

УДК 621.382

Л. Б. ЛІЩИНСЬКА, С. В. МІРОШНИКОВА, М. А. ФІЛІНЮК

## ГЕНЕРАТОРНІ СЕНСОРИ НА БАЗІ НЕГАТРОНІВ

*Вінницький національний технічний університет,  
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна*

**Анотація.** Сформовані вимоги і розглянені технічні рішення побудови генераторних сенсорів на базі негатронів.

**Аннотация.** Сформулированы требования и рассмотрены новые технические решения построения генераторных сенсоров на базе негатронов.

**Annotation.** Requirements of construct negatron-based generating sensors were formed and technical solutions of construct negatron-based generating sensors were examine.

**Ключові слова:** активний вимірювальний перетворювач, генераторний сенсор, узагальнений перетворювач імітансу, негатрон, помножувач індуктивності, чутливість.

### ВСТУП

Одним з широко використовуваних перетворювачів неелектричної величини в електричну є генераторні сенсори. Вони знаходять застосування при створенні газових аналізаторів [1], сенсорів освітлення [2], медичних сенсорів [3] і ін. Їх найважливішим параметром є чутливість, що характеризується залежністю приросту генерованої частоти від зміни величини фізичної дії. Істотного збільшення чутливості можна досягти за рахунок використання в них негатронів, що працюють в автогенераторному режимі, – активних вимірювальних перетворювачів. Формування вимог до таких сенсорів і пошук нових технічних рішень є актуальним завданням, що частково вирішується в даній роботі.

### КЛАСИФІКАЦІЯ І ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО ГЕНЕРАТОРНИХ СЕНСОРІВ НА БАЗІ НЕГАТРОНІВ

Активний вимірювальний перетворювач (АВП) – це пристрій, який об'єднує в собі чутливий елемент та активні елементи підсилення, перетворення або генерації. Об'єднання цих функцій в АВП не реалізується звичайним послідовним з'єднанням сенсора, узгоджувального та підсилювального елементів, а забезпечується електрично єдиним функціональним пристроєм.

АВП – інтегральний пристрій, тому поділити його на активну і пасивну частини неможливо.

Інтеграція сенсора, узгоджувального елемента та пасивних елементів дозволяє:

- Підвищити точність вимірювань;
- Зменшити розміри вимірювального перетворювача;
- Розширити діапазон вимірювальних величин;
- Розширити робочий частотний діапазон вимірювальних перетворювачів;
- Покращити узгодження вимірювального перетворювача.

В більшості випадків АВП дозволяє реалізувати одночасно декілька з вказаних переваг. Переваги АВП найкращим чином виявляються в надвисокочастотному діапазоні, де функції узгодження та підсилення практично важко поділити.

В якості активних елементів можуть бути використані практично будь-які активні елементи: тунельні і лавинно – прольотні діоди або транзисторні схеми, але застосування комбінованих динамічних негатронів дозволяє покращити ряд технічних параметрів.

В залежності від режиму роботи активного елемента АВП можна поділити на генераторні, підсилюючі та детекторні [4].

Генераторні АВП виконують безпосереднє перетворення механічної або іншої енергії в енергію електричного сигналу керування та дозволяють легко перетворювати його в цифрову форму.

На базі автогенераторів реалізуються різні види генераторних сенсорів. Автогенератори в сенсорах використовуються в таких випадках:

1. сигнал від автогенератора подається на одну з діагоналей мостової схеми, в одне або декілька плечей якої включаються сенсори (чутливі елементи), а з другої діагоналі моста знімається вихідний сигнал. Сенсор може бути резистивним, ємнісним або індуктивним;
2. сигнал від автогенератора подається на коло, яке складається з послідовного з'єднання сенсора та еталонного резистора, з якого знімається вихідний сигнал;
3. сенсори включаються в схему автогенератора та визначають його частоту. В цьому випадку сенсором може служити і резонатор.

Сенсор та автогенератор, реалізовані як єдина конструкція, представляють собою трансдюсер (перетворювач). Якщо до трансдюсера додати схему індикації, то вийде схема трансмітера. Всі генераторні сенсори на базі транзисторних негатронів можна розділити на дві групи: які використовують схемотехнічні аналоги транзисторних негатронів та які використовують комбіновані транзисторні негатрони.

Методи та засоби реалізації першої групи сенсорів узагальнені в роботах [5-8]. Такі сенсори мають хорошу передбачуваність та керованість характеристик. Однак, внаслідок впливу паразитних зворотних зв'язків частотний діапазон їх роботи не перевищує 1-2 ГГц.

В більшості схемотехнічних аналогів негатронів одночасно реалізується додатний зворотний зв'язок як за змінним, так і за постійним струмами. Це вносить значні технічні труднощі забезпечення їх температурної стабільності. Вказаний недолік відсутній в динамічних транзисторних негатронах. Тому віддають перевагу генераторним сенсорам, реалізованим на їх основі. Крім того, такі сенсори здатні працювати на частотах в декілька десятків гігерц, що забезпечує більш високе значення коефіцієнта перетворення.

За видом величини, що вимірюється (перетворюється), розрізняють АВП положення, швидкості, прискорення, тиску, температури та інших фізичних параметрів [9].

За принципом дії розрізняють АВП опору: потенціометричні, тензометричні, фоторезисторні та терморезисторні; АВП індуктивності та взаєміндуктивності: індуктивні, індукційні, селсини, мікросини, трансформатори, що обертаються; АВП магнітоіндукційні: тахогенератори постійного та змінного струму; ємнісні та ін.

До сенсорів висуваються такі вимоги [10, 11]:

- висока динамічна точність, яка заключається в тому, що формування сигналу повинно виконуватися з мінімальним спотворенням. Ця вимога означає, що сенсор повинен мати таку передавальну функцію, яка в межах смуги пропускання об'єкта керування та контролю зводилася б до постійної величини;
- висока статична точність роботи;
- висока надійність при роботі в умовах, які визначаються тактико-технічними вимогами;
- допустимі габарити й маса;
- достатньо високий коефіцієнт перетворення, який забезпечує реагування сенсора на відносно невеликі розузгодження між потрібними та дійсними значеннями керованої величини;
- достатньо висока потужність вихідного сигналу.

Відповідно до наведених вимог при розробці АВП різних типів необхідно приділити увагу таким питанням:

- статичній характеристиці АВП та її вигляду;
- чутливості АВП або коефіцієнту перетворення;
- роздільній здатності;
- шумам, які генеруються АВП;
- максимальній потужності вихідного сигналу;
- потужності вхідного сигналу АВП;
- динамічним характеристикам.

При створенні генераторних АВП на базі негатронів також виникає задача вибору виду негатрона. Двоелектродні негатрони мають гірші функціональні можливості порівняно з багатоелектродними. А статичні негатрони мають більш високу температурну нестабільність, оскільки на фізичному рівні в них використовується додатний зворотний зв'язок як за змінним, так і за постійним струмом, що не дає можливості використовувати схеми термостабілізації.

Виходячи з вищесказаного, рекомендуються такі критерії вибору елементів генераторних АВП:

1. необхідно використовувати багатоелектродний динамічний негатрон;
2. активні елементи повинні мати мінімальну споживану потужність;
3. повинна забезпечуватися максимальна функція передачі;
4. схемні рішення повинні передбачати введення від'ємних зворотних зв'язків за постійним струмом з

метою підвищення температурної та динамічної стабільності.

Виходячи зі сформованих критеріїв в якості базового елемента вибраний нелінійний транзисторний негатрон динамічного типу та на його основі реалізовано різні види генераторних АВП.

### СХЕМОТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ І ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ

Простий індуктивний сенсор (рис.1) представляє собою узагальнений перетворювач імпедансу, що реалізовується на транзисторі із загальним стоком, який перетворює опір індуктивності  $L1$  у вихідний опір  $Z_{BC} = -\text{Re} Z_{BC} + j \cdot \text{Im} Z_{BC}$ .

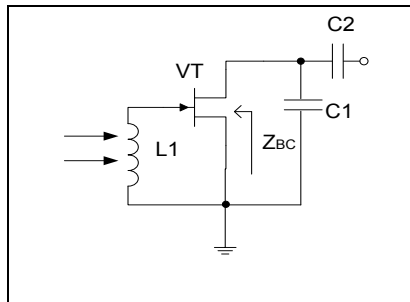


Рис. 1. Індуктивний сенсор (ланцюг живлення не показано)

Наявність негативного активного опору ланцюга витік-стік польового транзистора забезпечує роботу схеми в режимі генератора гармонійних коливань на частоті  $f_0 = 1/2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C1 \cdot L1 \cdot T_k}$ , де  $T_k$  - зворотний коефіцієнт конверсії узагальненого перетворювача імпедансу, реалізованого на транзисторі VT. Чутливість такого перетворювача пропорційна коефіцієнту компенсації втрат [12]. Обмеженням зростання чутливості є зростання його режимної та температурної нестабільності.

Більш стабільним і з більш високою чутливістю є активний сенсор, представлений на рис.2 [13].

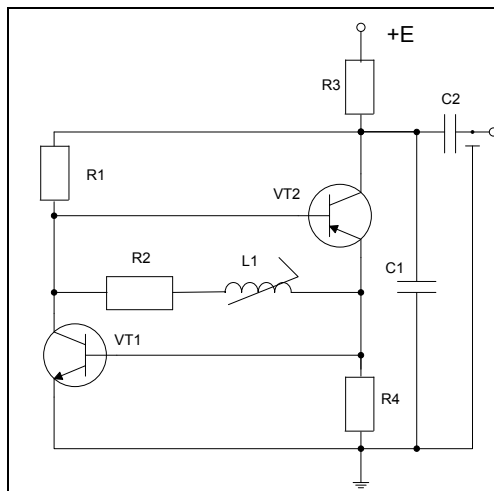


Рис. 2. Мостовий автогенераторний сенсор індуктивності

Еквівалентна індуктивність, що виникає між емітером і колектором першого транзистора, та еквівалентна індуктивність, яка виникає між емітером та колектором другого транзистора, утворюють з резонансною ємністю  $C1$  коливальний контур. Зміна вимірювальної індуктивності  $L1$  приводить до одночасної зміни еквівалентної індуктивності між емітером та колектором як першого, так і другого транзисторів. В результаті збільшується зсув частоти генерованих коливань при зміні еквівалентної індуктивності. Збільшення зсуву резонансної частоти також обумовлено тим, що еквівалентна індуктивність кожного з транзисторів змінюється більше при зміні індуктивності  $L1$ , ніж при зміні опору  $R2$  в колі зворотного зв'язку. В результаті чутливість перетворювача зростає.

Вдвічі більшу чутливість має генераторний сенсор, зображений на рис. 3.

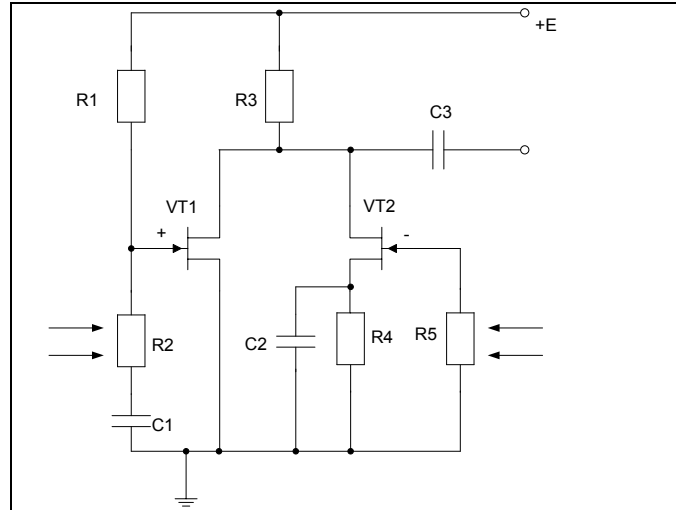


Рис. 3. Автогенераторний сенсор на польових транзисторах

На затвор першого транзистора VT1 подається позитивне зміщення від джерела живлення, причому сигнал знімається з сигнальної клеми через розділовий конденсатор C3. В такому режимі затвор польового транзистора VT1 відкритий і його вихідний опір дорівнює:

$$Z_{BC1} = -R2 \cdot (\alpha_0 - 1) + j \cdot R2 \cdot \Omega_T, \quad (1)$$

де  $\alpha_0$  – коефіцієнт передачі по струму;  $\Omega_T = f / f_T$ ;  $f_T$  – гранична частота транзистора VT1 в режимі прямого зміщення на затворі.

Як видно з (1), опір ланцюга витік-стік транзистора VT1 є індуктивним ( $\text{Im}Z_{BC1} > 0$ ) з від'ємною активною складовою ( $\text{Re}Z_{BC1} < 0$ ), що прямо пропорційно залежить від величини опору першого резистивного сенсора R2.

Затвор другого транзистора VT2 за допомогою ланцюга автозміщення C2, R4 і R5 зміщений в зворотному напрямку і провідність між його витоком і стоком дорівнює:

$$Y_{BC2} = D \cdot \omega^2 \cdot R5 + j \cdot \omega \cdot \omega_s \cdot R5 \cdot D = R5 \cdot \omega \cdot D \cdot (\omega + j \cdot \omega_s), \quad (2)$$

де  $\omega_s$  – гранична частота по крутизні;  $D = \xi \cdot S_0 / \omega_s^2 \cdot R_i$ ;  $\xi = C_{C3} / C_{B3}$ ;  $C_{C3}$ ,  $C_{B3}$  – ємності між стоком і затвором і між витоком і затвором відповідно;  $S_0$  – крутизна,  $R_i$  – диференціальний опір між затвором і витоком.

Як видно з (2), провідність ланцюга витік – стік транзистора VT2 є ємнісним ( $\text{Im}Y_{BC2} > 0$ ) з позитивною активною складовою ( $\text{Re}Y_{BC2} > 0$ ), які прямо пропорційно залежать від величини опору другого резистивного сенсора R5.

Індуктивна складова опору першого транзистора VT1 з ємнісною складовою ланцюга витік-стік другого транзистора VT2 забезпечують резонанс струмів в утвореному коливальному контурі на частоті:

$$f_{ген} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{BC1} \cdot C_{BC2}}},$$

де  $L_{BC1} = \text{Im} Z_{BC1} / 2 \cdot \pi \cdot f_{ген}$  – еквівалентна індуктивність ланцюга витік-стік першого транзистора VT1;

$C_{BC2} = 1/2 \cdot \pi \cdot f_{ген} \cdot \text{Im} Z_{BC2}$  – еквівалентна ємність ланцюга витік-стік другого транзистора VT2.

Від’ємний активний опір ланцюга витік-стік першого транзистора VT1 ( $\text{Re} Z_{BC1} < 0$ ) компенсує додатну активну провідність ланцюга витік-стік другого транзистора VT2 ( $\text{Re} Y_{BC2} > 0$ ). При виконанні умови  $\text{Re} Y_{BC2} - \text{Re} Z_{BC1} < 0$  в утвореному коливальному контурі виникають гармонічні коливання з частотою  $f_{\text{дв}}^{\text{дв}}$ , які залежать від еквівалентних індуктивності  $L_{BC1}$  і ємності  $C_{BC2}$  транзисторів, які змінюються пропорційно опорів резистивних сенсорів R2 і R5. Використовуючи в якості резистивних сенсорів терморезистори, реалізуються температурні сенсори. Використовуючи в якості резистивних сенсорів фоторезистори, реалізуються світлочутливі сенсори і т.д.

Враховуючи, що в процесі роботи одночасно зі збільшенням опорів резистивних сенсорів збільшуються еквівалентні індуктивність  $L_{BC1}$  і ємність  $C_{BC2}$  транзисторів, на відміну від генераторного сенсора простого типу, чутливість збільшується в два рази:

$$S_{C_{BC2} \cdot L_{BC1}}^{f_{ген}} = S_{C_{BC2}}^{f_{ген}} + S_{L_{BC1}}^{f_{ген}}.$$

Широкое застосування отримали балансні сенсори (рис.4).

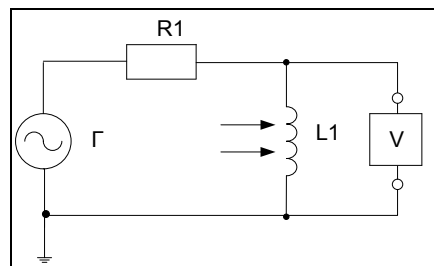


Рис. 4. Балансний сенсор

Для цього сенсора напруга, що знімається з вихідних клем, рівна:

$$U_{np} = \frac{U_2 \cdot |Z_x|}{|Z_{\delta} + Z_x|}, \quad (3)$$

де  $U_2$  – напруга генератора Г напруги;  $|Z_x|$  – комплексний опір перетворювача на основній індуктивності;  $|Z_{\delta}|$  – балансний комплексний опір R1.

З (3) можна вивести формулу для крутизни перетворення:

$$K_{np} = \frac{U_2 \cdot |Z_{\delta}|}{|Z_{\delta} + Z_x|^2}. \quad (4)$$

Для підвищення чутливості такого сенсора в схему вводиться негативна індуктивність, що реалізується за допомогою помножувача постійного струму (рис.5) [14].

Головна індуктивність L1 частково компенсується від’ємною індуктивністю, що реалізується конвертором від’ємного опорів, навантаженого індуктивністю L2, внаслідок чого підвищується

чутливість індуктивного сенсора. Величину від'ємного імпедансу індуктивності  $L_2$  вибирають із міркувань потрібної чутливості перетворення.

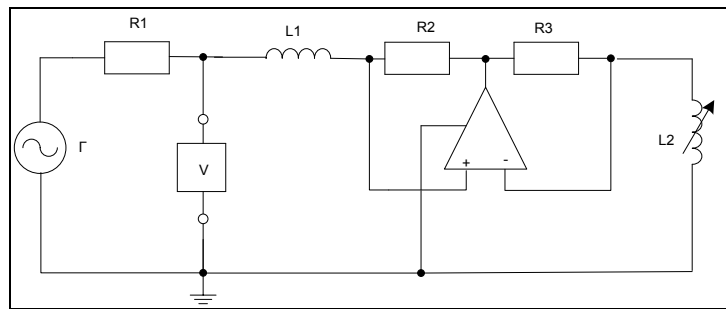


Рис. 5. Індуктивний сенсор, який використовує схемотехнічний аналог від'ємної індуктивності

Для сенсора з від'ємним імпедансом індуктивності, напруга, що знімається з вихідних клем, дорівнює:

$$U_{вих} = \frac{U_2 \cdot |Z_x - Z_{від}|}{|Z_{\delta} + Z_x - Z_{від}|},$$

де  $Z_{від}$  – від'ємний імпеданс комплексного опору.

В цьому випадку крутизна перетворення дорівнює:

$$K_{від} = \frac{U_2 \cdot |Z_{\delta}|}{|Z_{\delta} + Z_x - Z_{від}|^2}. \quad (5)$$

Розділивши (5) на (4), отримаємо формулу збільшення крутизни при використанні від'ємної індуктивності:

$$B = \frac{K_{від}}{K_{np}} = \left| \frac{Z_{\delta} + Z_x}{Z_{\delta} + Z_x - Z_{від}} \right|^2 > 1. \quad (6)$$

Як видно з (6), при використанні негативного імпедансу індуктивності, збільшується крутизна перетворення.

З метою подальшого підвищення чутливості в індуктивний сенсор (рис.5) вводиться помножувач індуктивності (рис.6).

Польовий транзистор VT1 з резисторами R2 і R3 утворюють помножувач індуктивності, за допомогою якого досягається збільшення вимірювальної індуктивності, що в свою чергу призводить до збільшення чутливості індуктивного сенсора. Це можна показати наступним чином. Коефіцієнт помноження індуктивності помножувача індуктивності дорівнює:  $K_L = L_{вих}/L_n$ , де  $L_i$  – помножувана індуктивність;  $L_{вих}$  – помножена індуктивність.

Звідси:

$$L_{вих} = K_L \cdot L_n. \quad (7)$$

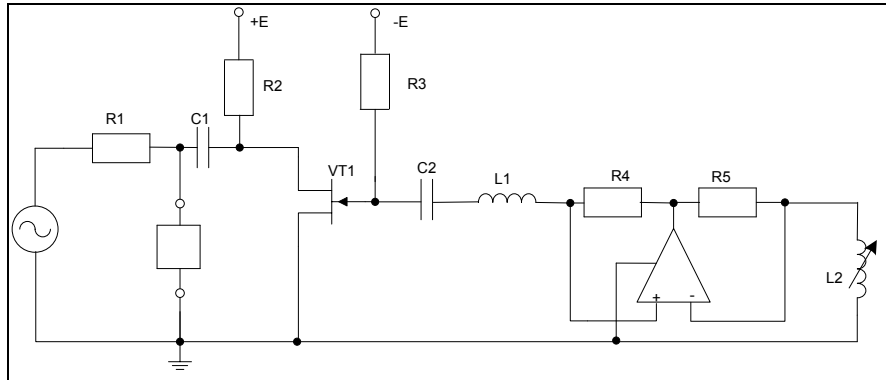


Рис. 6. Індуктивний сенсор з помножувачем індуктивності

З іншого боку:

$$K_L = L_i \cdot \beta + K_{L0}, \quad (8)$$

де  $\beta$  – крутизна нахилу кривої залежності  $K_L$  від  $L_i$ ;  $K_{L0}$  – значення коефіцієнта помноження індуктивності, при якому ми визначасмо  $\beta$ .

З врахуванням (7) і (8) крутизна перетворення дорівнює:

$$S_L = 2 \cdot L_i \cdot \beta + K_{L0}. \quad (9)$$

Якщо  $K_L$  не залежить від  $L_i$ , то  $L_{вих} = K_{L0} \cdot L_H$ . Тоді крутизна перестроювання дорівнює:

$$S_{L0} = K_{L0}. \quad (10)$$

Поділивши (9) на (10), отримаємо значення збільшення крутизни в схемі рис.6 у порівнянні з сенсором, представленим на рис.5:

$$\frac{S_L}{S_{L0}} = 1 + \frac{2 \cdot L_i \cdot \beta}{K_{L0}}.$$

Тобто при використанні помножувача індуктивності збільшується крутизна перетворення, і, відповідно, відбувається підвищенні точності вимірювання неелектричних величин.

В таблиці наведені основні параметри розроблених та відомих автогенераторних перетворювачів індуктивності. Результати, наведені в таблиці, одержані з використанням параметрів транзисторів, виміряних з використанням методик, описаних в [15].

Таблиця 1.

**Основні параметри автогенераторних сенсорів індуктивності**

Найменування параметра	Розмірність	Вид сенсора		
		Рис.1	Рис.5	Рис.6
Частотний діапазон	ГГц	0,01	1-1,5	1-1,5

(продовження таблиці 1)

Коефіцієнт перетворення	$мГц/нГн$	1,2	20	45
Відносна похибка перетворення	%	6	3	4
Споживча потужність	мВт	12	10	10
Температурна нестабільність коефіцієнта перетворення	$мГц/нГн \cdot град^{-1}$	0,12	0,01	0,06

### ВИСНОВКИ

При виборі генераторних сенсорів рекомендується використовувати багатоелектродний динамічний негатрон. Активні елементи повинні мати мінімальну споживану потужність, забезпечувати максимальну функцію передачі. Схемні рішення повинні передбачати введення від'ємних зворотних зв'язків за постійним струмом з метою підвищення температурної та динамічної стабільності.

Крутизна перетворення (чутливість) збільшується при використанні негативного імпедансу індуктивності. Ще більша крутизна перетворення досягається при використанні помножувача індуктивності. Відповідно, відбувається підвищення точності вимірювання неелектричних величин.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Касимов Ф.Д. Газовые анализаторы с частотным выходом / Бабаев Н.А., Негоденко О.Н., Рагимов С.Н. // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе", 1991, Баку. – 52с.
2. Осадчук В.С. Датчики освещенности на основе полупроводниковых структуры с отрицательным сопротивлением / Осадчук А.В. // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе", 1991, Баку. – 90с.
3. Филинюк Н.А. Разработка измерителя внутреннего давления на основе транзисторного преобразователя импеданса / Лютворт С.Г., Шанчук Н.И. // Труды Всесоюзной научно-технической конференции "Вопросы улучшения технических параметров универсальных электроизмерительных приборов", 1979, Житомир. – С.304–306.
4. Молчанов П.А. Основы нелинейной теории транзисторных негатронів. – Вінниця: "УНІВЕРСУМ–Вінниця", 1998. – 207с.
5. Касимов Ф.Д. Микроэлектронные преобразователи на основе негатронных элементов и устройств / Гусинов Я.Ю., Негоденко О.Н., Румянцев К.Е. // – Баку: ЭЛМ, 2001.–236с.
6. Серьезнов А.Н. Электронные устройства на элементах с отрицательным сопротивлением / Степанова Л.Н. // . – М.: Радио и связь, 1992.– 200с.
7. Осадчук А.В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением. – Вінниця: "Континент", 1998.– 130с.
8. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором.– Вінниця: "УНІВЕРСУМ–Вінниця", 2000. – 303с.
9. Подлесный Н.И. Элементы систем автоматического управления и контроля / Рубанов В.Г. // К.: Вища школа, 1982. – 477с.
10. Электрические измерения неэлектрических величин. Под ред. Новицкого П.В. – Л.:Энергия, 1975. – 576с.
11. Кветний Р.Н. Интегральне моделювання динамічних перетворювачів систем управління та автоматики / Бойко О.Р. // Нові технології. Науковий вісник інституту економіки та нових технологій. – 2004. – №3(6). – С.97–101.
12. Филинюк Н.А. Активные СВЧ фильтры на транзисторах. – М.: Радио и связь, 1987. – 124с.
13. Філінюк М.А. Елементи та пристрої автоматики на основі нелинійних властивостей динамічних негатронів / Войцеховська О.В. // – Вінниця: "УНІВЕРСУМ–Вінниця", 2008. – 188 с.
14. Н.А. Филинюк. Индуктивный датчик: А.с. 1629876. СССР, МКИ G 01 R 27/26/ А.И. Никольский, В.Г. Красиленко, В.И. Билык //.– № 4413794/21/ Заявлено 20.04.88/ Оpubл. 23.02.91. бюл №7. –2 с.



15. Філінюк М.А. Метрологічні основи негatronіки / Гаврілов Д.В //.– Вінниця: “УНІВЕРСУМ–Вінниця”, 2006. –188с.

Надійшла до редакції 11.04.2009р.

**ЛІЩИНСЬКА ЛЮДМИЛА БРОНІСЛАВІВНА** – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**ФІЛІНЮК МИКОЛА АНТОНОВИЧ** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**МІРОШНИКОВА СНІЖАНА ВІТАЛІЇВНА** – студент-магістр, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.