

УДК 620.179.14

О. В. ДЕСЯТНІЧЕНКО, Г. М. СУЧКОВ, М. Р. БОЧАРНИКОВ**УДОСКОНАЛЕННЯ АНАЛОГОВИХ ФІЛЬТРІВ З РЕЗОНАНСНОЮ ТА СМУГОВОЮ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Розглянуті основні положення побудови аналогових фільтрів. Запропоновано варіант модернізації аналогових фільтрів за допомогою цифрових потенціометрів. Показані особливості використання потенціометрів в залежності від типу фільтра. Наведені шляхи підвищення точності встановлення центральної частоти. Висвітлені основні моменти побудови блоку цифрового керування. Проведена практична реалізація та випробовування запропонованих рішень. Зроблені висновки щодо доцільності використання побудованих фільтрів.

Ключові слова: цифровий потенціометр, аналоговий тракт, біквадратний фільтр, смуговий фільтр, операційний підсилювач.

Рассмотрены основные положения построения аналоговых фильтров. Предложен вариант модернизации аналоговых фильтров с помощью цифровых потенциометров. Показаны особенности использования потенциометров, в зависимости от типа фильтра. Приведены пути повышения точности установки центральной частоты. Освещены основные моменты построения блока цифрового управления. Проведена практическая реализация и испытания предложенных решений. Сделаны выводы о целесообразности использования построенных фильтров.

Ключевые слова: цифровой потенциометр, аналоговый тракт, биквадратный фильтр, полосовой фильтр, операционный усилитель.

The article represents basic information about analog filters construction. A variant of analog filters modernization by using digital potentiometer have proposed. The article shows main advantages of using potentiometers, depending on the filter type. The article contains ways to improve the accuracy of the central frequency setting. Features of the digital control unit construction have shown. Also article contains the practical implementation and testing of the proposed solutions. Conclusions have been made about the appropriateness of using the constructed filters.

Keywords: digital potentiometer, analog path, biquadratic filter, bandpass filter, operational amplifier.

Вступ. Електромагнітно-акустична (ЕМА) товщинометрія та дефектоскопія широко застосовуються для контролю різноманітних об'єктів, як при виготовленні, так і під час експлуатації. Використання неруйнівних методів контролю під час виробництва дозволяє контролювати геометричні розміри виробів та заздалегідь проводити відбраковування неякісної продукції. Дефектоскопія виробів, що знаходяться в експлуатації дозволяє вчасно виявляти та усувати дефекти (наприклад такі як тріщини). Вимірювання товщини під час експлуатації використовується з метою визначення кількісних характеристик зменшення товщини стінок елементів, для визначення величин корозійного зношування стінки, днища та інших частин конструкцій [1].

На відміну від аналогів, ЕМА прилади дозволяють проводити вимірювання об'єктів без необхідності забезпечення прямого контакту поверхні виробу та датчика. Це дозволяє контролювати об'єкти, що вкриті шаром захисного покриття або іржі, без необхідності попередньої підготовки поверхні. Також можливо контролювати вироби, що розігріті до високих температур без необхідності їх попереднього охолодження [2].

Сучасні ЕМА прилади дозволяють визначати наявність та розташування дефектів в об'єкті контролю за часом приходу ультразвукових сигналів, відбитих від внутрішньої й зовнішньої поверхні або неоднорідності усередині стінки, що дозволяє встановлювати, крім зовнішніх і внутрішніх дефектів металу, різного роду неоднорідності в металі, такі як розшарування та інші включення [3].

Одним з недоліків ЕМА методу є необхідність використання високого рівня амплітуди на передаючому датчику (100 – 3000 В), що спричиняє наявність великої кількості завад у вхідному сигналі, особливо з огляду на досить низький рівень сигналу,

що надходить з прийомного датчика (10 – 2000 мкВ) [4]. Це зумовлює використання вхідних аналогових трактів з низьким рівнем власних шумів та з можливістю фільтрації сигналу. Високу ефективність показало використання смугових та резонансних аналогових фільтрів у таких трактах [5, 6]. Основним недоліком використання таких фільтрів є неможливість змінювати центральну частоту програмним шляхом [7], що унеможливує використання ЕМА перетворювачів з різними резонансними частотами водночас одному приладі.

Нижче буде запропоновано варіанти подолання такого недоліку шляхом модернізації існуючих фільтрів за допомогою використання цифрових потенціометрів з метою дати можливість змінювати значення центральної частоти програмним шляхом в діапазоні від 0.5 до 3.0 МГц.

Модернізація аналогового тракту з смуговою характеристикою. Смугові фільтри можуть будуватися шляхом послідовного з'єднання фільтрів нижніх та верхніх частот або на базі фільтрів зі смуговою характеристикою. Смуговий фільтр другого порядку можна реалізувати на основі схеми інвертуючого підсилювача зі зворотнім смугово-пропускаючим зв'язком [8], як це показано на рис. 1.

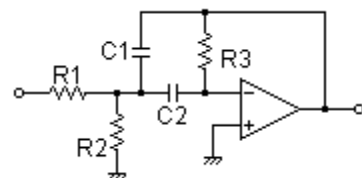


Рис. 1 – Схема смугового активного фільтру

Передатна функція фільтру має вигляд:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{2\zeta(2\pi f_0)K_s}{s^2 + 2\zeta(2\pi f_0)s + (2\pi f_0)^2} \quad (1)$$

Центральна частота такого фільтру може бути обчислена з наступного виразу:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_3 C_1 C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}, \quad (2)$$

Добротність фільтру розраховується як:

$$Q = \frac{1}{2\zeta}, \quad (3)$$

Коефіцієнт підсилення K можна обчислити:

$$K = \frac{R_3 - C_2}{R_1 C_1 + C_2}, \quad (4)$$

Як видно з формули 2, центральна частота фільтру залежить від опору резистора R2. Якщо замість нього використати цифровий потенціометр, що має 256 позицій зміни опору, можна буде змінювати цю частоту дискретним шляхом. З огляду на дискретність зміни опору, залежність центральної частоти від опору цифрового потенціометра буде мати вигляд наведений на рис. 2.

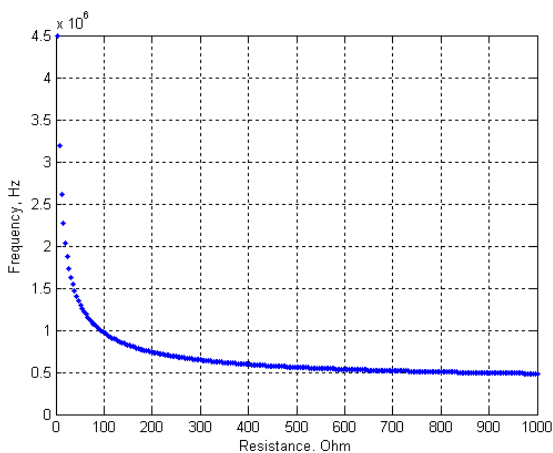


Рис. 2 – Залежність центральної частоти смугового фільтру від опору цифрового потенціометру

Як видно з рисунку, зміна частоти до 2 МГц є досить плавною, але на більш високих частотах не можливо встановити деякі значення. Для покращення ситуації прийнято рішення послідовно з резистором R2 встановити змінний резистор меншого опору з цифровою настройкою. Нажаль промисловість не випускає цифрові резистори, що здатні працювати на високих частотах з низьким рівнем опору. Тому допоміжний резистор був побудований з паралельно включених постійного резистора на 8 Ом та цифрового потенціометра на 1 кОм. Графік залежності опору блоку допоміжних резисторів від коду наведено на рис. 3

Як видно з рисунку, зміна опору не є лінійною, але в області малих значень кодів керування, все ще можна використовувати близько 20 робочих точок.

Залежність центральної частоти смугового фільтру від опору у разі використання двох цифрових потенціометрів, показана на рис. 4. Як видно з рисунку, значення встановлюваних частот мають високу щільність на усьому діапазоні від 0.5 до 3.0 МГц

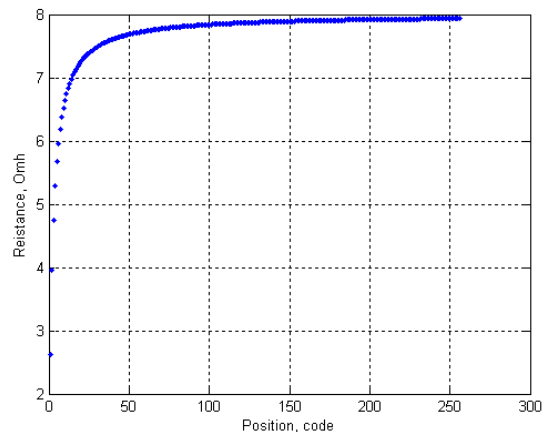


Рис. 3 – Залежність опору блоку допоміжних резисторів від коду

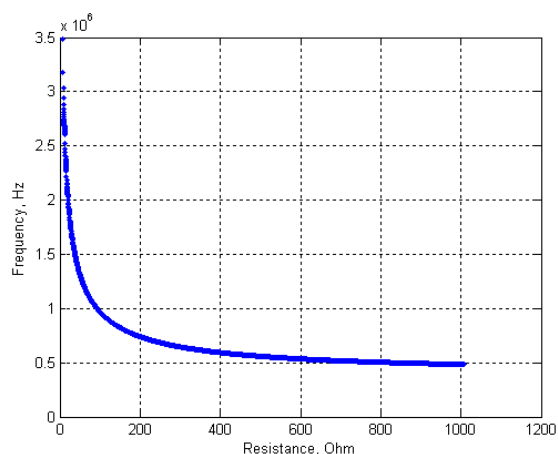


Рис. 4 – Залежність центральної частоти смугового фільтру від опору у разі використання двох цифрових потенціометрів

Модернізація аналогового тракту з резонансною характеристикою. Цей аналоговий тракт побудовано на базі біквдратного активного фільтру, схема якого зображена на рис. 5.

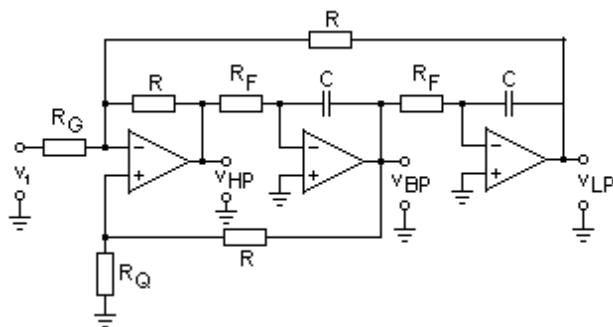


Рис. 5 – Схема біквдратного фільтру

Однією із властивостей біквдратного фільтру є незмінність його смуги пропускання при зміні середньої частоти пропускання, тому в біквдратних фільтрах добротність збільшується з ростом середньої частоти [8]. Схема біквдратного смугового фільтру (рис. 5) складається з сумуючого інтегратора,

сигнал з якого надходить на інвертуючий підсилювач, сигнал з якого в свою чергу іде на другий інтегратор.

Частота резонансу такого фільтру може бути обчислена за формулою:

$$F = 1/2\pi CR_F, \quad (5)$$

Добротність фільтру можна визначити як:

$$Q = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R}{R_Q} \right), \quad (6)$$

Добротність фільтру розраховується як:

$$K = R/R_G, \quad (7)$$

Розрахункові номінали компонентів схеми становлять: $C=270$ пФ; $R=10$ кОм; $R_Q=100$ Ом.

Центральна частота фільтру залежить від опору резисторів R_f . Опір цих резисторів завжди рекомендується вибирати однаковим. Якщо в якості таких резисторів використати цифрові потенціометри, можна буде змінювати частоту дискретним шляхом. Залежність центральної частоти від встановленого опору цифрового потенціометра буде мати вигляд наведений на рис. 6.

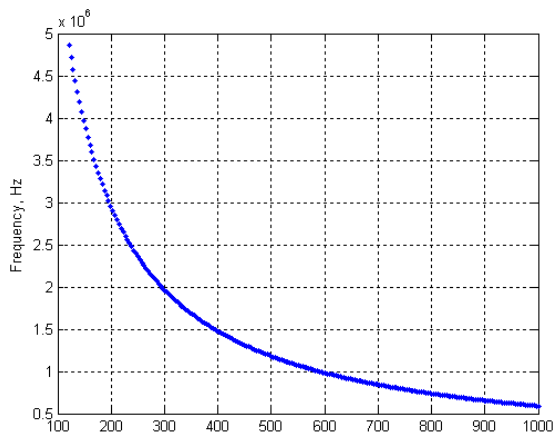


Рис. 6 – Залежність центральної частоти резонансного фільтру від опору цифрових потенціометрів

Як видно з графіку, характеристика залежності ближча до лінійної, на відміну від смугового фільтру. Але дискретність встановлення частот вище 3 МГц досить велика. Знехтуємо правилом, щодо необхідності дотримання строгої рівності опор резисторів R_f та проведемо моделювання схеми для випадку, коли резистори мають майже рівні значення, які відрізняються одне від одного на значення одного кроку 4 Ом (250 Ом та 254 Ом).

Для підвищення достовірності, буде виконуватися паралельне моделювання у двох різних програмних пакетах: Micro-Cap [8] та Multisim [9]. Такий підхід дозволяє значно зменшити ймовірні помилки, що можуть виникати через недосконалість програмних моделей реальних елементів.

На рис. 7 показано графік з результатами моделювання, отриманого завдяки програмі Micro-Cap. Результати, що були отримані у програмі Multisim збігаються з результатами програми Micro-Cap, тому приводитися не будуть.

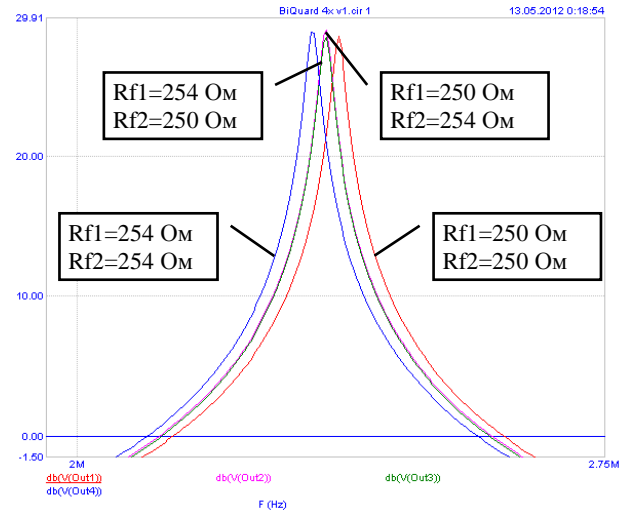


Рис. 7 – Залежність центральної частоти резонансного фільтру від опору цифрових потенціометрів для почергової зміни опору

З результатів моделювання можна зробити висновок про припустимість використання почергової зміни опору резисторів, при чому не має значення порядок зміни, а розрахункове значення для частоти можна приймати як середнє між цими значеннями. Залежність центральної частоти резонансного фільтру від опору цифрових потенціометрів для почергової зміни опору наведено на рис. 8. Як видно, завдяки досить простому способу, вдалося вдвічі підвищити роздільну здатність встановлення частоти фільтру.

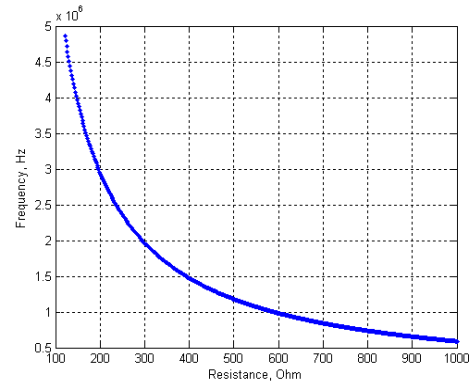


Рис. 8 – Залежність центральної частоти резонансного фільтру від опору цифрових потенціометрів для почергової зміни опору

Розробка та моделювання схеми цифрового керування. Схема блоку цифрового керування (рис. 9) побудована на базі мікроконтролера ATmega 16 (U1). Цей контролер працює на частоті 16 МГц та має 4 порти вводу/виводу по 8 ліній кожен, 16 Кбайт вбудованої пам'яті програм. Дисплей під'єднується до контролера через роз'єм P1. Через роз'єм P2 буде під'єднуватися програматор. Роз'єм P3 використовується для під'єднання цифрових потенціометрів. Кнопки керування мембранного типу розташовані на передній панелі, та складають з нею суцільну конструкцію.

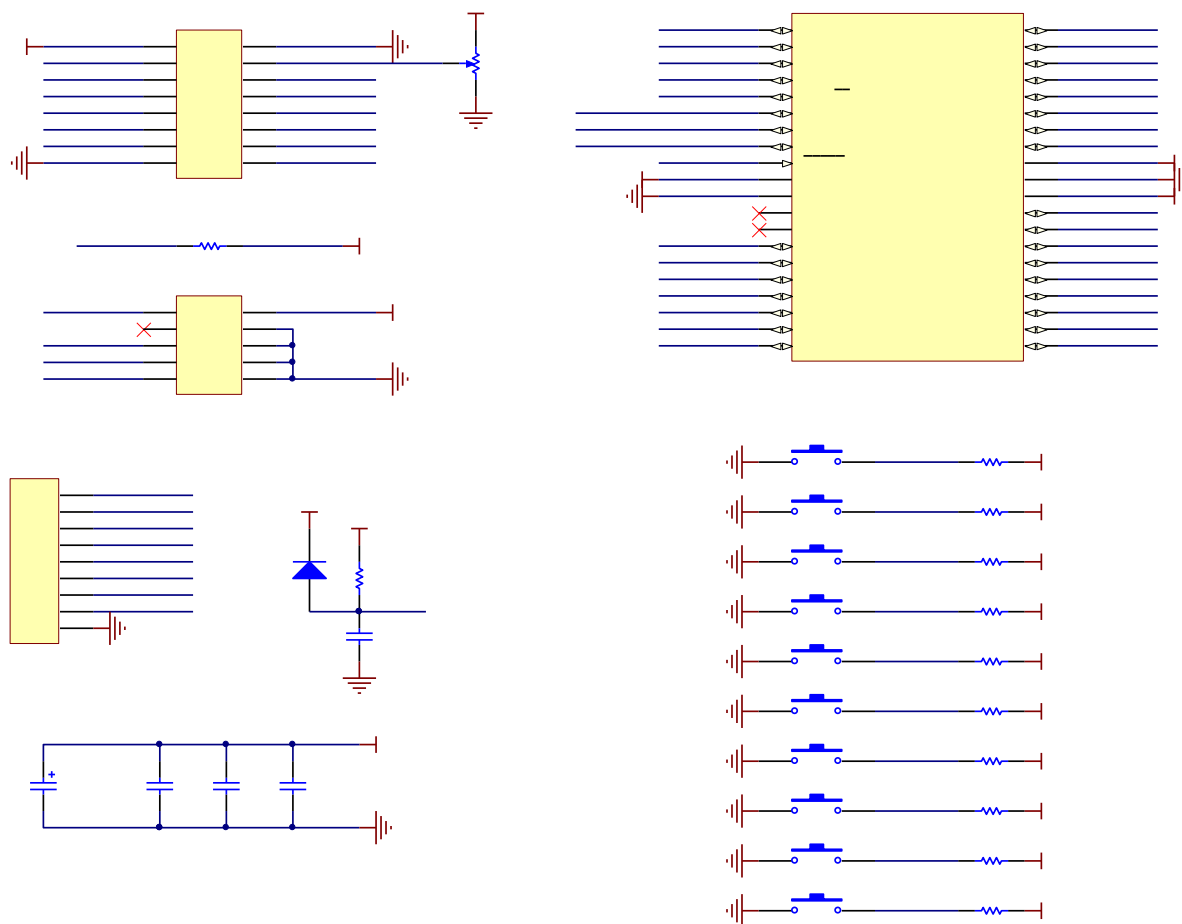


Рис. 9 – Схема блоку цифрового керування

Для перевірки схеми використано програму Proteus [10], яка має широкі можливості моделювання цифрових схем з використанням мікроконтролерів. Проведення програмного моделювання до створення фізичного макету дозволяє значно скоротити час на пошук помилок в програмному коді та уникнути можливого виходу з ладу електронних компонентів, що може бути спричинений такими помилками.

Створення макету пристрою. Для створення процесорного блоку було вирішено не виготовляти окрему плату, а провести монтаж на макеті, адже в процесі налаштування та доопрацювання схема може

бути значно змінена, також можуть бути додані нові компоненти.

Для модернізації фільтрів було обрано цифровий потенціометр AD8400, з опором 1 кОм.

Цифрові потенціометри треба розташовувати як можна ближче до аналогової частини, тому кожен з них буде розташовуватися на малій окремій друкованій платі, розробка якої проводилася за допомогою пакету AltiumDesigner [11].

Друкована плата модуля цифрового потенціометра, схема розташування елементів та її тривимірна модель показані на рис. 10.

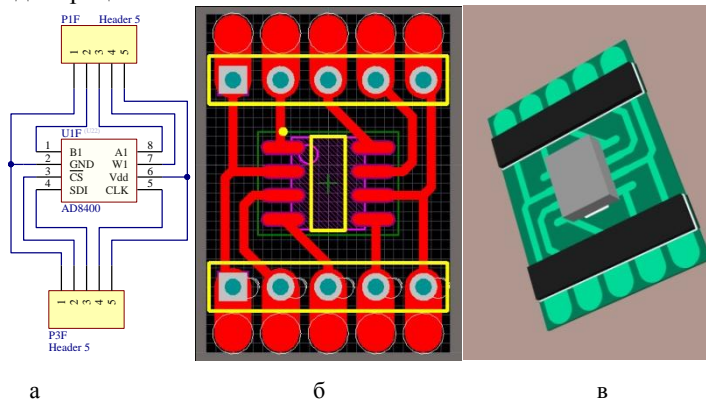


Рис. 10 – Друкована плата модуля цифрового потенціометра:

а – схема модуля цифрового потенціометра; б – схема розташування елементів; в – тривимірна модель

Для зменшення впливу завад від мікроконтролеру на підсилювач використано модуль гальванічного розв'язання цифрової та аналогової частин. Друкована плата модуля гальванічного

розв'язування, схема розташування елементів та тривимірний модель друкованої плати цього модуля показані на рис. 11.

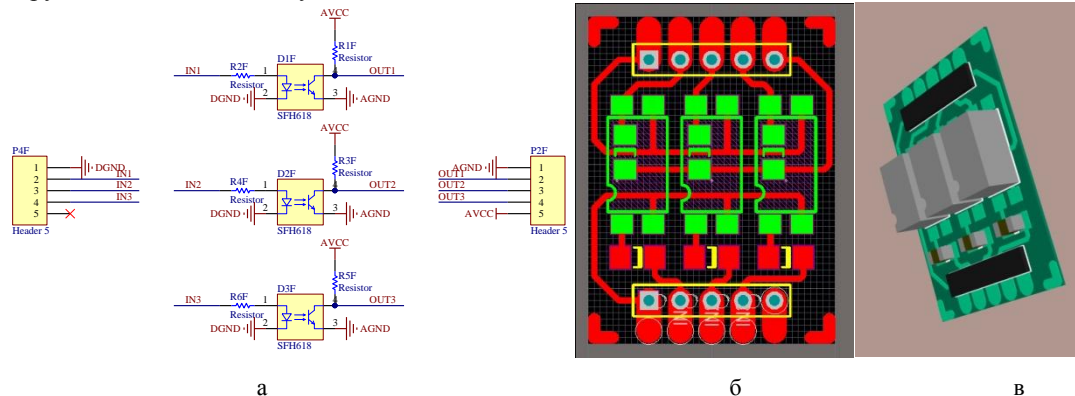


Рис. 11 – Друкована плата модуля гальванічного розв'язування: а – схема модуля гальванічного розв'язання; б – схема розташування елементів; в – тривимірний модель

Блок цифрового керування виконано у двох екземплярах: для смугового та резонансного підсилювачів. Кожна пара, що складається з блока керування та підсилювача виконана в окремому корпусі з вбудованим блоком живлення. Зовнішній вигляд одного з модернізованих підсилювачів показано на рис. 12.



Рис. 12 – Зовнішній вигляд підсилювача

Висновки. Смуговий та біквдратний аналогові фільтри можуть бути модернізовані за рахунок використання цифрових потенціометрів. Для підвищення точності встановлення середньої частоти смугового фільтру необхідно використовувати декілька цифрових потенціометрів, з'єднаних спеціальним чином. Підвищення точності встановлення середньої частоти для біквдратного фільтру може бути здійснене за рахунок незначного відходу від правила встановлення однакового опору на обох задаючих резисторах.

Список літератури

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. под общ. ред. Клюева В. В. Т.3: Ультразвуковой контроль / В. В. Клюев., И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге – Москва: Машиностроение, 2004. – 864 с.
2. Сучков Г. М. О главном преимуществе ЭМА способа / Г. М. Сучков // Дефектоскопия. – Москва, 2000. – №10. – С.67 – 70.
3. Сучков Г. М. ЭМА толщинометрия. (Обзор) / Г. М. Сучков, О. М. Петрищев, О. В. Десятниченко, Н. М. Юданова // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 12. – С. 110 – 121.
4. Десятниченко О. В. Электромагнитно-акустический толщиномер для контролю металовиробів з діелектричними покриттями:

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук / О. В. Десятниченко – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – 21 с.

5. Десятниченко О. В. Приймаючий аналоговий тракт зі смуговою характеристикою для засобу неруйнівного контролю ультразвукового приладу / О. В. Десятниченко, Г. М. Сучков, К. О. Рекало // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 34. – С. 163 – 173.
6. Десятниченко О. В. Побудова приймаючого аналогового тракту на базі біквдратного фільтру для використання у електромагнітно-акустичній товщинометрії та дефектоскопії / О. В. Десятниченко, Г. М. Сучков, С. В. Хаціна, ЛеЧіХіеу, А. А. Синельникова, Г. Г. Горбашова // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харьков, 2013. – № 8 (114), Т. 1. – С. 146 – 150.
7. Десятниченко А. В. Повышение чувствительности электромагнитно-акустического толщиномера за счет настройки резонансной частоты преобразователя / А. В. Десятниченко, К. А. Рекало, А. А. Синельникова // Матеріали III науково-практичної конференції студентів і молодих учених: «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання». – Івано-Франківськ, 2011. – С. 57 – 58
8. Мошниц Г. Проектирование активных фильтров: Пер. с англ. / Г. Мошниц, П. Хорн // Москва: Мир, 1984 – 318с.
9. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 / М. А. Амелина, С. А. Амелин // Горячая линия-Телеком – 464с.
10. Хернтер М. Е. Multisim 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств. / М. Е. Хернтер // ДМК. 2006 – 488 с.
11. Васильченко Е. В. Проектирование схем на компьютере. / Е. В. Васильченко, К. С. Наседкин/ Библиотека инженера. 2004–525 с.
12. Сабунин А. Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. / А. Е. Сабунин / Солон-пресс. 2009 – 432 с.

References (transliterated)

1. Nerazrushaiushchy kontrol: spravochnyk: Vol. 7. pod obshch. red. Kliueva V. V. Vol.3: Ultrazvukovoi kontrol / V. V. Kliuev, Y. N. Ermolov, Iu. V. Lanhe – Moscow: Mashynostroenye, 2004. – 864 p.
2. Suchkov G. M. O glavnom preimushhestve EMA sposoba / G. M. Suchkov // Defektoskopiya. – Moscow, 2000. – No.10. – pp. 67 – 70.
3. Suchkov G. M. EMA tovshchynometriia. (Ohliad) / G. M. Suchkov, O. M. Petryshchev, O. V. Desiatnichenko, N. M. Yudanova // Visnyk NTU «KhPI». – Kharkov: NTU «KhPI», 2010. – No 12. – pp. 110 – 121
4. Desiatnichenko O. V. Elektromagnitno-akustychnyi tovshchynomir dlia kontroliu metalovirobiv z dielektrychnyimi pokryttiamy:

- dysertatsiinazdobuttianaukovohostupeniakandydatekhnichnykh nauk / O. V. Desyatnichenko – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – 21 p.
5. Desyatnichenko O. V. Pryimaiuchyianalohoviytraktzismuhovoiukhara kterytykoiudliiazasobneruiniivnohokontroliuultrazvukovohopryladu / O. V. Desyatnichenko, G. M. Suchkov, K. O. Rehalo // VisnykNTU «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. – No. 34. – pp. 163 – 173.
 6. Desyatnichenko O. V. Pobudovapryimaiuchohoanalohovohotraktunab azibikvadratnohofiltrudliavykorystanniauelektromahnitno–akustychniitovshchynometriitadefektoskopii / O. V. Desyatnichenko, H. M. Suchkov, S. V. Khashchina, Le Chi Khyeu, A. A. Synelnykova, H. H. Horbashova // Enerhosberezhnye. Enerhetyka. Enerhoaudyt. – Kharkov, 2013. – No. 8 (114), Vol. 1. – pp. 146 – 150.
 7. Desyatnychenko A. V. Povishenyechuvstvytelnostyelektromahnitno–akustycheskohotolshchynomerazaschetnastroikyrezonansnoichastoti preobrazovatel'ia / A. V. Desiatnychenko, K. A. Rehalo, A. A. Synelnykova // MaterialyIII naukovopraktychnoikonferentsiistudentivimolodykhuchenykh: «Metodytasobyneriunivnohokontroliupromyslovohoobladnannia». – Ivano-Frankivsk, 2011. – pp. 57 – 58.
 8. Moshyts H. Proektyrovanyeaktyvnykhfyl'trov: Per. sanhl. / H. Moshyts, P. Khorn // Moskow: Myr, 1984 – 318 p.
 9. Amelyna M. A. Prohrammaskhemotekhnicheskohomodelyrovaniya Micro-Cap 8 / M. A. Amelyna, S. A. Amelyn // Horiachaialyniya-Telekom – 464 p.
 10. Khemyter M. E. Multisim 7: Sovremennaiasystemakompiuternohomodelyrovaniya y analizaskhemelektronnikhustroistv. / M. E. Khemyter // DMK. 2006 – 488 p.
 11. Vasylychenko E. V. Proektyrovanyeskhemnakkompiutere. / E. V. Vasylychenko, K. S. Nasedkyn / Byblyotekaynzhynera. 2004 – 525 p.
 12. Sabunyn A. E. Altium Designer. Novieresheniya v proektyrovaniyelektronnikhustroistv. / A. E. Sabunyn / Solon-press. 2009 – 432 p.

Надійшла (received) 09.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Удосконалення аналогових фільтрів з резонансною та смужковою характеристиками / O. V. Desyatnichenko, G. M. Suchkov, M. P. Bocharnikov // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 57–62. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-4525.

Усовершенствование аналоговых фильтров с резонансной и полосовой характеристиками / A. V. Desyatnichenko, G. M. Suchkov, N. P. Bocharnikov // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 57–62. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-4525.

Improvement of analog filters with resonant and bandpass characteristics / O. V. Desyatnichenko, G. M. Suchkov, N. R. Bocharnikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 57–62. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Десятніченко Олексій Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», інженер кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, тел.: (063) 64 32 256; e-mail: o.desyatnichenko@gmail.com.

Десятніченко Алексей Владимирович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», инженер кафедры компьютерных и радиоэлектронных систем контроля и диагностики; тел.: (063) 64 32 256; e-mail: o.desyatnichenko@gmail.com.

Desyatnichenko Oleksiy Volodymyrovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Engineer at the Department of Computer and Electronic Control Systems and Diagnostics; tel.: (063) 64 32 256; e-mail: o.desyatnichenko@gmail.com.

Сучков Григорій Михайлович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, тел.: (098) 5950058; e-mail: hpi.suchkov@gmail.com.

Сучков Григорий Михайлович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедры компьютерных и радиоэлектронных систем контроля и диагностики; тел.: (098) 59 500 58; e-mail: hpi.suchkov@gmail.com.

Suchkov Grigoriy Michaylovich – Doctor of Technical Science, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Chief of the Department of Computer and Electronic Control Systems and Diagnostics; tel.: (098) 5950058; e-mail: hpi.suchkov@gmail.com.

Боцарніков Микита Русланович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент.

Боцарников Никита Русланович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент.

Bocharnikov Mykyta Ruslanovych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student.