

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НА ОСНОВІ RL-ДІОДНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНО- ХАОТИЧНИХ КОЛИВАНЬ

Анотація

В роботі проведено огляд засобів моніторингу деформації контрольованих об'єктів, зокрема тензорезистивних перетворювачів, визначено їх типи та характеристики, здійснено дослідження генератора детерміновано-хаотичних коливань. Доведено, що використання вимірювального перетворювача на основі RL-діодного генератора хаотичних коливань дозволяє помітно збільшити чутливість при вимірюванні малих значень деформації.

Ключові слова: тензорезистивний перетворювач, генератор детерміновано-хаотичних коливань, чутливість.

Abstract

The paper reviews tensor-resistance transducers, determines their types and characteristics, the study of the generator of deterministic-chaotic oscillations was carried out, the sensitivity of the RLD generator of deterministic-chaotic oscillations was investigated.

Keywords: tensor-resistance transducers, generator of deterministic-chaotic oscillations, sensitivity

Вступ

В умовах бурхливого розвитку науки і техніки надзвичайно важливе значення в наш час має застосування прогресивних методів та засобів систем управління, контролю, вимірювання технологічних параметрів, зокрема, ефективного моніторингу деформацій, руйнування контрольованих важливих стратегічних об'єктів [1].

Сучасні електричні методи вимірювання та контролю деформації використовують перетворювачі сили, які реєструють деформацію пружного елемента під впливом сили діяння та перетворюють її в електричний сигнал.

Переважає більшість вагових систем і дозуючих пристроїв будуються на базі тензорезисторних перетворювачів (ТРП).

Головними перевагами ТРП є висока лінійність змінювання опору від деформації та розвинута технологія виробництва тензорезисторів. Основним недоліком сенсорів такого типу є низький вихідний сигнал, який важко виміряти з високою точністю [2].

Актуальність роботи

Для забезпечення необхідних метрологічних характеристик важливо мати на практиці можливість фіксувати достатньо малі зміни інформативного сигналу. Натомість, це призводить до шкідливого спотворювального впливу на корисний сигнал збурювальних завад, внаслідок чого збільшується віроємність випадкових похибок вимірювання.

Тому, заходи підвищення чутливості засобу вимірювання з одночасним забезпеченням зниження рівня збурювальних факторів, є надзвичайно актуальним завданням.

Метою даної роботи є підвищення ефективності засобу моніторинга деформації контрольованого об'єкту. Під ефективністю розглядається підвищення чутливості ТРП та зменшення похибки вимірювання деформації.

Для досягнення поставленої мети було передбачено вирішити ряд визначених задач: провести літературний пошук тензорезистивних перетворювачів, визначити їх типи та характеристики; здійснити дослідження генератора детерміновано-хаотичних коливань; дослідити чутливість RL-діодного генератора детерміновано-хаотичних коливань.

Об'єктом досліджень є процес удосконалення методу вимірювання незначних контрольованих деформацій тензорезистивним перетворювачем на основі RL-діодного генератора детерміновано-хаотичних коливань [3].

Предметом досліджень є тензорезистивний перетворювач на основі RL-діодного генератора детерміновано-хаотичних коливань.

Методи дослідження - використано теоретичні та експериментальні методи досліджень, що ґрунтуються на загальній теорії вимірювання, теорії вимірювальних сигналів, методах імітаційного моделювання, теорії детермінованого хаосу, методів розв'язання диференційних рівнянь, теорії електричних кіл та сигналів.

Впровадження результатів досліджень дозволить ефективно моніторити та визначати рівень деформацій, руйнування контрольованих важливих об'єктів.

Аналіз стану питання дослідження

Основним елементом означених систем, є сенсор сили, який працює за принципом перетворення сили в електричний сигнал, що відповідає деформації контрольованого об'єкта.

Сенсор сили складається з таких основних частин (рис. 1):

- пружного елемента;
- пристроїв кріплення і силовведення;

- перетворювача, що міцно скріплений із пружним елементом, деформується разом із ним і здійснює перетворення деформації в електричний сигнал.

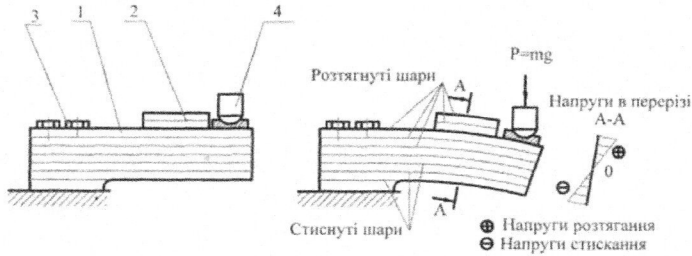


Рис. 1. Схема сенсора сили: 1 – пружний елемент; 2 – перетворювач (чутливий елемент); 3 – елементи кріплення; 4 – елементи силового введення; P – сила впливу, m

Розходження в пристроях вимірювання маси і сили полягає тільки в способі їх калібрування – в одиницях сили або в одиницях маси, натомість, принцип перетворення однаковий: сила (включаючи силу ваги) \rightarrow деформація \rightarrow електричний вихідний сигнал[2].

Залежно від фізичних принципів, що використовують перетворювачі, у ваговимірювальній техніці, на сьогодні застосовується основні типи сенсорів сили:

- 1) тензорезисторні сенсори сили. У перекладі з латинської «тензо» – сила. Чутливим елементом таких сенсорів є тензорезисторний перетворювач (ТРП), електричний опір якого є пропорційним деформації пружного елемента;
- 2) віброчастотні сенсори сили. Їхня дія заснована на зміні частоти чутливого елемента, установленного на пружному елементі, залежно від деформації пружного елемента під час прикладення до нього сили. У ваговимірювальних системах, зараз використовуються віброчастотні сенсори сили із чутливими елементами двох видів:
 - а) віброчастотні струнні сенсори. Їх дія заснована на зміні частоти натягнутої металевої струни, що установлена на пружному елементі та залежить від величини сили, прикладеної до нього;
 - б) п'єзокварцові тензосенсори сили. Такий сенсор діє за принципом зміни частоти кварцового кристала, механічно пов'язаного з пружним елементом, під впливом прикладеної до нього сили.

Основна частина

Тензорезистивні перетворювачі широко використовуються на даний час для вимірювання механічних величин, таких як сила, маса, деформація, тиск [4].

Принцип дії перетворювача ГДХК заснований на використанні тензоре-

зистивного ефекту, сутність якого полягає в зміні активного опору провідників і напівпровідників при їхній механічній деформації. Під дією інформативного параметра (зусилля Q) мембрана деформується, що, в свою чергу, викликає зміну опору $\Delta R = \frac{Q}{S}$, де S – чутливість тензорезистивного перетворювача [Г/Ом].

На Рис. 2 – представлена статична характеристика перетворювача на основі ГДХК, яка свідчить про лінійну залежність опору чутливого елементу від прикладеного зусилля. На Рис. 3 – представлена залежність чутливості тензорезистивного перетворювача на основі ГДХК від прикладеного зусилля.

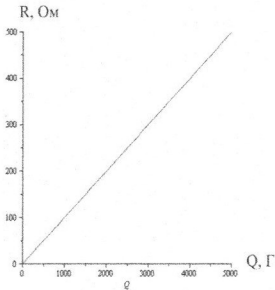


Рис. 2. Статична характеристика

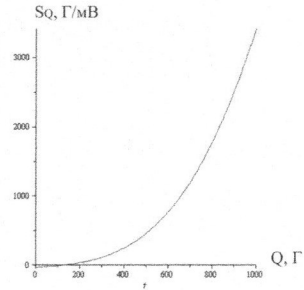


Рис. 3. Графік чутливості тензорезистивного перетворювача на основі ГДХК

Дослідження чутливості напівпровідникового перетворювача, RL-діодного ГДХК

Електричне коло напівпровідникового перетворювача, RL-діодного ГДХК (рис. 4) буде поводитись по-різному в залежності від напівперіоду напруги живлення: перший режим – коли струм через діод протікає в прямому напрямку, та другий режим – коли струм через діод протікає у зворотному напрямку.

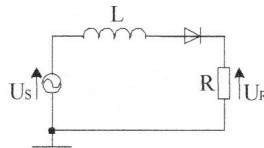


Рис. 4. Схема напівпровідникового перетворювача, RL-діодного ГДХК

Еквівалентна схема RL-діодного ГДХК при прямому напрямку струму буде мати наступний вигляд (рис. 5)

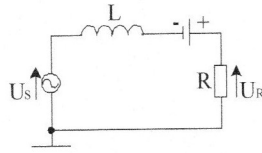


Рис. 5. Еквівалентна схема RL-діодного ГДХК при прямому напрямку струму

Протягом часу протікання струму через діод у прямому напрямку діод діє як фіксоване зміщення напруги. За законом Кірхгофа для напруги записується перше диференціальне рівняння

$$L \frac{dI}{dt} + R \cdot I = V_0 \cdot \sin \omega t + V_f \quad (1)$$

де V_0 – пікова амплітуда змінної вхідної напруги; V_f – пряме падіння напруги діода.

Еквівалентна схема RL-діодного ГДХК при зворотному напрямку струму буде мати наступний вигляд (рис. 6)

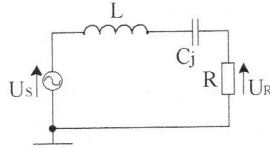


Рис. 6. Еквівалентна схема RL-діодного ГДХК при зворотному напрямку струму

Розв'язком цього рівняння відносно струму $I(t)$ є:

$$I(t) = e^{-\frac{Rt}{L}} \cdot I(0) + \frac{V_f(1 - e^{-\frac{Rt}{L}})}{R} + \frac{V_0[R \cdot \sin(\omega t) + L \cdot \omega \cdot (e^{-\frac{Rt}{L}} - \cos(\omega t))]}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (2)$$

При нульовій початковій умові розв'язок рівняння (1) прийме вигляд

$$I(t) = \frac{V_f \cdot (1 - e^{-\frac{Rt}{L}})}{R} + \frac{V_0}{z_a^2} \cdot [R \cdot \sin(\omega t) + L \cdot \omega \cdot (e^{-\frac{Rt}{L}} - \cos(\omega t))] \quad (3)$$

де $z_a = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ – опір прямого зміщення електричного кола.

Протягом часу протікання струму через діод у зворотному діод поводить-ся як конденсатор із ємністю, рівною його ємності переходу. Використовуючи

закон Кірхгофа для напруг, можна отримати друге диференційне рівняння

$$L \cdot \frac{d^2 I}{dt^2} + R \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{1}{c_j} \cdot I = V_0 \cdot \omega \cdot \sin \omega t \quad (4)$$

Розв'язок рівняння (4) відносно $I(t)$:

$$I(t) = \exp\left[-\frac{1 - \sqrt{R^2 c_j^2 - 4Lc_j + Rc_j}}{2L \cdot c_j} t\right] \cdot c_2 + \exp\left[-\frac{1 + \sqrt{R^2 c_j^2 - 4Lc_j + Rc_j}}{2L \cdot c_j} t\right] \cdot c_1 - \frac{V_0 \cdot \omega \cdot c_j (Rc_j \cdot \cos(\omega t) \cdot \omega - \sin(\omega t) + \sin(\omega t) \cdot \omega^2 c_j L)}{1 - 2Lc_j \omega^2 + \omega^4 c_j^2 L^2 + \omega^2 c_j^2 R^2}, \quad (2.13)$$

де c_1, c_2 – константи інтегрування, які можуть бути знайдені, використовуючи початкові умови електричного кола.

При нульових початкових умовах розв'язок рівняння (5) запишеться як:

$$I(t) = \frac{2 \cdot z_3}{(R^2 c_j - 4L)} \cdot [\exp(-\frac{1 - z_1 + Rc_j}{2Lc_j} \cdot t) - \exp(-\frac{1 + z_1 + Rc_j}{2Lc_j} \cdot t)] - \frac{V_0 \omega c_j (Rc_j \cdot \cos(\omega t) \omega - \sin(\omega t) + \sin(\omega t) \cdot \omega^2 c_j L)}{1 - 2Lc_j \omega^2 + \omega^4 c_j^2 L^2 + \omega^2 c_j^2 R^2}, \quad (6)$$

$$\text{де } z_1 = \sqrt{R^2 c_j^2 - 4Lc_j};$$

$$z_2 = 2 \cdot L^2 \cdot c_j \cdot \omega^2 - 2 \cdot L + R^2 \cdot c_j - R \cdot z_1;$$

$$z_3 = z_1 \cdot c_j \cdot V_0 \cdot \omega^2 \cdot L^2.$$

Рівняння (1) та (4) можна розв'язати також відносно напруг U_R . При цьому (1) і (4) запишуться відповідно як

$$\begin{cases} \frac{L}{R} \frac{dU_R}{dt} + U_R = V_0 \sin \omega t + V_f; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{L}{R} \frac{d^2 U_R}{dt^2} + \frac{dU_R}{dt} + \frac{U_R}{c_j R} = V_0 \sin(\omega t) \omega. \end{cases} \quad (8)$$

При нульових початкових умовах розв'язки рівнянь (7) та (8) матимуть вигляд:

Для рівняння 7):

$$U_R(t) = -\frac{V_f \omega^2 L^2 + V_f R^2 - V_0 \omega R L}{z_a^2} \cdot \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) + \frac{-RV_0 \omega L \cos(\omega t) + R^2 V_0 \sin(\omega t) + V_f R^2 + V_f \omega^2 L^2}{z_a^2}; \quad (9)$$

Для рівняння (8):

$$U_R(t) = \frac{2 \cdot z_3}{(R^2 c_j - 4L) \cdot z^2} \cdot [\exp(-\frac{1}{2} \cdot \frac{-z_1 + Rc_j}{Lc_j} t) - \exp(-\frac{1}{2} \frac{z_1 + Rc_j}{Lc_j} t)] - \frac{V_0 \omega c_j (Rc_j \omega \cos(\omega t) - \sin(\omega t) + \sin(\omega t) \omega^2 c_j L)}{1 - 2Lc_j \omega^2 + \omega^4 c_j^2 L^2 + \omega^2 c_j^2 R^2}, \quad (10)$$

де

$$z_1 = \sqrt{R^2 c_j^2 - 4Lc_j}$$

$$z_2 = 2L^2 c_j \omega^2 - 2L + R^2 c_j - R \cdot z_1$$

$$z_3 = z_1 c_j R V_0 \omega^2 L^2$$

Оскільки коефіцієнти в експонентах приймають великі значення, а самі експоненти прямують до нуля, в рівняннях (9), (10) можна знехтувати відповідними компонентами. Тоді рівняння (9), (10) запишуться:

$$\begin{aligned} U_{R1}(t) &= \frac{1}{z_a^2} \cdot [V_f^2 (R^2 + \omega^2 L^2) + R V_0 (\omega L \cos(\omega t) + R \sin(\omega t))] = \\ &= \frac{1}{z_a^2} \cdot [V_f^2 \cdot z_a^2 + R V_0 (\omega L \cos(\omega t) + R \cdot \sin(\omega t))] = \\ &= V_f^2 + \frac{R V_0}{z_a^2} (\omega L \cos(\omega t) + R \sin(\omega t)). \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} U_{R2}(t) &= \frac{V_0 \omega c_j (-Rc_j \omega \cos(\omega t) + \sin(\omega t)(1 - \omega^2 c_j L))}{1 - 2Lc_j \omega^2 + \omega^4 c_j^2 L^2 + \omega^2 c_j^2 R^2} = \\ &= \frac{V_0 \omega c_j (\sin(\omega t)(1 - \omega^2 c_j L) - Rc_j \omega \cos(\omega t))}{1 + \omega^2 c_j (c_j R^2 - 2L) + \omega^4 c_j^2 L^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Чутливість рівнянь перетворення (11) і (12) відносно вхідного параметру визначиться:

$$\begin{aligned} \frac{dU_{R1}}{dR} &= \frac{V_0}{R^2 + \omega^2 L^2} \cdot [\omega L \cos(\omega t) + R \sin(\omega t) - 2R^2 (\omega L \cos(\omega t) + R \sin(\omega t)) + \\ &+ R \sin(\omega t)] = \frac{V_0}{R^2 + \omega^2 L^2} \cdot [(\omega L \cos(\omega t) + R \sin(\omega t)) \cdot (1 - 2R^2) + R \sin(\omega t)]. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_{R2}}{dR} &= -V_0 \omega^2 c_j^2 \cdot \left[\frac{\cos(\omega t)}{1 + \omega^2 c_j (R^2 c_j - 2L) + \omega^4 c_j^2 L^2} + \right. \\ &\left. + \frac{2\omega c_j R ((1 - Lc_j \omega^2) \sin(\omega t) - Rc_j \cos(\omega t))}{(1 + \omega^2 c_j (R^2 c_j - 2L) + \omega^4 c_j^2 L^2)^2} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Порівняльний аналіз амплітудних значень напруг отриманих рівнянь чутливості (13) і (14) показав, що $\frac{dU_{R1}}{dR} > \frac{dU_{R2}}{dR}$, тому для подальших досліджень

вибране рівняння (13).

Результат чисельного моделювання функції перетворення 9) при роботі схеми генератора детерміновано-хаотичних коливань при прямому напрямку струму через діод представлено на рис. 7.

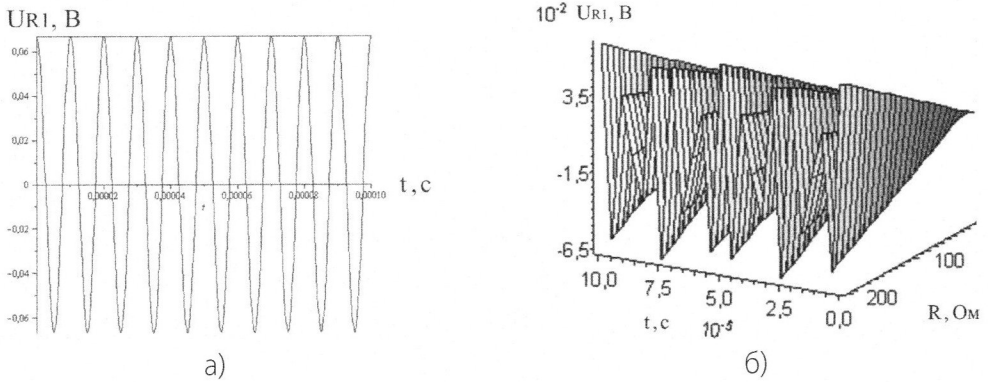


Рис. 7. Результат чисельного моделювання функції перетворення:
а) осцилограма і огибаюча сигналу; б) залежність U_{R1} від R та t

Аналіз результатів чисельного моделювання функції перетворення даного графіку доводить, що амплітудне значення напруги на резисторі $U_{R1}(t)$ змінюється практично лінійно від величини резистора R .

Отже, застосування амплітудного (пікового) детектора до коливального сигналу $U_{R1}(t)$, дозволяє реалізувати лінійний перетворювач опору в напругу.

Недостатньо дослідженим на сьогодні є застосування властивостей хаотичних систем у вимірюваннях [3]. Використання генератора хаотичних коливань як вимірювального перетворювача для отримання вимірювальної інформації дає змогу суттєво підвищити чутливість засобів вимірювань, оскільки в нелінійних хаотичних системах найбільш сильна залежність процесу від параметрів системи виникає саме в режимі хаотичних коливань [3, 4].

Структурна схема перетворювача складається з двох частин: нелінійної вимірювальної схеми, до якої підключений тензосенсор, і синхронного детектора (рис. 8).

Використання генератора детерміновано-хаотичних коливань (ГДХК) як вимірювального перетворювача для отримання вимірювальної інформації дозволяє суттєво підвищити чутливість засобу вимірювання, оскільки в нелінійних хаотичних системах найбільш сильна залежність процесу від параме-

трів системи виникає саме в режимі хаотичних коливань [4,5].

Вимірювальний перетворювач, в основі якого лежить генератор хаотичних коливань, є коливальною системою зі складною динамікою.

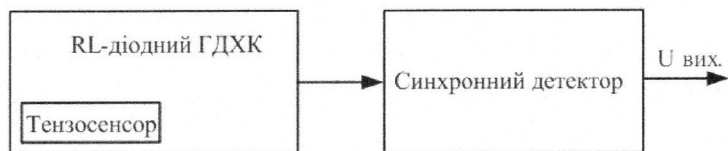


Рис. 8. Структурна схема тензорезистивного перетворювача на основі RL-діодного ГДХК

Схема включає в себе всього два лінійні елементи (тензорезистор R1 і індуктивність L1) і один нелінійний елемент (діод D1). При виборі величин елементів схеми перетворювача на основі RL-діодного генератора детерміновано-хаотичних коливань необхідно враховувати не тільки можливість попадання в зону хаосу, але також сусідство з іншими коливальними режимами. Схема RL-діодного генератора детерміновано-хаотичних коливань наведена на рис.9.

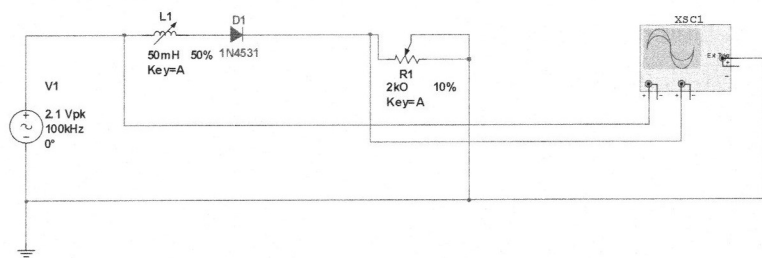


Рис. 9 – Принципова схема RL-діодного ГДХК

Створено макетний зразок схеми RL-діодного генератора детерміновано-хаотичних коливань ($R=2$ кОм, $L=4,7$ мГн, $D - 1N4531$), а також схеми синхронного детектора. Для реалізації перетворення опору в постійну напругу на вихід генератора детерміновано-хаотичних коливань підключено синхронний детектор. Як первинний вимірювальний перетворювач використано тензорезистор R1.

Висновки

Вирішено ряд поставлених задач: розглянуто сучасні засоби вимірювання та контролю деформації важливих об'єктів і методи підвищення ефективності моніторингу деформації. Проаналізовано можливості удосконалення методу вимірювання та контролю деформацій низького рівня, заходи підвищення

чутливості перетворювачів сили та зменшення похибки вимірювання та моніторингу деформації об'єктів, що є надзвичайно **актуальним**.

Досліджено тензорезистивний перетворювач на основі RL-діодного генератора детерміновано-хаотичних коливань.

Доведено, що використання вимірювального перетворювача на основі RL-діодного генератора хаотичних коливань дозволяє помітно збільшити чутливість при вимірюванні малих значень деформації. Аналіз результатів чисельного моделювання функції перетворення перетворювача доводить, що амплітудне значення інформативного сигналу змінюється практично лінійно від величини зусилля. Отже, застосування амплітудного (пікового) детектора до коливального сигналу, дозволяє реалізувати лінійний перетворювач зусилля в напругу.

Впровадження результатів досліджень дозволить ефективно моніторити та визначати рівень деформацій та руйнування контрольованих важливих стратегічних об'єктів.

Список використаної літератури

1. Васюра А.С. Елементи та пристрої систем управління і автоматики, Навч. посібн. // Вінниця, ВНТУ, 2013. – 157 с.
2. Семенюк Д. П. Торговельне обладнання: підручник у 2 ч. Ч. 2 / Д. П. Семенюк, В. О. Потапов; ХДУХТ. – Х., 2016. – 316 с.
3. Осадчий Е. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Осадчий Е. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
4. Кучерук В.Ю. Про основні принципи створення вимірювальних пристроїв з використанням генераторів хаотичних коливань/ В. Ю. Кучерук, В. М. Севастьянов, В. С. Маньковська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. - № 2. – С. 101–104.
5. Кучерук В.Ю. Тензорезистивний перетворювач на основі RL-діодного генератора хаотичних коливань/ Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Маньковська В.С.// Контроль і управління в складних системах: XI Міжнародна конференція КУСС-2012, 9–11 жовтня, 2012 р.: тези доповіді. – Вінниця, 2012. – С.59.
6. Кучерук В.Ю. Дослідження чутливості RL-діодного генератора детерміновано-хаотичних коливань/ Кучерук В.Ю., Маньковська В.С. // Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: II Міжнародна науково-практична конференція, 28–30 травня, 2015 р.: тези доповіді. – Львів, 2015. – С. 206–207.

1. Васюра А.С. Елементи та пристрої систем управління і автоматики. Навч. посібн. // Вінниця, ВНТУ, 2013. - 157 с.
2. Семенюк Д.П. Торгівельне обладнання: підручник у 2 ч. Ч. 2 / Д.П. Семенюк, В.О. Потапов; ХЛУХТ. - Ч., 2016. - 316 с.
3. Осадчий Е. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Осадчий Е. - М.: Машиностроение, 1979. - 480 с.
4. Кучерук В.Ю. Про основні принципи створення вимірювальних пристроїв з використанням генераторів хаотичних коливань / В.Ю. Кучерук, В.М. Севастьянов, В.С. Маньковська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2011. - №2. - с.101-104.
5. Кучерук В.Ю. Тензорезистивний перетворювач на основі RL-діодного генератора хаотичних коливань / Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Маньковська В.С. // Контроль і управління в складних системах: XI Міжнародна конференція КУСС-2012, 9-11 жовтня 2012 р.: тези доповіді. - Вінниця, 2012, с. 59.
6. Кучерук В.Ю. Дослідження чутливості RL-діодного генератора детерміновано-хаотичних коливань / Кучерук В.Ю., Маньковська В.С. // Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи // Міжнародна НТК, 28-30 травня 2015 р.: тези доповіді. - Львів, 2015. - с. 206-207.