

**О. В. Войцеховська, к. т. н.; М. А. Філінюк, д. т. н., проф.; Д. В. Кудряшов**

## **ІНДУКТИВНИЙ НЕГАСЕНСОР МОСТОВОГО ТИПУ НА L-НЕГАТРОНІ**

*Розглядається індуктивний негасенсор мостового типу на L-негатроні, в якому підвищено коефіцієнт перетворення та відносну чутливість за рахунок введення в схему індуктивного сенсора-прототипу схемотехнічного аналога L-негатрона, підключеного паралельно змінній індуктивності первинного вимірювального перетворювача.*

**Ключові слова:** індуктивний сенсор, L-негатрон, негасенсор, чутливість, вихідна напруга, коефіцієнт перетворення, первинний вимірювальний перетворювач.

### **Вступ**

До складу будь-якої автоматизованої інформаційно-вимірювальної або керуючої системи входять сенсори, які повинні забезпечувати високу точність перетворення різних впливів в електричні сигнали, зберігати роботоздатність у широкому діапазоні температур та мати високий ступінь захисту від впливу зовнішніх факторів [1]. За принципом перетворення вхідної величини сенсори поділяють на параметричні, генераторні, оптичні та інші. Особливо велику групу займають параметричні сенсори, що перетворюють певну фізичну величину в електричний параметр [2, 3].

У наш час високий попит мають малогабаритні індуктивні сенсори, основне призначення яких – створювати електричний сигнал, коли металевий предмет наближається до сенсора на певну відстань. Такі індуктивні сенсори є доступним, простим, надійним та дешевим елементом систем управління приводів, верстатів, автоматичних ліній, систем вимірювання фізичних величин.

### **Постановка задачі дослідження**

Існує декілька схем реалізації індуктивних сенсорів: послідовна, трансформаторна, мостова, частотна, схема на подільнику напруги. Оскільки на теперішній час найнадійнішою реалізацією є мостова схема, то доцільно провести дослідження індуктивного мостового сенсора [4].

Основним параметром параметричних сенсорів є точність вимірювання фізичної величини, тобто чутливість. Підвищити чутливість можна шляхом використання таких елементів функціональної електроніки, як негатрони або їх схемотехнічні аналоги [5]. Оскільки в індуктивних сенсорах фізична величина перетворюється в індуктивність, то доцільно використовувати L-негатрон – прилад, що має від'ємне значення диференційної індуктивності. Реактивний опір такого негатрона також має від'ємне значення  $X_L^{(-)} = \omega L^{(-)} < 0$ , і його модуль зростає із збільшенням частоти [6]. Отже, в роботі поставлено задачу підвищення чутливості індуктивного сенсора мостового типу шляхом використання в ньому L-негатрона. При цьому підключення L-негатрона може бути паралельним, послідовним до індуктивності первинного вимірювального перетворювача  $L_x$  або замість неї.

Метою роботи є розробка індуктивного негасенсора мостового типу на L-негатроні з підвищеною чутливістю до зміни вхідної фізичної величини.

### **Математичне моделювання сенсора-прототипу та негасенсора**

Розглянемо схему індуктивного сенсора мостового типу (прототипу), принципову схему якого подано на рис. 1.

Первинний вимірювальний перетворювач такого сенсора складається з вимірювального моста, виконаного на двох баластних резисторах однакового номіналу та двох котушок індуктивності – постійної  $L$  та змінної  $L_x$ , при цьому значення індуктивностей котушок також однакові. При внесенні в поле змінної котушки металевго предмета буде змінюватись значення її індуктивності, яке викликає зміну значення вихідної напруги сенсора:

$$U_{вих1} = \frac{U_{\Gamma} \cdot R \cdot \omega \cdot (L_X - L)}{(R + \omega \cdot L) \cdot (R + \omega \cdot L_X)} \quad (1)$$

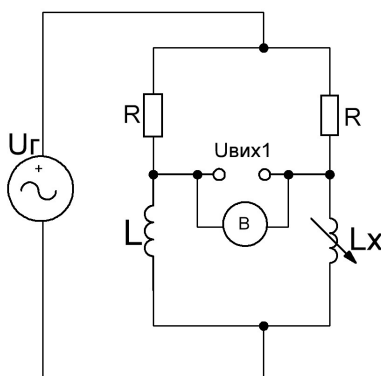


Рис. 1. Схема індуктивного мостового сенсора-прототипу

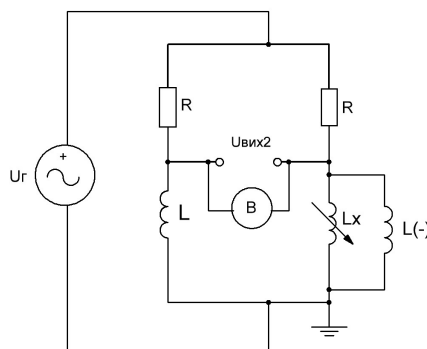
Абсолютна чутливість такого сенсора, тобто його коефіцієнт перетворення, визначається виразом:

$$K_{пер1} = \frac{U_{\Gamma} \cdot R \cdot \omega}{(R + \omega \cdot L_X)^2} \quad (2)$$

Відносна чутливість має вигляд:

$$S_1 = \frac{L_X \cdot (R + \omega \cdot L)}{(R + \omega \cdot L_X) \cdot (L_X - L)} \quad (3)$$

Для підвищення чутливості такого сенсора-прототипу підключимо паралельно до індуктивності первинного вимірювального перетворювача схемотехнічний аналог L-негатрона, реалізований на конверторі іммітансу, та отримаємо негасенсор [7], схему якого подано на рис. 2. На схемі L-негатрон позначено як  $L^{(-)}$ .

Рис. 2. Схема індуктивного мостового негасенсора на схемотехнічному L-негатроні, підключеному паралельно до індуктивності первинного вимірювального перетворювача  $L_X$ 

Значення вихідної напруги такого негасенсора визначається співвідношенням:

$$U_{вих2} = - \frac{(L \cdot L^{(-)} + L \cdot L_X - L^{(-)} \cdot L_X) \cdot R \cdot U_{\Gamma} \cdot \omega}{(R + \omega \cdot L) \cdot (L_X \cdot R + L^{(-)} \cdot R + \omega \cdot L^{(-)} \cdot L_X)} \quad (4)$$

Коефіцієнт перетворення негасенсора визначається виразом:

$$K_{пер2} = \frac{L^{(-)2} \cdot U_{Г} \cdot \omega \cdot R}{(L_{X} \cdot R + L^{(-)} \cdot R + \omega \cdot L^{(-)} \cdot L_{X})^2}. \quad (5)$$

Вираз для визначення відносної чутливості має вигляд:

$$S_2 = - \frac{L^{(-)2} \cdot L_{X} \cdot (R + \omega \cdot L)}{(-L^{(-)} \cdot L_{X} + L \cdot L^{(-)} + L \cdot L_{X}) \cdot (L_{X} \cdot R + L^{(-)} \cdot R + \omega \cdot L^{(-)} \cdot L_{X})}. \quad (6)$$

На рис. 3 подано графічні залежності вихідної напруги  $U_{вих}$ , коефіцієнта перетворення  $K_{пер}$ , відносної чутливості  $S$ , а також відношення чутливостей негасенсора та сенсора-прототипу  $S_2/S_1$  від індуктивності  $L_X$  при паралельному підключенні L-негатрона для різних значень від'ємної індуктивності ( $-390$  мкГн,  $-450$  мкГн,  $-250$  мкГн та  $-200$  мкГн).

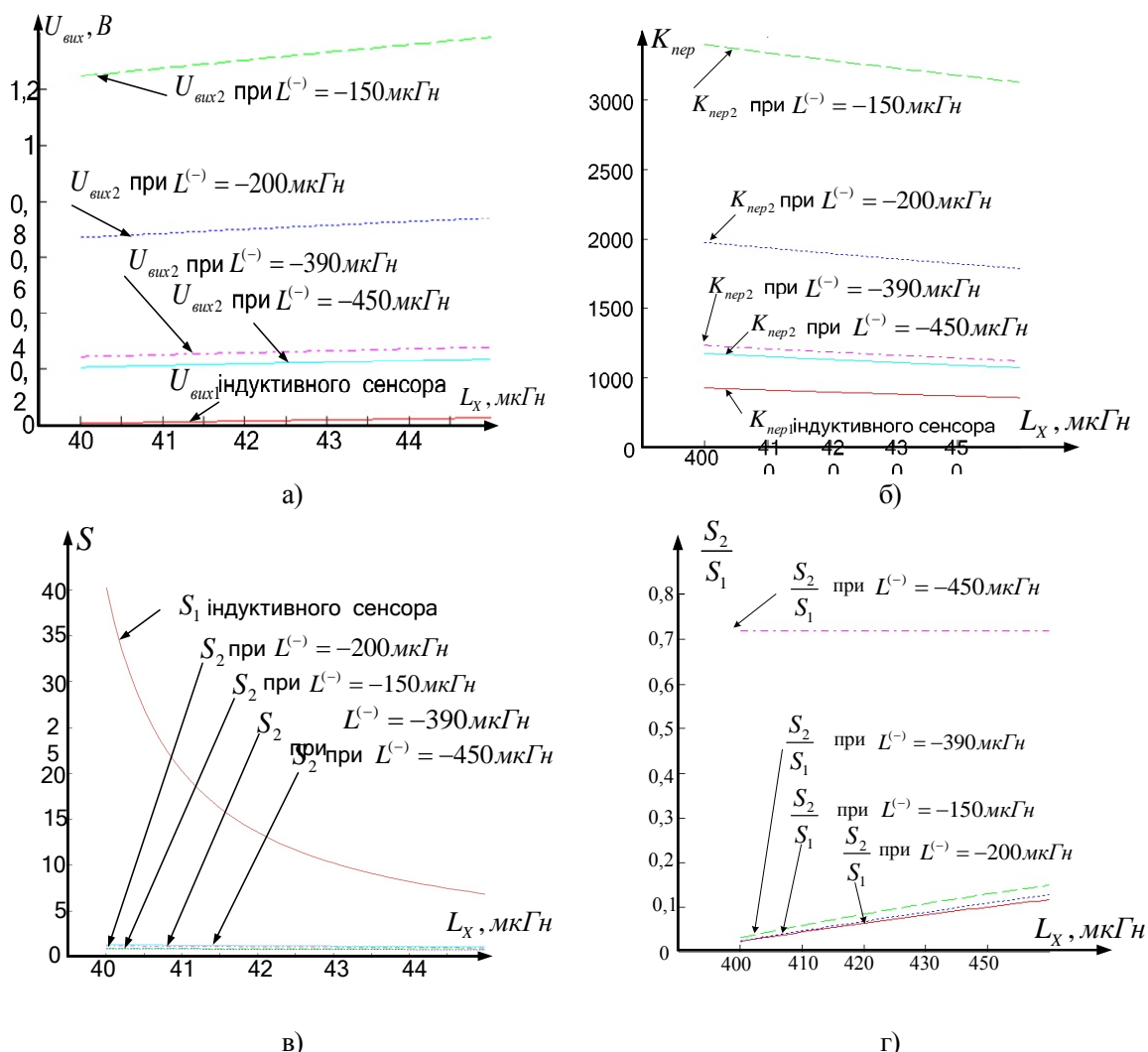


Рис. 3. Залежності вихідної напруги  $U_{вих}$  а), коефіцієнта перетворення  $K_{пер}$  б), відносної чутливості  $S$  в) та відношення чутливостей  $S_2/S_1$  г) від індуктивності  $L_X$  для різних значень від'ємної індуктивності  $L^{(-)}$

Аналіз залежностей показує, що абсолютна чутливість негасенсора майже у вісім разів більша за Наукові праці ВНТУ, 2011, № 2

чутливість сенсора-прототипа, а вихідна напруга у декілька десятків разів більша за вихідну напругу сенсора-прототипа (залежно від значення від'ємної індуктивності  $L^{(-)}$ ).

### Експериментальні дослідження

Для підтвердження отриманих теоретичних положень при проведенні експериментальних досліджень розроблено макет, в якому реалізовано одночасно сенсор-прототип та негасенсор. На рис. 4 показано принципову схему негасенсора на схемотехнічному  $L$ -негатроні у вигляді конвертора іммітансу (а) та фотознімок експериментального макету (б).

Конструктивно макет являє собою зібраний на одній платі сенсор-прототип та схемотехнічний аналог  $L$ -негатрона, який підключається до сенсора за допомогою перемикача для реалізації негасенсора. Індуктивний сенсор складається з індуктивності первинного вимірювального перетворювача  $L_X$  (1), постійної котушки індуктивності (2), двох баластних резисторів  $R$ . Котушки  $L$  та  $L_X$  конструктивно ідентичні і являють собою намотані 50 витків дроту ПЕЛ-0,8 на оправу діаметром 10 см; як баластні резистори використано резистори МЛТ номіналом 30 Ом, потужністю 0,125 Вт.

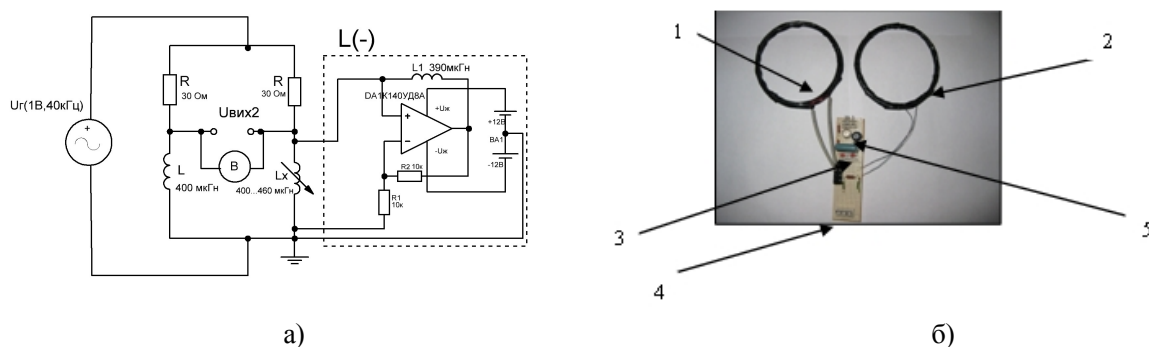


Рис. 4. Принципова схема негасенсора на схемотехнічному  $L$ -негатроні у вигляді конвертора іммітансу (а) та фотознімок експериментального макету (б)

Схемотехнічний аналог  $L$ -негатрона реалізований на операційному підсилювачі  $DA1$  типу  $K140UD8A$  з додатнім зворотним зв'язком у вигляді дроселя  $L1$  по неінвертованому входу і подільником напруги ( $R1$ ,  $R2$ ), що визначає коефіцієнт підсилення операційного підсилювача. Живлення  $DA1$  забезпечується двополярним джерелом живлення  $BA1$  —  $\pm 12В$ . На платі встановлено роз'єми для підключення генератора, осцилографа (4) та джерела живлення (5). В якості вимірювального обладнання було використано генератор низькочастотний ГЗ-118 та осцилограф С1-93. З генератора на вхід сенсора подавався синусоїдальний сигнал частотою 40 кГц та амплітудою 1 В, а на виході за допомогою осцилографа контролювалася зміна напруги. Як предмет, на який реагував сенсор, була використана залізна пластина діаметром близько 12 см.

Макет виконано так, що можна проводити дослідження як сенсора-прототипу, так і негасенсора окремо, що забезпечується перемиканням перемичок (3).

На рис. 5а представлено фото осцилограми вихідної напруги індуктивного сенсора-прототипу при максимальному віддаленні металевго предмета від  $L_X$ . Амплітуда вихідного сигналу в цьому випадку склала 40 мВ.

При внесенні в поле  $L_X$  металевго предмета напруга на виході збільшується, при цьому максимальна відстань, на якій індуктивний сенсор реагує на предмет, — 4,5 см, а зміна напруги на цій відстані — 1–5 мВ. При максимальному ж наближенні предмета до котушки (коли металева пластина лежить на котушці) зміна напруги складає 50 мВ. Фотознімок осцилограми вихідної напруги в цьому випадку представлено на рис. 5б.

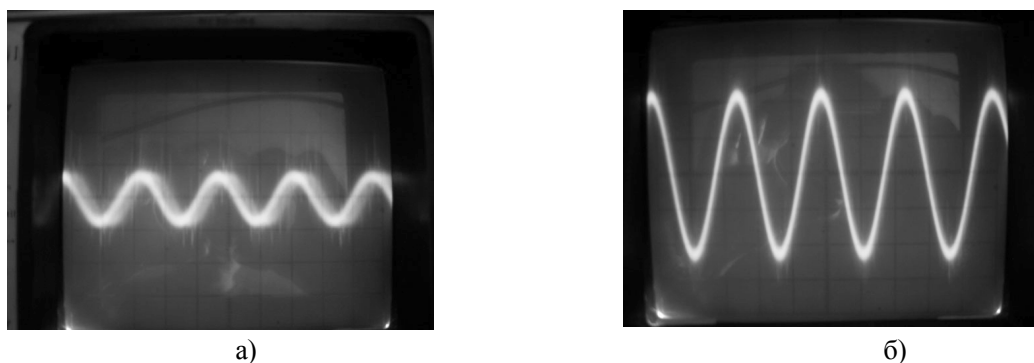


Рис. 5. Осцилограми вихідної напруги при максимальному віддаленні металевго предмета від сенсора-прототипу а) та при максимальному наближенні предмета до сенсора-прототипу б). Ціна поділки 0,05 В

При внесенні в поле  $L_x$  металевго предмета, максимальна відстань, на якій негасенсор реагує на предмет, складає вже 8-9 см, а зміна напруги на цій відстані – 1-5 мВ (рис. 6а), що в два рази більше, ніж у індуктивного сенсора-прототипу. Максимальна зміна вихідної напруги негасенсора при максимальному наближенні металевго предмета до  $L_x$  складає 400 мВ, що у вісім разів більше, ніж у індуктивного сенсора-прототипу. Осцилограму вихідної напруги негасенсора при максимальному наближенні металевго предмета до  $L_x$  представлено на рис. 6б.

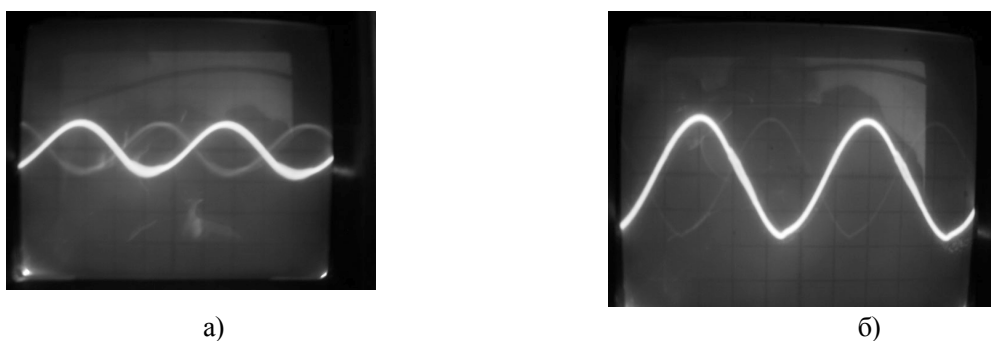


Рис. 6. Осцилограми вихідної напруги при відсутності впливу металевго предмета на негасенсор а) та при максимальному наближенні предмета до негасенсора б). Ціна поділки 0,5 В

Таким чином, отриманий негасенсор мостового типу має в два рази більшу абсолютну та відносну чутливості та у вісім разів більшу максимальну вихідну напругу, ніж індуктивний сенсор-прототип.

### Висновки

Отримані математичні залежності для індуктивного мостового негасенсора показали, що за рахунок додаткового введення L-негатрона в схему індуктивного сенсора-прототипу можна досягти підвищення чутливості в декілька разів при виконанні певних співвідношень між параметрами елементів схеми.

Отриманий індуктивний негасенсор мостового типу на L-негатроні має в два рази більші абсолютну та відносну чутливості до зміни вхідної фізичної величини, порівняно зі схемою сенсора-прототипу без L-негатрона.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. – М.: – Техносфера, 2007. – 384 с.
2. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден; пер. с англ. Е. Л. Свинцова. – М.: Техносфера, 2005. – 588 с.
3. Аш Ж. Датчики измерительных систем: у 2 т. Т 1. / Ж. Аш; пер. с фр. А. С. Обухова. – М.: Мир, 1992. – 480 с.
4. Ступель Ф. А. Электромеханические датчики и преобразователи неэлектрических величин: принцип действия, схемы, расчет / Ф. А. Ступель. – М.: Мир, 1965. – 116 с.
5. Войцеховська О. В. Дослідження індуктивних негасенсорів на L-негатронах / О. В. Войцеховська, О. О. Лазарев, М. А. Філінюк. – Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми

радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» Вінниця, 8 – 10 жовтня 2009. – С. 12.

6. Філинюк М. А. Основи негatronіки: у 2 т. / М. А. Філинюк. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – Т. 1: Теоретичні і фізичні основи негatronіки. – 456 с.

7. Філинюк М. А. Аналіз чутливості електронних кіл з L-, C-негатронами / М. А. Філинюк, О. О. Лазарев. – Вісник ЖІТІ. – 2003. – № 2. – С. 92 – 98.

**Войцеховська Олена Валеріївна** – к. т. н., старший викладач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури. Тел. 59-80-75, pktavntu@mail.ru.

**Філинюк Микола Антонович** – д. т. н., професор, завідувач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури. N\_Fil45@mail.ru.

**Кудряшов Дмитро Валерійович** – студент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури. Тел. 59-80-75, diamond-audio@inbox.ru.

Вінницький національний технічний університет.