

ПОКРАЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ ВІД ПЕРВИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СЕНСОРІВ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

А.О. Семенов¹, О.О. Семенова¹, Д.О. Козін¹

¹ *Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021 Вінниця, Україна, semenov.a.o@vntu.edu.ua, semenova.o.o@vntu.edu.ua, dimakoua@gmail.com*

Анотація

Актуальним напрямком метрології є вимірювання часу та частоти. В обладнанні радіовимірювальних приладів для вимірювання часових і частотних параметрів радіосигналів та/або електричних кіл основним функціональним елементом є електричні фільтри. Саме від якості електричних фільтрів, стійкості їх параметрів і характеристик залежить ефективність функціонування приладів для вимірювання часових і частотних параметрів радіосигналів. При цьому, висувуються окремі вимоги до частотних спотворень та інерційних властивостей інших каскадів оброблення вимірювальних сигналів та елементів і кіл міжкаскадних зв'язків. Тому ефективність здійснення частотної селекції вимірювальних сигналів первинних давачів суттєво залежить від якості електричних фільтрів. Принцип роботи електричних фільтрів заснований на функціональній залежності індуктивного та ємнісного елементів від частоти, а також на фазових співвідношеннях напруги та струму на них. У теперішній час при синтезі та проектуванні електронних схем використовують не тільки додатну але й від'ємну диференціальну ємність. Поняття від'ємної диференційної ємності є особливо зручним при практичній реалізації активних фільтрів, компенсаторів завад, ємнісних датчиків, ємнісних перетворювачів та ін. Метою роботи є збільшення коефіцієнта перекриття по частоті активних фільтрів сенсорів фізичних величин із використанням активних елементів, що мають від'ємне значення диференційної ємності.

Ключові слова: активний фільтр; С-негатрон; від'ємна ємність; вимірювальний сигнал; сенсор.

Вступ

На сучасному етапі розвитку інформаційно-вимірювальної техніки широкого поширення отримали автогенераторні методи та засоби вимірювання параметрів фізичних величин [1]. У практиці радіовимірювань та визначення складу речовини отримав застосування новий клас вторинних параметричних радіовимірювальних перетворювачів, що здійснюють перетворення параметрів фізичних величин у частоту або період повторення вимірювальних сигналів [2]. Перевагами зазначених параметричних радіовимірювальних перетворювачів фізичних величин є висока чутливість, точність, а також високі рівні амплітуд напруги і струму [3].

Радіовимірювальні прилади з частотним поданням вимірюваної інформації мають у своєму складі високопродуктивні схеми частотної селекції електричних сигналів. Основними вимогами до робочих характеристик таких схем є висока добротність при фіксованій настройці центральної частоти, можливість широкосмугового електронного перелаштування та низький рівень розсіювання потужності. При класичного підході до проектування активних фільтрів досягнути одночасного покращення зазначених параметрів можливо шляхом компромісу між ними [1] – [3]. Тому важливою прикладною проблемою при обробці вимірювальної інформації є фільтрація прийнятого сигналу та покращення характеристик смугових фільтрів. Обмеження можливостей схемної реалізації широсмугових активних фільтрів можна подолати за допомогою застосування приладів із від'ємною диференційною ємністю [4], що отримали назву С-негатронів.

Загальним питанням проектування смугових активних RC-фільтрів приділено увагу в роботах [5], [6], в яких розглянуті схеми з використанням одного або декількох операційних підсилювачів (ОП). У схемах на основі одного ОП зазвичай використовуються багатопетльові зворотні зв'язки, за рахунок чого забезпечується зниження чутливості схем до зміни коефіцієнта підсилення підсилювача. Перелаштування по частоті таких схем другого порядку можливо лише при одночасній зміні двох елементів, так як основні параметри схем (добротність, резонансна частота і коефіцієнт передачі) залежать практично від параметрів усіх елементів. Реалізація смугових активних RC-фільтрів на декількох ОП забезпечує найкращі характеристики схем і більш низьку чутливість [5].

Реалізації фільтрів на трьох ОП по методу змінних стану мають дуже хороші характеристики і досить низьку чутливість [6]. Перелаштування параметрів схем другого порядку за частотою можлива за допомогою одного елемента (при відповідному виборі параметрів елементів схем). В авторських свідоцтвах [7] - [9] представлено опис активних смугових RC-фільтрів, реалізованих на ОП. В роботі [7] заявлена схема керованого активного смугового RC-фільтра на основі одного ОП. Для забезпечення сталості коефіцієнта передачі і мінімальної зміни полюсної добротності схеми в ній необхідно підбирати значення регульованого резистора. Діапазон зміни резонансної частоти в цій схемі дуже обмежений, оскільки зміна значення регульованого резистора пропорційно квадрату зміни резонансної частоти фільтра.

Мета роботи

Метою роботи є покращення параметрів активних фільтрів для оброблення вимірювальних електричних сигналів від первинних перетворювачів сенсорів фізичних величин за допомогою використання активних елементів, що мають від'ємне значення диференційної ємності.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо простий смуго-стримувальний фільтр, еквівалентна схема якого наведена на рис. 1.

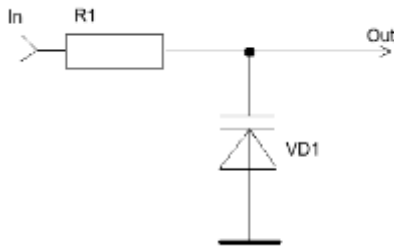


Рис. 1. Еквівалентна схема простого смуго-стримувального фільтра

До недоліків простого смуго-стримувального фільтра можна віднести малий коефіцієнт переналаштування по частоті, що обмежує його

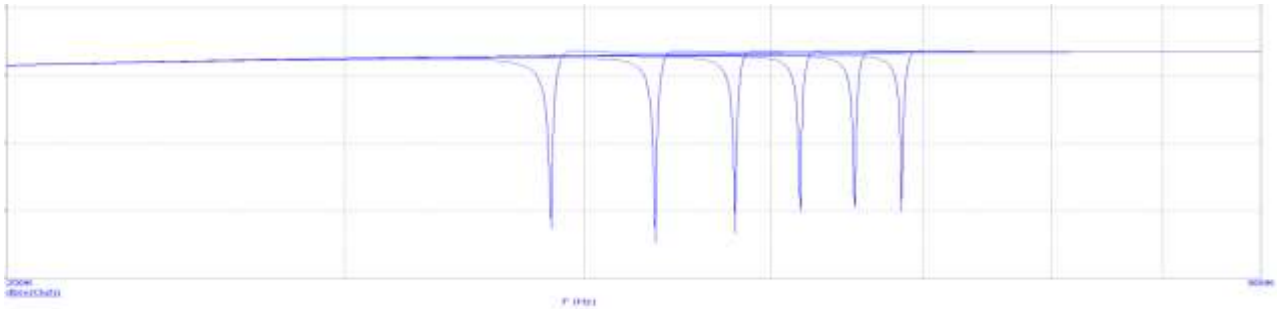


Рис. 2. Графік амплітудно-частотних характеристик простого смуго-стримувального фільтра

Миттєва потужність, що розсіється на від'ємній диференційній ємності, визначається за формулою (2) [12]

$$p_{C^{(-)}} = u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{U_m I_m}{2} \cdot \sin(2\omega t + \pi). \quad (2)$$

У роботі [12] встановлено, що необхідно розрізняти від'ємну диференційну ємність, яка керується напругою $C_{(U)}^{(-)}$, та від'ємну диференційну ємність, яка керується струмом $C_{(I)}^{(-)}$. Напруга на від'ємній диференційній ємності, що керується напругою описується виразом (3) [12]

$$U_{C_{(U)}^{(-)}} = U_M \cdot \sin \left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (3)$$

а напруга на від'ємній диференційній ємності, що керується струмом описується виразом (4) [12]

функціональні можливості [10]. На рис. 2 наведено графік амплітудно-частотних характеристик цього фільтра.

С-негатрон – це електронний прилад з від'ємною диференційною ємністю. С-негатрон може бути реалізований з урахуванням фізичних ефектів у напівпровідникових структурах [1] або в схемах узагальнених перетворювача імпедансу [2], [3] зокрема на польових або біполярних транзисторах [4], операційних підсилювачах і струмових конверторах [11].

С-негатрон є активним елементом [11], [12]. У процесі становлення періодичного режиму від'ємна диференційна ємність С-негатрона віддає енергію в зовнішнє електричне коло. Енергія ділянки електричного кола з від'ємною диференційною ємністю при протіканні струму $i = I_m \sin \omega t$ описується виразом (1) [12]

$$W_{C^{(-)}} = \frac{C^{(-)} U_c^2}{2} = \frac{C^{(-)} U_m^2}{2(\omega \cdot C^{(-)})} \cdot \cos^2 \omega t = \frac{I_m^2}{2 \cdot \omega^2 \cdot C^{(-)}} (1 + \cos 2\omega t). \quad (1)$$

$$U_{C_{(I)}^{(-)}} = U_M \cdot \sin \left(\omega \cdot t - \frac{3\pi}{2} \right). \quad (4)$$

Авторами до схеми на рис. 1 було введено ідеальну від'ємну диференційну ємність (рис. 3). Отримані графіки амплітудно-частотних характеристик смуго-стримувального фільтра із введенням ідеальної від'ємної диференційної ємності наведено на рис. 4.

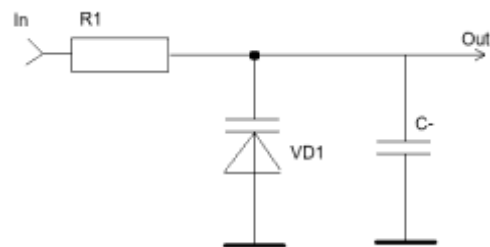


Рис. 3. Еквівалентна схема смуго-стримувального фільтра з ідеальною від'ємною диференційною ємністю

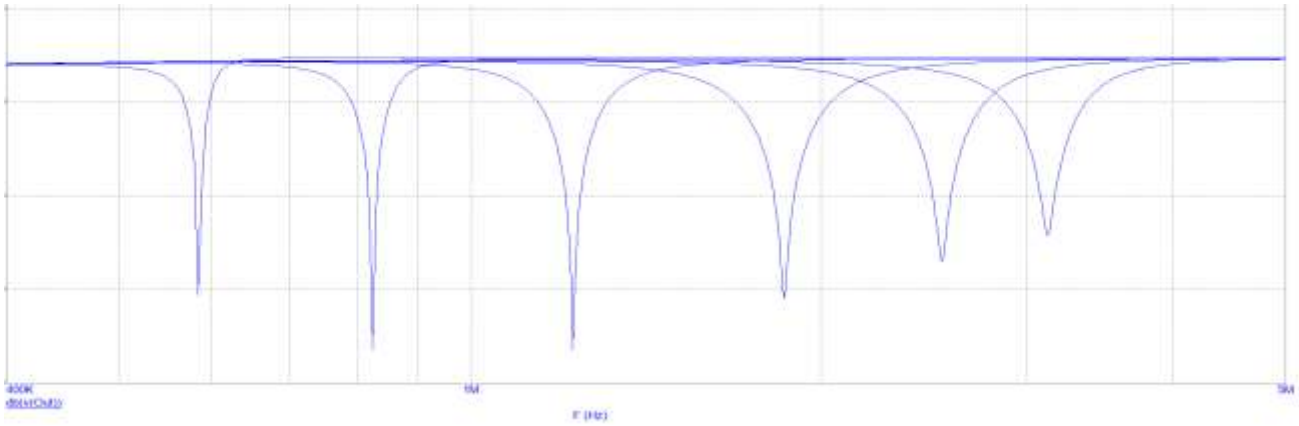


Рис. 4. Результати моделювання амплітудно-частотних схеми простого смуго-стримувального фільтра із введеною ідеальною від'ємною диференційною ємністю

У роботі авторами було використано С-негатрон на операційному підсилювачі, електрична функціональна якого наведена на рис. 5 [11].

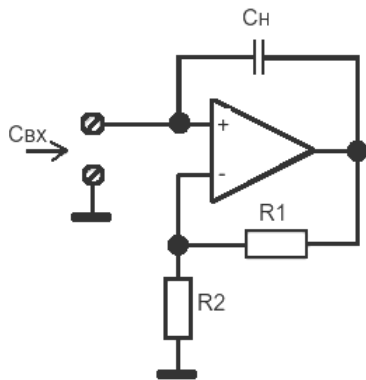


Рис. 5. Електрична функціональна схема С-негатрона на операційному підсилювачі [11]

В основі функціонування схеми С-негатрона на рис. 5 покладено принцип конвертору опору на операційному підсилювачі [11]. Резистори R1, R2 утворюють коло від'ємного зворотного зв'язку, що визначає коефіцієнт підсилення (5)

$$K_n = \frac{R1 + R2}{R2}. \quad (5)$$

Коефіцієнт конверсії визначається виразом (6)

$$K_k = 1 - K_n = 1 - \frac{R1 + R2}{R2}. \quad (6)$$

За умови, що $K_n > 1$, тобто якщо $R_1 > 0$, коефіцієнт конверсії імпедансу є від'ємним $K_k < 0$. Ємність C_n є навантаженням конвертора імпедансу та утворює коло позитивного зворотного зв'язку за напругою. Вхідний імпеданс схеми на рис. 5 визначається за (7)

$$\dot{Z}_{ex} = K_k \dot{Z}_n = \left(1 - \frac{R1 + R2}{R2}\right) \cdot \frac{1}{j\omega C_n}. \quad (7)$$

Ємність на вході конвертора імпедансу визначається виразом $C_{ex} = K_k C_n$. Якщо $R_1 = R_2$, тоді коефіцієнт підсилення $K_n = 2$, коефіцієнт конверсії імпедансу $K_k = -1$, ємність на вході $C_{ex} = -C_n$ [11].

У роботі було замінено ідеальну від'ємну диференційну ємність у схемі на рис. 3 на С-негатрон, функціональна схема якого наведений на рис. 5. Еквівалентна схема смуго-стримувального фільтра з С-негатроном (на схемі С-N) наведена на рис. 6.

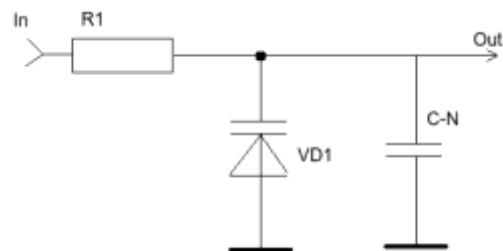


Рис. 6. Еквівалентна схема смуго-стримувального фільтра з С-негатроном

Розглянемо роботу схеми смуго-стримувального фільтра з С-негатроном. На частоті резонансу, що визначається формулою (8), відбувається стримування сигналу:

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (9)$$

де L – індуктивність коливального контуру, C – ємність коливального контуру.

За допомогою зміни напруги $U_{кер.}$, буде змінюватися ємність варикапа і, відповідно, частота резонансу.

Коефіцієнт переналаштування частоти фільтра визначається за формулою (9):

$$K = \sqrt{K_{пер}}, \quad (9)$$

де $K_{пер}$ – коефіцієнт перекриття ємності варикапа.

При використанні С-негатрона на операційному підсилювачі загальна ємність буде визначитися співвідношенням (10):

$$C_{\Sigma} = C_{\text{вир}} + C^{(-)}. \quad (10)$$

Тоді коефіцієнт перекриття ємності коливального контуру дорівнюватиме

$$K'_{\text{пер}} = \frac{C_{\text{max}} + C^{(-)}}{C_{\text{min}} + C^{(-)}}.$$

Тобто, коефіцієнт переналаштування фільтру збільшиться в $\sqrt{\frac{K'_{\text{пер}}}{K_{\text{пер}}}}$ разів.

У роботі авторами було отримано результати моделювання схеми смуго-стримувального фільтру з С-негатроном за допомогою програмного пакету Micro-Cap. На рис. 8 наведені результати моделювання АЧХ смуго-стримувального фільтру з С-негатроном, що реалізований на операційному підсилювачі.

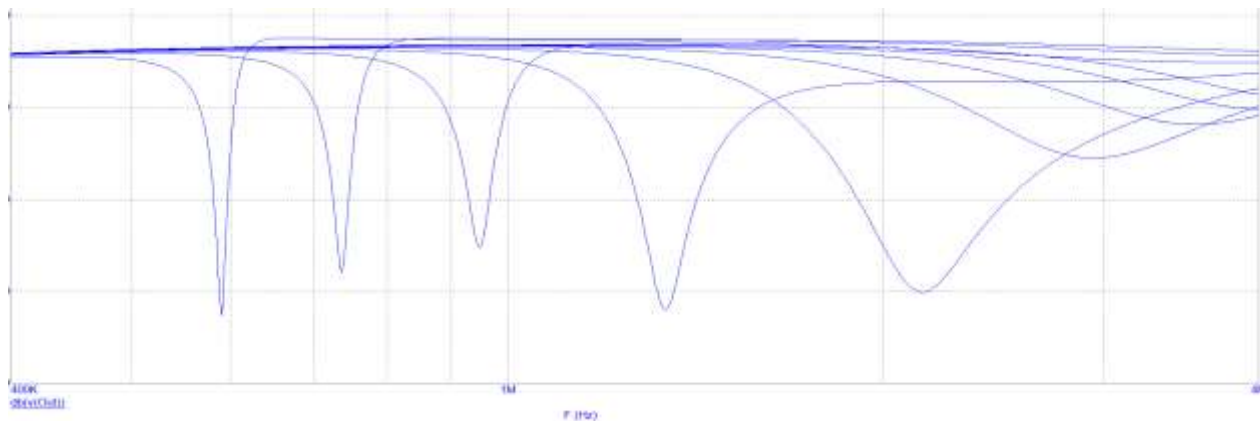


Рис. 8. Результати моделювання АЧХ смуго-стримувального фільтру з С-негатроном на операційному підсилювачі

Висновки

У роботі покращено параметри активних фільтрів для оброблення вимірювальних електричних сигналів від первинних перетворювачів сенсорів фізичних величин. Збільшення коефіцієнту переналаштування по частоті активних фільтрів, призначених для оброблення вимірювальних електричних сигналів від первинних перетворювачів сенсорів фізичних величин, було досягнуто шляхом застосування С-негатронів, що мають від'ємну диференційну ємність. У роботі авторами досліджено амплітудно-частотні характеристики кількох типів простих електричних фільтрів. З отриманих

результатів видно, що при введенні до схеми прототипу смуго-стримувального фільтру С-негатрона з величиною від'ємної диференційної ємності $C^{(-)} = -10$ пФ, діапазон переналаштування смуги пропускання фільтру становить від 590 кГц до 1,35 МГц, що в 1,55 рази більше за прототип.

У роботі підтверджено, що схемна реалізація простих електричних фільтрів з використанням С-негатронів покращує частотні параметри активних фільтрів у кілька разів у порівнянні з реалізацією простих електричних фільтрів із застосуванням варикапів.

Abstract

An important area of metrology is measuring time and frequency. In the equipment of radio measuring devices for measuring time and frequency parameters of radio signals and/or electrical circuits, the main functional element is electric filters. The efficiency of functioning of devices for measuring time and frequency parameters of radio signals depends on the quality of electric filters, stability of their parameters and characteristics. At the same time, there are requirements for frequency distortion and inertial properties of other stages of processing the measuring signals and elements and circuits of interstage connections. Therefore, the efficiency of frequency selection of measuring signals of primary sensors significantly depends on the quality of electric filters. The principle of the electric filter operation is based on functional dependence of inductive and capacitive elements on frequency, as well as on the phase ratios of voltage and current on them. Nowadays, not only positive but also negative differential capacitance is used in the synthesis and design of electronic circuits. The concept of negative differential capacitance is especially useful in practical implementation of active filters, noise compensators, capacitive sensors, capacitive transducers, etc. The aim of the paper is to increase the frequency overlap ratio for the active filters in the sensors of physical quantities using active elements with a negative value of the differential capacitance.

Key words: active filter; C-negatron; negative capacitance; measuring signal; sensor.

Аннотация

Актуальним направлением метрологии является измерение времени и частоты. В оборудовании радиоизмерительных приборов для измерения временных и частотных параметров радиосигналов и/или электрических цепей основным

функціональним елементом являються електричні фільтри. Іменно від якості електричних фільтрів, стійкості їх параметрів і характеристик залежить ефективність функціонування приборів для вимірювання часових і частотних параметрів радіосигналів. При цьому, висувуються окремі вимоги до частотних спотворень і інерційним властивостям інших каскадів обробки вимірних сигналів, до елементів і ланок міжкаскадних зв'язей. Тому ефективність виконання частотної селекції вимірних сигналів первинних датчиків суттєво залежить від якості електричних фільтрів. Принцип роботи електричних фільтрів ґрунтується на функціональній залежності індуктивного і ємностного елементів від частоти, а також на фазових співвідношеннях напруги і струму на них. В даний час при синтезі і проектуванні електронних схем використовують не тільки позитивну, але і негативну диференціальну ємність. Поняття негативної диференціальної ємності є особливо зручним при практичній реалізації активних фільтрів, компенсаторів шумів, ємностних датчиків, ємностних перетворювачів і др. Метою роботи є підвищення коефіцієнта покриття по частоті активних фільтрів сенсорів фізичних величин з використанням активних елементів, які мають негативне значення диференціальної ємності.

Ключові слова: активний фільтр, С-негатрон, негативна ємність, вимірний сигнал, сенсор.

Список літератури

- Осадчук В.С., Осадчук О.В., Барабан С.В. Радіовимірювальні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором для неруйнівного теплового контролю. Вінниця: ВНТУ, 2015. 212 с. ISBN 978-966-641-599-1.
- Філінюк М. А., Лазарев О. О., Бондарюк Д. В. Ємнісний негасенсор з частотним виходом. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. № 3. С. 109–112.
- Пашаев А.М., Касимов Ф.Д., Філінюк Н.А. и др. Фізико-технологічні і схемотехнічні основи негatronіки. Баку: Элм, 2008. 433 с.
- Філінюк М.А., Лазарев О.О., Войцеховська О.В. LC-негатрони та їх застосування : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2012. 308 с.
- Хьюлсман Л.П., Аллен Ф.Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1984. 384 с.
- Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация. Пер. с англ.; под ред. И. Н. Теплюка. М.: Мир, 1982. 586 с.
- А. с. СССР 536590. МКІ2 Н03Н7/10. Полосовой перестраиваемый активный RC-фильтр / П. С. Ганич. Опубл. 25.11.1976. Бюл. № 43.
- Пат. RU 2110140 C1. МПК6 Н03Н11/04. Перестраиваемый активный RC-фильтр / С.В. Гришин, Ю.И. Иванов, С.Г. Крутчінский. Опубл. 27.04.1998.
- Пат. RU 2019023 C1. МПК5 Н03Н11/12. Активный RC-фильтр / С.В. Гришин, С.Г. Крутчінский. Опубл. 30.08.1994.
- Осадчук В.С., Осадчук О.В., Семенов А.О., Коваль К.О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2011. 336 с.
- Лазарев О.О., Огородник К.В., Чехмєструк Р.Ю., Філінюк М.А. Дослідження схемотехнічних реалізацій С-негатронів на конверторах від'ємного опору. *Наукові праці ВНТУ*. 2011. № 4. С. 1–10. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/306/304> (дата звернення 14.08.2020 р.)
- Возняк О.М., Анфілов Р.А., Семенов А.О. Дослідження енергетичних властивостей від'ємної ємності. Матеріали 7-ї міжнародної науково-практичної конференції "Наука і освіта '2004". Том 63. Технічні науки. Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. С.40–41.
- structures with negative resistance for non-destructive thermal control]. Vinnytsia: VNTU, 2015. (in Ukrainian)
- Filinyuk M.A., Lazarev O.O., Bondaryuk D.V. Capacity negasensor with a frequency output. *Visn. Vinnic'k. politeh. inst.*, 2013, no. 3. pp. 109–112. (in Ukrainian)
- Pashaev A.M., Kasimov F.D., Filinyuk N.A. et al. Fiziko-tehnologicheskie i shemotekhnicheskie osnovy negatroniki [Physico-technological and circuitry bases of negatronics]. Baku: Elm, 2008. 433 p. (In Russian)
- Filinyuk M.A., Lazarev O.O., Wojciechowska O.V. LC-negatrony ta yikh zastosuvannia [LC-negatrons and their application]. Monograph. Vinnytsia: VNTU, 2012. 308 p. (in Ukrainian)
- Huulsman L.P., Alain F.E. Vvedenie v teoriyu i raschet aktivnykh filtrov [Introduction to the theory and calculation of active filters]. Trans. from English. M.: Radio i svyaz, 1984. 384 p. (In Russian)
- Lam G. Analogovyye i tsifrovyye filtry. Raschet i realizatsiya [Analog and digital filters. Calculation and implementation]. Trans. from English; ed. I.N. Teplyuka. Moscow: Mir, 1982. 586 p. (In Russian)
- A. s. USSR 536590. MKI2 H03H7/10. Polosovoy perestraivaemyy aktivnyy RC-filtr [Band-pass tunable active RC-filter] / P.S. Ganich. Publ. 11.25.1976. Bul. No. 43. (In Russian)
- Pat. RU 2110140 C1. MPK6 H03H11/04. Perestraivaemyy aktivnyy RC-filtr [Tunable active RC filter] / S.V. Grishin, Yu.I. Ivanov, S.G. Krutchinsky. Publ. 04.27.1998. (In Russian)
- Pat. RU 2019023 C1. MPK 5 H03H11/12. Aktivnyy RC-filtr [Active RC-filter] / S.V. Grishin, S.G. Krutchinsky. Publ. 30.08.1994. (In Russian)
- Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Semenov A.O., Koval K.O. Funktsionalni vuzly radiovimiriuvalnykh pryladiv na osnovi reaktivnykh vlastyvostei tranzystornykh struktur z vidiemnym oporom [Functional units of radio measuring devices based on the reactive properties of transistor structures with negative resistance]: a monograph. Vinnytsia: VNTU, 2011. 336 p. (in Ukrainian)
- Lazarev O.O., Ogorodnik K.V., Chekhmestruk R.Yu., Filinyuk M.A. Doslidzhennia skhemotekhnichnykh realizatsii s-negatroniv na konvertorakh vidiemnoho oporu [Investigation of circuit realizations of C-negatrons on negative resistance converters]. *Scientific works of VNTU*, 2011, no. 4. pp. 1–10. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/306/304> (accessed 14.08.2020).
- Wozniak O.M., Anfilov R.A., Semenov A.O. Doslidzhennia enerhetychnykh vlastyvostei vidiemnoi yemnosti [Investigation of the energy properties of negative capacity]. *Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference "Science and Education '2004"*, vol. 63, Technical sciences. Dnepropetrovsk: Science and Education, 2004. pp. 40–41. (in Ukrainian)

References

- Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Baraban S.V. Radiovimiriuvalni peretvoriuvachi na osnovi tranzystornykh struktur z vidiemnym oporom dlia neruivnogo teplovoho kontroliu [Radio measuring transducers based on transistor