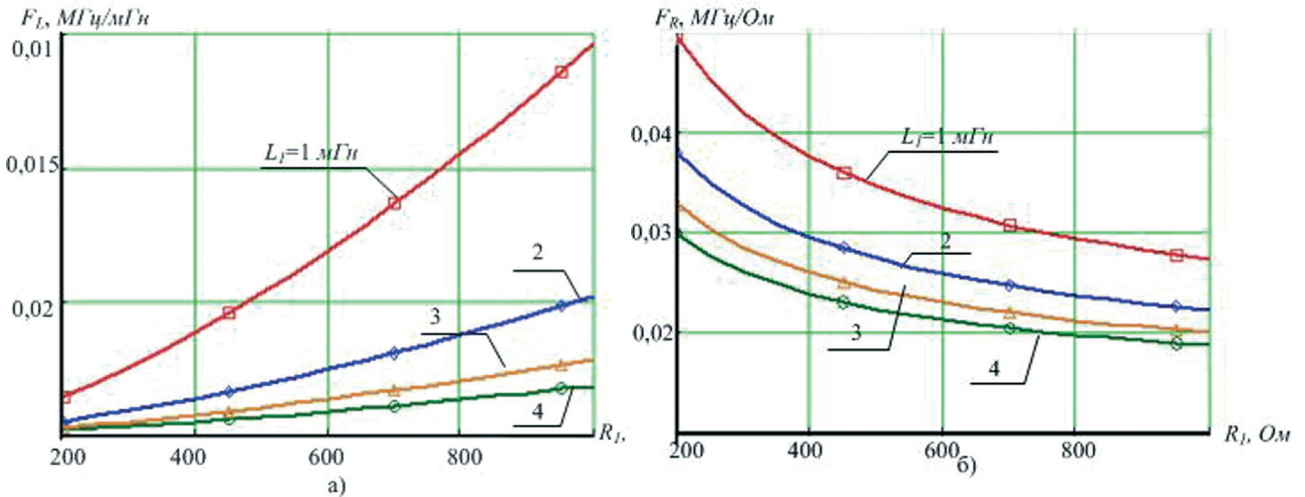


Рис. 6. Залежності коефіцієнтів перетворення від опору другого чутливого елемента при різних значеннях індуктивності L_I : а) індуктивна складова коефіцієнта перетворення; б) резистивна складова коефіцієнта перетворення

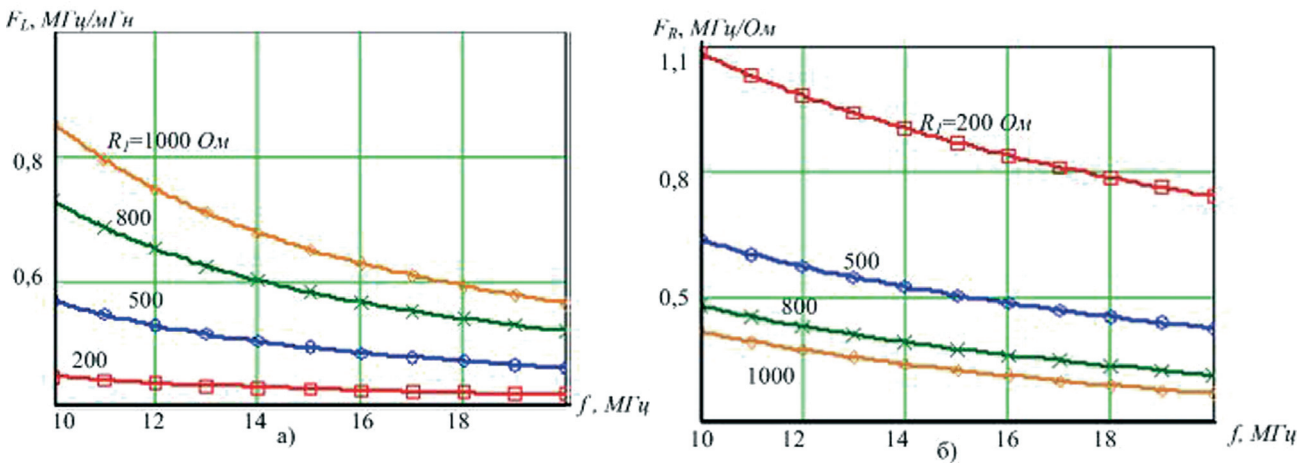


Рис. 7. Залежності коефіцієнтів перетворення від частоти при різних значеннях опору R_I : а) індуктивна складова коефіцієнта перетворення; б) резистивна складова коефіцієнта перетворення

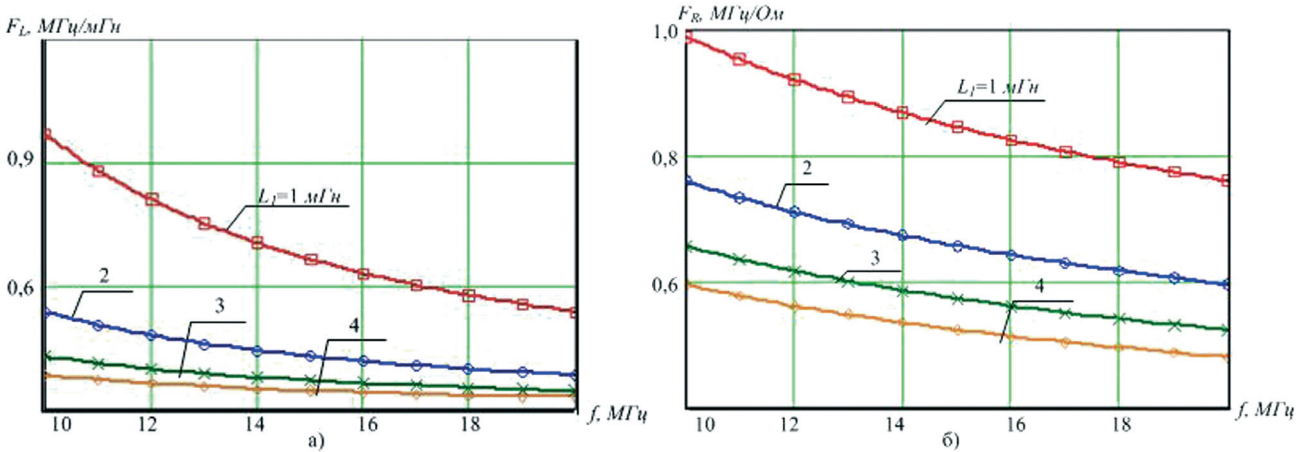


Рис. 8. Залежності коефіцієнта перетворення від частоти при різних значеннях індуктивності L_I : а) індуктивна складова коефіцієнта перетворення; б) резистивна складова коефіцієнта перетворення

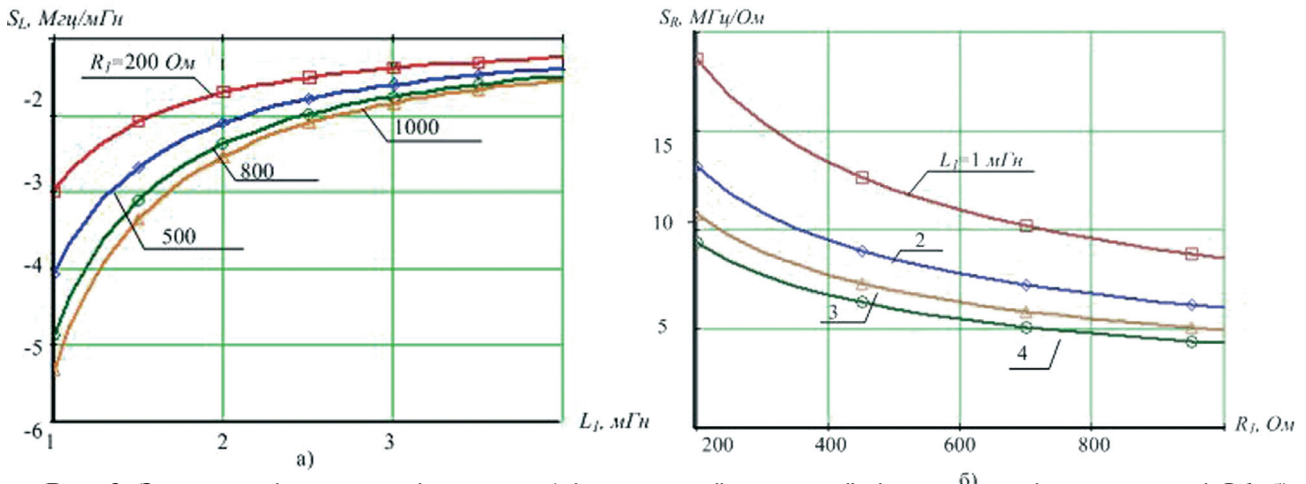


Рис. 9. Залежності чутливості датчика а) індуктивної складової від значення індуктивності L_I ; б) резистивної складової від значень опору R_I

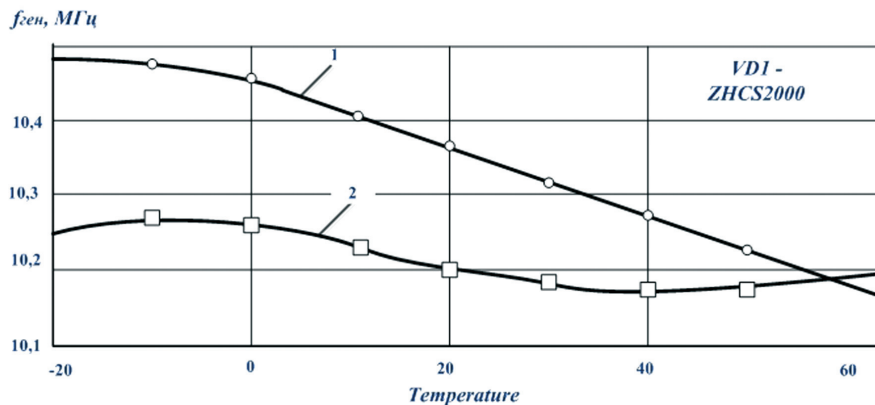


Рис. 10 Експериментальні залежності нестабільності частоти генерації двохпараметричного генераторного датчика при відсутності (1) та при використанні (2) схеми «інтелектуальної» компенсації

та чутливості датчика) при яких він працюватиме з максимальною ефективністю.

Визначено частоти, при яких даний пристрій матиме максимальне від'ємне значення активної складової вихідної провідності $Y_{вих}$, що забезпечує максимальне значення потужності сигналу, що генерується. Максимальне від'ємне значення реальної складової вихідної провідності спостерігається на частоті 11,14 МГц (рис. 3). Дана частота використовувалась в подальших дослідженнях як центральна робоча частота двохпараметричного індуктивно-резистивного генераторного датчика. Максимальне значення вихідної потужності $P_{вих} = 11,81$ мВт спостерігається при $L_I=1$ мГн та $R_I=200$ Ом. Максимальна частота генерації двохпараметричного індуктивно-резистивного генераторного датчика складає $0,2 \cdot \Omega_s$. З урахуванням наведених розрахунків, побудовано графік залежності оптимальних значень індуктивності ПВП від значень опору резистивного ПВП при різних частотах ге-

нерації, що забезпечують максимальну потужність сигналу генерації (рис. 4). Частота генерації зростатиме зі збільшенням значень опору резистивного ПВП та зменшуватиметься зі зростанням значення індуктивності L_I .

Залежності коефіцієнтів перетворення від L_I мають спадний характер по всьому діапазону значень індуктивності першого ПВП (рис. 5). В той самий час зі збільшенням опору R_I значення функції F_R зменшуються, а функції F_L - навпаки, зростають (рис. 6).

Залежність індуктивної складової коефіцієнта перетворення від робочої частоти при $R_I = const$, так само як і залежність резистивної складової коефіцієнта перетворення, носить спадний характер (рис. 7). При цьому значення індуктивної складової коефіцієнта перетворення по всьому робочому діапазону частот зростає при збільшенні опору R_I резистивного ПВП. В той самий час резистивна складова коефіцієнта перетворення зменшує свої

значення зі зростанням опору RI . Залежності як індуктивної так і резистивної складової коефіцієнта перетворення від частоти мають однакові властивості. По всьому діапазону частот зі збільшенням значень індуктивності LI спостерігається спадний характер F_L та F_R (рис. 8).

Залежність індуктивної складової чутливості генераторного датчика від індуктивності LI носить нелінійний характер при будь-яких значеннях опору резистивного ПВП і лежить у області від'ємних значень, зменшуючись по абсолютній величині зі збільшенням індуктивності LI та збільшується зі зростанням опору RI (рис. 9 а). Залежність резистивної складової чутливості датчика від опору резистивного ПВП при різних значеннях індуктивності LI (рис. 9 б) також має нелінійний характер, параболічно спадаючи зі збільшенням значень опору RI та індуктивності LI .

В якості прикладу практичного застосування індуктивно-резистивного генераторного датчика розглянуто його використання в «інтелектуальному» режимі, коли в схему датчика (рис. 2 а) введено діод VDI , що виконує роль нелінійного температурного ПВП, який компенсує температурну нестабільність частоти генерації датчика з індуктивним (LI) ПВП. Крутизна характеристики температурного ПВП налаштовується вибором величини резистора RI . На рис. 10 представлені результати досліджень впливу кола термокомпенсації, які показали можливість п'ятикратного збільшення температурної стабільності датчика в діапазоні температур (-20...+60) С. Особливістю такого методу термокомпенсації, на відміну від загальноприйнятого за постійним струмом, є його робота на змінному струмі, що забезпечує постійність робочої точки транзистора.

Висновки

Максимальна частота генерації двохпараметричного індуктивно-резистивного генераторного датчика складає $0,2 \cdot \Omega_s$ і зменшується зі зростанням значення індуктивності LI . Найбільш оптимальним співвідношенням опору та індуктивності ПВП є значення для УПІ на базі ПТ типу VFT46: $L=1$ мГн та опору $R=200$ Ом. При цих значеннях параметрів значення вихідної потужності $P_{вих} = 11,81$ мВт.

Індуктивна складова коефіцієнта перетворення спадає зі збільшенням значень індуктивності ПВП та робочої частоти і зростає зі збільшенням значення опору резистивного ПВП: її максимальні значення спостерігаються при $LI=1$ мГн та $RI=1000$ Ом. Резистивна складова коефіцієнта перетворення спадає зі збільшенням значень ін-

дуктивності ПВП, робочої частоти і опору резистивного ПВП. Максимальні значення вона має при $LI=1$ мГн та $RI=200$ Ом.

Індуктивна складова чутливості двохпараметричного індуктивно-резистивного генераторного датчика носить лінійну залежність від індуктивності LI чутливого елемента при будь-яких значеннях опору RI . Резистивна складова чутливості датчика має нелінійний характер залежності від LI та RI , параболічно зростаючи зі збільшенням значень LI , і зменшуючись при зростанні RI .

Список літератури

1. Бартенев В. Аналоговые датчики температуры, влажности, давления / В. Бартенев, Н. Бартенев. // Современная электроника. – 2006. – №6. – С. 26–31.
2. Журов А. Датчики температуры / А. Журов // Современная электроника. – 2006. – №6. – С. 22–24.
3. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кнорринг, В. С. Гутников. – Л.: Энергия, 1970. – 424 с.
4. Дубовой Н. Д. Автоматические многофункциональные измерительные преобразователи / Н. Д. Дубовой. – М.: Радио и связь, 1989. – 256 с.
5. Готра З.Ю. Датчики: справочник / З.Ю. Готра, Л.Я. Ильницкий, Е.С. Полищук. – Львов: Каменяр, 1995. – 312 с. – ISBN 5-7745-0233-3.
6. Ліщинська Л.Б. Визначення, класифікація і параметри багатопараметричних перетворювачів іммітансу. / Л.Б. Ліщинська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №5. – С. 105–108.
7. Ліщинська Л.Б. Невизначена матриця провідності N-полосника з послідовними опорами у ланцюзі кожного полюса / Л.Б. Ліщинська. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – №4. – С.83–89.
8. Филинюк М.А. Активні УВЧ та НВЧ фільтри / М.А. Филинюк, Л.Б. Ліщинська. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 396 с. – 978-966-641-376-8.
9. Пат. 61183 Україна, МПК G01R 27/02. Двопараметричний індуктивно-резистивний генераторний датчик / Ліщинська Л.Б., Рожкова Я. С., Филинюк М. А.; заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – u201015660; заявл. 24.12.10; опубл. 11.07.11., Бюл. № 13. – 4 с.