

УДК 681.586.772

О.О. ЛАЗАРЄВ, М.А. ФІЛІНЮК, Л.Б. ЛІЩИНСЬКА, Д.В. БОНДАРІЮК
Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ L-НЕГАТРОНІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ТА СТІЙКІСТЬ ІНДУКТИВНИХ СЕНСОРІВ

Проведено аналіз чутливості та стійкості індуктивних кіл з L-негатроном. На базі одержаних теоретичних положень розроблені та досліджені схеми індуктивних давачів з L-негатронами. Показано, що давачі, які містять L-негатрон, можуть працювати в режимі автогенерації, а чутливість таких давачів до 10 разів більша у порівнянні з прототипом.

Ключові слова: негатроніка, негасенсор, L-негатрон, чутливість, стійкість.

O.O. LAZAREV, M.A. FILINYUK, L.B. LISHCHYNSKA, D.V. BONDARYUK
Vinnitsa National Technical University

STUDY OF L-NEGATRONS THE SENSITIVITY AND STABILITY INDUCTIVE SENSORS

Abstract - The analysis of sensitivity and resistance inductive circuits with L-negatrons were held. On the basis of the theoretical provisions are designed and tested circuits of inductive sensors with L-negatrons. Determined that the parallel connection of L-negatron scheme is an increase in absolute and relative sensitivities, in the case of cascade L-negatron – only relative sensitivity. 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 provide autogeneration to build frequency inductive sensors. Autogeneration condition where 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.

Keywords: negatronika, negasensor, L-negatron, sensitivity, stability.

Вступ

Одним з перспективних шляхів підвищення ефективності елементів та пристроїв інформаційних систем є використання нової елементної бази, зокрема L-негатронів. L-негатронами називають електронні прилади, що в деякому режимі роботи мають від'ємне значення диференційної індуктивності [1]. Для проектування інформаційних пристроїв на базі L-негатронів необхідні математичні методи, які б враховували особливості цих елементів. Чутливість є одним з основних питань синтезу електронних пристроїв [1]. Індуктивні сенсори застосовуються як первинні джерела інформації для систем автоматичного управління технологічними процесами та для безконтактного виявлення металевих об'єктів, тому набули широкого використання [2]. Використання від'ємної індуктивності дозволяє підвищити чутливість індуктивних сенсорів, так в роботі [3] запропонований індуктивний параметричний сенсор в якому чутливість збільшена в 2,7 разу. В роботі [4] розглянутий індуктивний мостовий сенсор з L-негатроном в якому чутливість збільшена в 3 рази. Однак в цих роботах не досліджено вплив параметрів еквівалентної схеми від'ємної індуктивності на чутливість та виконання умов стійкості/нестійкості схеми. Потенційна-нестійкість пристроїв на базі L-негатронів робить питання чутливості для цих пристроїв ще більш актуальним, внаслідок їх більшої чутливості до зміни різних параметрів елементів схеми. Наявність від'ємної індуктивності та від'ємного активного опору у L-негатронів ставить задачу визначення умов стійкості електронних схем на їх основі.

Мета роботи та формулювання задач дослідження

Метою роботи є підвищення чутливості індуктивних сенсорів за рахунок використанні L-негатрона. Для досягнення цієї мети в роботі вирішуються задачі: аналіз впливу L-негатрона на чутливість індуктивних сенсорів, дослідження стійкості індуктивних сенсорів на основі L-негатронів та визначення умов автогенерації.

Аналіз впливу L-негатрона на чутливість індуктивних сенсорів

Основним параметром L-негатронів є величина від'ємної диференційної індуктивності $L^{(-)}$. Можливі два способи включення від'ємної індуктивності в електронне коло: паралельно та послідовно до додатної індуктивності кола L [5]. Розглянемо чутливість індуктивних сенсорів з урахування еквівалентної схеми індуктивного первинного вимірювального перетворювача (ПВП) та еквівалентної схеми L-негатрона. Для паралельного з'єднання ПВП та L-негатрона еквівалентна схема представлена на рис. 1.

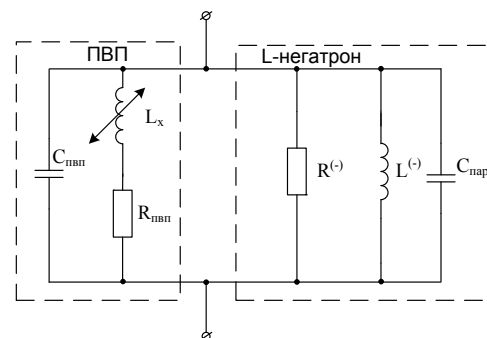


Рис. 1. Еквівалентна схема при паралельному з'єднанні ПВП та L-негатрона. На схемі $R_{ПВП}$ – активний опір втрат котушки індуктивності, $C_{ПВП}$ – додатна паразитна ємність, L_x – індуктивний ПВП, $R^{(-)}$ – від'ємний активний опір втрат котушки індуктивності, $L^{(-)}$ – від'ємна індуктивність, $C_{пар}$ – паразитна ємність L-негатрона

При роботі на частотах, що є менші за максимальну частоту L-негатрона та резонансну частоту ПВП, можна знехтувати впливом паразитної ємності $C_{ПВП}$ та паразитними елементами L-негатрона.

Повний опір схеми дорівнює $Z_1 = \text{Re}(Z_1) + j \text{Im}(Z_1)$, де:

$$\text{Re}(Z_1) = \frac{L^{(-)2} R^{(-)} \omega^2 (R_{ПВП} (R_{ПВП} + R^{(-)}) + L_x^2 \omega^2)}{R_{ПВП}^2 R^{(-)2} + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} (R_{ПВП} + R^{(-)})^2) \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4}; \quad (1)$$

$$\text{Im}(Z_1) = \frac{L^{(-)} R^{(-)2} \omega (R_{ПВП}^2 (R_{ПВП} + L_x (L^{(-)} + L_x) \omega^2)}{R_{ПВП}^2 R^{(-)2} + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} (R_{ПВП} + R^{(-)})^2) \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4} \quad (2)$$

Використовуючи (1) та (2) знайдена абсолютна чутливість дійсної та уявної складової повного опору схеми до зміни індуктивності ПВП:

$$S(\text{Re}(Z_1), L_x) = \frac{2L^{(-)2} R^{(-)2} (L_x R^{(-)} + L^{(-)} (R_{ПВП} + R^{(-)})) \omega^4 (-R_{ПВП} R^{(-)} + L^{(-)} L_x \omega^2)}{(R_{ПВП}^2 R^{(-)2} + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} (R_{ПВП} + R^{(-)})^2) \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4)^2};$$

$$S(\text{Im}(Z_1), L_x) = \frac{L^{(-)2} R^{(-)2} \omega^3 (R_{ПВП} a_1 + \omega(a_2 - L^{(-)} L_x \omega))(R_{ПВП} (-R^{(-)} + L^{(-)} \omega) + \omega(a_2 + L^{(-)} L_x \omega)}{(R_{ПВП}^2 R^{(-)2} + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} (R_{ПВП} + R^{(-)})^2) \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4)^2},$$

де $a_1 = R^{(-)} + L^{(-)} \omega$, $a_2 = (L^{(-)} + L_x) R^{(-)}$.

Виходячи з отриманих виразів визначена відносна чутливість:

$$S_{L_x}^{\text{Re}(Z_1)} = S(\text{Re}(Z_1), L_x) \cdot \frac{L_x}{\text{Re}(Z_1)} = \frac{2L_x R^{(-)} (L_x R^{(-)} + L^{(-)} b_1) \omega^2 (-R_{ПВП} R^{(-)} + L^{(-)} L_x \omega^2)}{b_3 (b_2 + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} b_1^2) \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4)}, \quad (3)$$

де $b_1 = R_{ПВП} + R^{(-)}$, $b_2 = R_{ПВП}^2 R^{(-)2}$, $b_3 = R_{ПВП} b_1 + L_x^2 \omega^2$.

$$S_{L_x}^{\text{Im}(Z_1)} = S(\text{Im}(Z_1), L_x) \cdot \frac{L_x}{\text{Im}(Z_1)} = \frac{L^{(-)} L_x \omega^2 c_1 c_2}{c_3 (R_{ПВП}^2 R^{(-)2} + (2L^{(-)} L_x R^{(-)2} + L_x^2 R^{(-)2} + L^{(-)2} c_4)} \quad (4)$$

де $c_1 = R_{ПВП} (R^{(-)} + L^{(-)} \omega) + \omega((L^{(-)} + L_x) R^{(-)} - L^{(-)} L_x \omega)$, $c_3 = R_{ПВП}^2 + L_x (L^{(-)} + L_x) \omega^2$,
 $c_2 = R_{ПВП} (-R^{(-)} + L^{(-)} \omega) + \omega((L^{(-)} + L_x) R^{(-)} + L^{(-)} L_x \omega)$, $c_4 = R_{ПВП} + R^{(-)2} \omega^2 + L^{(-)2} L_x^2 \omega^4$.

З отриманих виразів слідує, що включення L-негатрона, паралельно до ПВП призвело до збільшення відносної чутливості в $\frac{L^{(-)} (L^{(-)} + L_x)^2 R^{(-)2} - L^{(-)3} L_x^2 \omega^2}{(L^{(-)} + L_x)^3 R^{(-)2} + L^{(-)2} L_x^2 (L^{(-)} + L_x) \omega^2}$ разів при умові, що

$$L_x > -\frac{L^{(-)} R^{(-)}}{R^{(-)} + L^{(-)} \omega}.$$

При послідовному з'єднанні ПВП та L-негатрона еквівалентна схема досліджуваної схеми має вигляд (рис. 2).

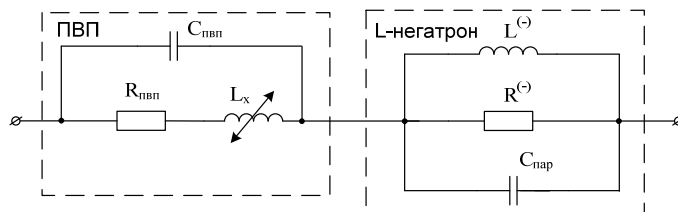


Рис. 2. Еквівалентна схема при послідовному з'єднанні ПВП та L-негатрона

Знехтуємо впливом паразитної ємності $C_{ПВП}$ та паразитними елементами L-негатрона $C_{нар}$ за умови роботи схеми на частотах, що є менші за максимальну частоту L-негатрона та резонансну частоту ПВП [6].

Повний опір схеми дорівнює $Z_2 = \text{Re}(Z_2) + j \text{Im}(Z_2)$, де:

$$\text{Re}(Z_2) = R_{ПВП} + \frac{L^{(-)2} R^{(-)} \omega^2}{R^{(-)2} + L^{(-)2} \omega^2}; \quad (5)$$

$$\text{Im}(Z_2) = L_x \omega + \frac{L^{(-)} R^{(-)2} \omega}{R^{(-)2} + L^{(-)2} \omega^2}. \quad (6)$$

Використовуючи (5) та (6) знайдені абсолютні чутливості дійсної та уявної складової повного опору до

зміни індуктивності ПВП: $S(\text{Re}(Z_2), L_x) = 0$, $S(\text{Im}(Z_2), L_x) = \omega$, а також відносні чутливості:

$$S_{L_x}^{\text{Re}(Z_2)} = S(\text{Re}(Z_2), L_x) \cdot \frac{L_x}{\text{Re}(Z_2)} = 0; \quad (7)$$

$$S_{L_x}^{\text{Im}(Z_2)} = S(\text{Im}(Z_2), L_x) \cdot \frac{L_x}{\text{Im}(Z_2)} = \frac{L_x(L^{(-)2}\omega^2 + R^{(-)2})}{L_x L^{(-)2}\omega^2 + L^{(-)2}R^{(-)2} + L_x R^{(-)2}}. \quad (8)$$

На основі (8) розрахована залежність відносної чутливості уявної складової схеми при послідовному з'єднанні ПВП та L-негатрона від значення L_x (рис. 3).

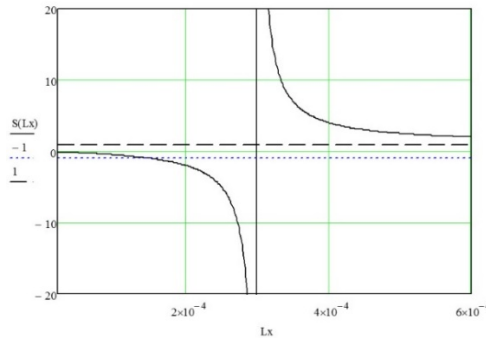


Рис. 3. Залежність відносної чутливості уявної складової від значень L_x

З графіку видно, що відносна чутливість буде більше одиниці при умові $L_x > -L^{(-)2}R^{(-)2} / 2(L^{(-)2}\omega^2 + R^{(-)2})$.

Дослідження стійкості кола індуктивних сенсорів на основі L-негатронів.

Повна провідність схеми на рис. 1 при умові під'єднання її до генератора струму з внутрішнім опором R_g буде визначатися виразом:

$$Y = \frac{1}{R_g} + j\omega C_{ПВП} + \frac{1}{j\omega L_x + R_{ПВП}} + \frac{1}{R^{(-)}} + \frac{1}{j\omega L^{(-)}}; \quad (9)$$

Знаменник виразу (9) після заміни $j\omega$ на p буде характеристичним рівнянням схеми:

$$-R_g R^{(-)} R_{ПВП} + (-L^{(-)} R_g R^{(-)} - L_x R_g R^{(-)} - L^{(-)} R_g R_{ПВП} - L^{(-)} R^{(-)} R_{ПВП}) p - (L^{(-)} L_x R_g + L^{(-)} L_x R^{(-)} + C_{ПВП} L^{(-)} R_g R^{(-)} R_{ПВП}) p^2 + C_{ПВП} L^{(-)} L_x R_g R^{(-)} p^3 = 0 \quad (10)$$

За алгебраїчним критерієм стійкості Рауса-Гурвіца [6], система є стійкою, коли всі коефіцієнти є додатними. Коефіцієнти характеристичного рівняння $-R_g R^{(-)} R_{ПВП}$ та $C_{ПВП} L^{(-)} L_x R_g R^{(-)}$ є завжди додатними, а інші можуть бути від'ємними. Визначимо умови, за яких ці коефіцієнти є від'ємними. Якщо:

$$L_x < \frac{-L^{(-)} R_g R^{(-)} - L_x R_g R^{(-)} - L^{(-)} R_g R_{ПВП} - L^{(-)} R^{(-)} R_{ПВП}}{R_g R^{(-)}}; R_g < -\frac{L_x R^{(-)}}{L_x + C_{ПВП} R^{(-)} R_{ПВП}},$$

то система є нестійкою і може забезпечити режим автогенерації.

Повний опір схеми на рис. 2 при умові під'єднання її до генератора струму з внутрішнім опором R_g визначається виразом:

$$Z = R_g + \frac{jL^{(-)}R^{(-)}\omega}{R^{(-)} + jL^{(-)}\omega - C_{нар}L^{(-)}R^{(-)}\omega^2} + \frac{jR_{ПВП} + L_x\omega}{-j + C_{ПВП}\omega(R_{ПВП} + jL_x\omega)}. \quad (11)$$

Знаменник виразу (11) після заміни $j\omega$ на p буде характеристичним рівнянням схеми:

$$R^{(-)} + (L^{(-)} + C_{ПВП}R^{(-)}R_{ПВП})p - (-C_{нар}L^{(-)}R^{(-)} - C_{ПВП}L_xR^{(-)} - C_{ПВП}L^{(-)}R_{ПВП})p^2 + (-C_{ПВП}L^{(-)}L_x - C_{нар}C_{ПВП}L^{(-)}R^{(-)}R_{ПВП})p^3 - C_{нар}C_{ПВП}L^{(-)}L_xR^{(-)}p^4 = 0 \quad (12)$$

Коефіцієнти характеристичного рівняння (11) $L^{(-)} + C_{ПВП}R^{(-)}R_{ПВП}$, $-C_{нар}L^{(-)}R^{(-)} - C_{ПВП}L_xR^{(-)} - C_{ПВП}L^{(-)}R_{ПВП}$ є завжди додатними, а інші коефіцієнти, можуть бути від'ємними але за умови $L_x < -C_{нар}R^{(-)}R_{ПВП}$, відповідно схема буде не стійкою [7].

Висновки

1) Використання L-негатронів дозволяє підвищити чутливість індуктивних сенсорів до 10 разів. Під час паралельного включення L-негатрона відбувається збільшення абсолютної та відносної чутливості, під час послідовного – лише відносної чутливості.

2) На параметри індуктивного сенсора впливають активні опори ПВП та L-негатрона. При паралельному включенні активний опір призводить до зменшення чутливості індуктивного сенсора та зменшення сумарної індуктивності кола та появи залежності сумарного активного опору кола від значення індуктивності ПВП.

3) Наявність від'ємного активного опору та від'ємної індуктивності L-негатрона призводить до потенційної нестійкості індуктивних схем сенсорів. Нестійкість дозволяє забезпечити режим автогенерації для побудови частотних індуктивних сенсорів. За алгебраїчним критерієм стійкості Рауса-Гурвіца визначені умови, за яких схема є нестійкою, в разі послідовного з'єднання $L_x < -C_{\text{пвп}} R^{(-)} R_{\text{ПВП}}$, в разі паралельного –

$$R_g < -\frac{L_x R^{(-)}}{L_x + C_{\text{ПВП}} R^{(-)} R_{\text{ПВП}}}, \quad L_x < \frac{-L^{(-)} R_g R^{(-)} - L_x R_g R^{(-)} - L^{(-)} R_g R_{\text{ПВП}} - L^{(-)} R^{(-)} R_{\text{ПВП}}}{R_g R^{(-)}}.$$

Література

1. Філінюк М. А. Основи негатроніки: Том I Теоретичні і фізичні основи негатроніки / Микола Антонович Філінюк – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 456 с. – ISBN 966-641-198-9.
2. Winncy Y. D. Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies. CRC. Press. Talor and Francis Group, 2014. 408 p. ISBN 978-1439812440.
3. Патент України на корисну модель № 46280, МПК (2009.01) G01R 27/28. Індуктивний негасенсор з частотним виходом / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев, О. В. Войцеховська, С. В. Мірошникова ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200907621 ; заявл. 20.07.2009 ; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 1.
4. Патент України на корисну модель № 54019, МПК (2006.01) G01R 27/28. Індуктивний негасенсор мостового типу / О. В. Войцеховська, О. О. Лазарев, М. А. Філінюк, Д. В. Кудряшов ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201004679 ; заявл. 20.04.2010 ; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
5. Філінюк М. А. Аналіз чутливості електричних кіл з L-, C-негатронами / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев // Вісник ЖІТІ. – 2003. – № 2. – С. 92–98.
6. Філінюк М. А. Частотні датчики на L-, C- негатронах Філінюк М. А., О. О. Лазарев, Р. Ф. Лободзінська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2004. – № 1. – С. 84–89.
7. Філінюк М. А. LC-негатрони та їх застосування : монографія / М.А. Філінюк, О.О. Лазарев, О.В. Войцеховська. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 308 с. – ISBN 978-966-641-452-9

References

1. Filinjuk M. A. Osнови negatroniki: Tom I Teoretichni i fizichni osnovi negatroniki / Mikola Antonovich Filinjuk – Vinnicja: UNIVERSUM-Vinnicja, 2006. – 456s. – ISBN 966-641-198-9.
2. Winncy Y. D. Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies / Y. D. Winncy – CRC. Press. Talor and Francis Group, – 2014. – 408 p. – ISBN 978-1439812440.
3. Patent Ukraini na korisnu model' №46280, MPK (2009.01) G01R 27/28. Induktivnij negasensor z chastotnim vihodom / M. A. Filinjuk, O. O. Lazarev, O. V. Vojcehovs'ka, S. V. Miroshnikova; zajavnik ta patentovlasnik Vinnic'kij nacional'nij tehnicnij universitet – №200907621; zajavl. 20.07.2009; opubl. 10.12.2009, Bjul. №1.
4. Patent Ukraini na korisnu model' №54019, MPK (2006.01) G01R 27/28. Induktivnij negasensor mostovogo tipu / O. V. Vojcehovs'ka, O. O. Lazarev, M. A. Filinjuk, D. V. Kudrjashov; zajavnik ta patentovlasnik Vinnic'kij nacional'nij tehnicnij universitet – №201004679; zajavl. 20.04.2010; opubl. 25.10.2010, Bjul. №20.
5. Filinjuk M. A. Analiz chutlivosti elektrichnih kil z L-, S-negatronami / M. A. Filinjuk, O. O. Lazarev // Visnik ZhITI. – 2003. – № 2. – S. 92-98.
6. Filinjuk M. A. Chastotni datchiki na L-, C- negatronah Filinjuk M. A., Lazarev O. O. Lobodzins'ka R. F. // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. – 2004. – № 1. – S. 84–89.
7. Filinjuk M. A. LC-negatroni ta ih zastosuvannja: monografija / M.A. Filinjuk, O.O. Lazarev, O.V. Vojcehovs'ka – Vinnicja VNTU, 2012. – 308 s. ISBN 978-966-641-452-9

Рецензія/Peer review : 4.12.2014 р.

Надрукована/Printed :26.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Білинський Й. Й.