

## РОБОТОТЕХНІЧНА СИСТЕМА З ОДНОТИПНИМИ ЧАСТОТНО-ЗАЛЕЖНИМИ КОМПОНЕНТАМИ У ТРАКТІ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ДАТЧИКІВ

Т.В. Ситніков, П.В. Ступень

Національний університет «Одеська політехніка»

**Анотація.** Розглядаються питання побудови тракту обробки сигналів датчиків на однотипних компонентах у комп'ютерних робототехнічних системах, які можуть комплексно перебудовувати свої характеристики програмно-апаратними засобами в залежності від умов функціонування для підвищення ефективності системи. Для підвищення порядку тракту обробки пропонується використовувати послідовне з'єднання однотипних частотно-залежних компонент другого порядку. Отримано співвідношення, які дозволяють розраховувати частоту основного типового компонента по необхідній частоті декількох послідовно з'єднаних компонент.

**Ключові слова:** Індустрія 4.0-5.0, роботизовано системи, частотно-залежні компоненти, типи з'єднання компонентів, послідовне з'єднання, основний типовий компонент, амплітудно-частотна характеристика.

### Вступ

При розробці сучасних робото-технічних безпілотних систем (наземних, надводних, підводних, БПЛА та ін.) виникає задача побудови тракту обробки сигналів датчиків на частотно-залежних компонентах з можливістю перебудови власних характеристик в залежності від складних умов функціонування. Ця задача обумовлена необхідністю підвищення ефективності системи при невизначеності, яка виникає при її роботі без участі людини.

Розвиток технічних систем на сучасному рівні обумовлений концепцією Індустрія 4.0. Відповідно до цієї концепції системи та їх апаратні та програмні компоненти повинні відповідати новим вимогам за мобільністю, гнучкістю, адаптивністю, пристосованістю до умов функціонування [1]. Для досягнення цього системи оснащуються багатофункціональними датчиками, виконуючими механізмами, контролерами, апаратними та програмними компонентами обчислювальної техніки, які повинні працювати у реальному часі. Наявність бездротових мереж та хмарних технологій сприяє швидкому збору даних, які після первинної обробки відправляються до відповідного центру аналізу та прийняття рішення.

Однак при використанні технологій штучного інтелекту ця робота може виконуватися на борту систем. Включення до таких систем блока когнітивного аналізу допомагає обрати більш вірне рішення [2, 3].

Однак при використанні технологій штучного інтелекту ця робота може виконуватися на борту систем. Включення до таких систем блока когнітивного аналізу допомагає обрати більш вірне рішення [2, 3].

Подальший розвиток подібних систем йде в напрямку гуманізації прийняття рішення та дружного контакту з людиною, відповідно до концепції Індустрія 5.0 [4].

Безпілотні автономні мобільні системи обов'язково мають на борту спеціалізовані обчислювачі з набором датчиків для аналізу внутрішнього становища системи, навколишнього середовища, розпізнавання об'єктів та цілей, передаварійних ситуацій в продовж руху та виконання необхідних операцій [5-7].

Таким чином, подібні системи повинні мати компоненти, які мають можливість перебудовувати власні характеристики програмними, або апаратними засобами в залежності від умов функціонування, а у тракту обробки сигналів датчиків від перешкодо-сигнальної обставини для підвищення надійності на ефективності роботи у цілому [8-11].

Цифровий тракт обробки сигналів датчиків в основному включає різні частотно-залежні компоненти. Їх побудова у автономних мобільних системах виконується на основі компонентів низького порядку, оскільки це обумовлено малими витратами на обчислення коефіцієнтів передавальної функції та кількості коефіцієнтів, простотою налагодження або перебудови, помірним енергоспоживанням та часу обробки. Слід відмітити, що при роботі у

реальному часі є обмеження на обчислення, перебудову та перехідний процес роботи нової конфігурації тракту. Тому, в якості компонент низького порядку частіше використовують компоненти першого та другого порядку. Типовими задачами є зміна частоти зрізу або смуги пропускання компоненти, підвищення крутизни спаду амплітудно-частотної характеристики (АЧХ). Необхідно пояснити, що до загального поняття частотно-залежних компонент комп'ютерної системи включають як типові ланки систем управління, так і фільтри.

Слід відзначити, що первинна обробка сигналів починається вже в аналоговій частині тракту до перетворення вхідного аналогового сигналу датчику у вхідну послідовність (цифровий сигнал). Обробці сигналів у цифровій частині системи, присвячена велика кількість робіт, однак існують датчики і з аналоговим вихідним сигналом. І в аналоговій частині тракту обробки є необхідність перебудови характеристик частотно-залежних аналогових компонент.

Оскільки реалізація аналогових фільтрів, з точки зору схмотехнічних рішень, обмежена, то можна використати аналогові фільтри в інтегральному виконанні, які випускають такі фірми як Analog Devices, Maxim та Linear Technology [12-16]. Вони можуть бути 2, 5, 6, 8, 9 та 10 порядків, мати один вхід та декілька виходів, наприклад, ФНЧ та СФ, крім того вони мають характеристики фільтрів Bessel, Butterworth, Chebyshev, Elliptic.

Відомо, що в схмотехніці є три типу з'єднань компонент системи: послідовне (каскадне), паралельне та з включенням компоненти у зворотній зв'язок.

## 1. Аналіз впливу типу з'єднання однотипних компонент на характеристики з'єднання

При послідовному з'єднанні передавальних функцій однотипних компонент їх передавальні функції перемножуються

$$H(p) = \prod_{i=1}^n H_i(p),$$

де  $H_i(p), H(p)$  — відповідно  $i$ -а та кінцева передавальні функції.

Оскільки передавальна функція  $H_o(p)$  складається з амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик, компоненти однотипні, то можна записати

$$H_o(j\omega) = H_o(\omega) \cdot e^{j\varphi_o(\omega)},$$

де  $H_o(\omega), \varphi_o(\omega)$  — відповідно амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики основного однотипного компоненту.

Тому при послідовному з'єднанні однотипних компонент їх перемноження перетворюється у піднесення в ступень

$$H(p) = \prod_{i=1}^n H_i(p) = [H_o(p)]^n,$$

а характеристики АЧХ та ФЧХ відповідно трансформуються таким чином

$$H(j\omega) = [H_o(j\omega)]^n = [H_o(\omega)]^n \cdot e^{jn\varphi_o(\omega)}.$$

Інакше кажучи, основні зміни при такому з'єднанні відбуваються з АЧХ.

При паралельному з'єднанні компонент — їх передавальні функції складаються

$$H(p) = \sum_{i=1}^n H_i(p) = nH_o(p),$$

або для частотних характеристик

$$H(j\omega) = nH_o(j\omega) = nH_o(\omega) \cdot e^{j\varphi_o(\omega)}.$$

Таким чином, при паралельному з'єднанні компонент кількість компонентів еквівалента коефіцієнту підсилення.

При включенні однотипного компонента у негативний зворотній зв'язок складається наступна передавальна функція

$$H(p) = \frac{H_o(p)}{1 + H_o^2(p)}.$$

При такому з'єднанні його порядок з'єднання підвищується, але форми частотних характеристик підлягають суттєвим змінам.

І так, як показали дослідження доцільно для робототехнічних систем використовувати послідовне з'єднання однотипних компонентів.

Тому метою роботи є удосконалити підходи до обрання АЧХ та розрахункових формул послідовного з'єднання однотипних частотно-залежних компонент.

Проаналізуємо, як це відбувається для аналогових та цифрових компонент.

## 2. Дослідження змін АЧХ однотипних аналогових компонент у робототехнічній системі

Для дослідження змін АЧХ аналогових компонент при послідовному з'єднанні розглянемо фільтри низьких частот, оскільки

вони частіше використовуються у аналоговій частині тракту. Оберемо основний типовий фільтр низьких частот другого порядку Батерворту, який розраховано на частоту зрізу 1000 Гц. Так, при послідовному з'єднанні десяти таких фільтрів одержимо наступний вигляд АЧХ, рис. 1. Як бачимо з рис. частота зрізу зсувається в область низьких частот нерівномірно.

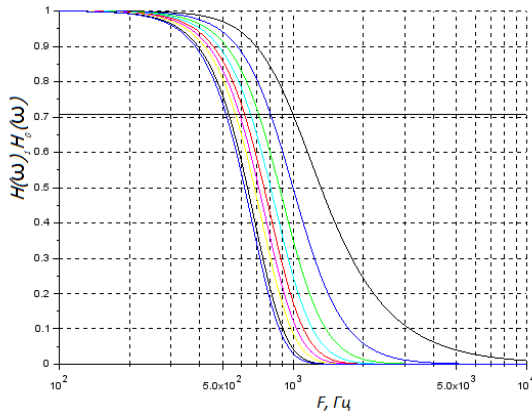


Рис. 1. АЧХ фільтрів Батерворту при їх послідовному з'єднанні

Аналіз частот зрізу показав нерівномірну залежність, яка наведена на рис. 2.

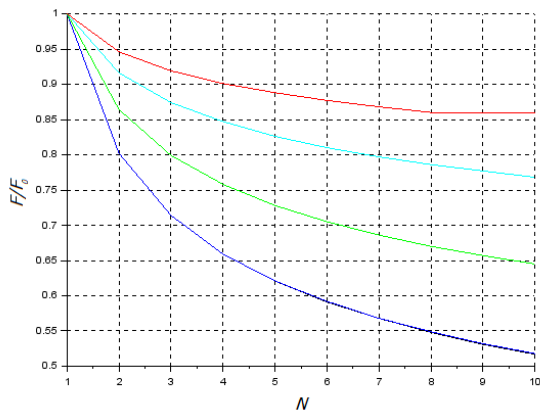


Рис. 2. Залежність нормованих частот  $F/F_0$

зрізу від кількості послідовно з'єднаних компонент  $N$ . Нижня - для основного типового фільтру 2 порядку, наступна - 3 порядку, далі - 5 порядку та остання 8 порядку

Як бачимо з рис. 2, чим вище порядок основного типового фільтру, тим повільніше спадає АЧХ. Тому у подальшому проведемо дослідження фільтрів другого порядку.

Для фільтру Батерворту другого прядку така залежність добре апроксимується рівнянням вигляду

$$F = F_0 N^{-0.284}, \quad (1)$$

де  $F_0$  - частота зрізу основного типового фільтру другого порядку, розрахованого на частоту 1000 Гц,  $F$  - частота зрізу фільтрів при їх  $N$  послідовному з'єднанні.

Виходячи з формули (1) можна знайти співвідношення для визначення частоти основного типового фільтру за частотою зрізу з'єднання  $F$  з  $N$  з'єднаних типових фільтрів другого порядку

$$F_0 = FN^{0.284}. \quad (2)$$

При послідовному з'єднанні фільтрів Чебишева першого роду та еліптичного вигляд АЧХ стає складним тому, що є в наявності рівень коливальності (ripple) у смузі пропускання (bandpass), рис. 3 та рис. 4.

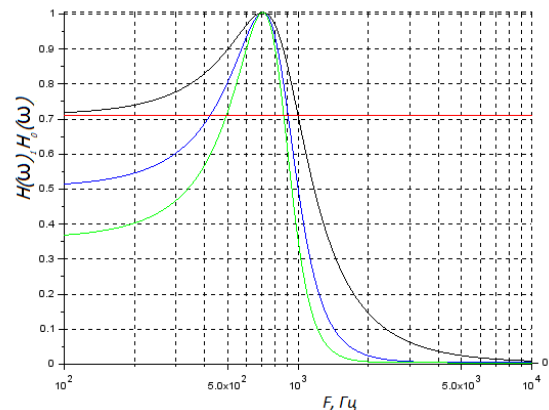


Рис. 3. АЧХ фільтру Чебишева першого роду другого порядку при їх послідовному з'єднанні

З рисунків рис. 3 та рис. 4 витікає, що частоти зрізу зсуваються в область низьких частот нерівномірно, аналогічно фільтру Батерворту. Однак, частота піка не зсувається, оскільки усі фільтри послідовного з'єднання однотипні. В смузі пропускання рівень коливальності зростає, що затрудняє проходження сигналу в смузі пропускання, а може використовуватися у спеціальних задачах. У еліптичного фільтру в смузі подавлення (bandstop) рівень подавлення також зростає. Таким чином, послідовне з'єднання фільтрів Чебишева першого роду та еліптичного не дозволяє підвищити порядок фільтру без суттєвих спотворень АЧХ у смузі пропускання.

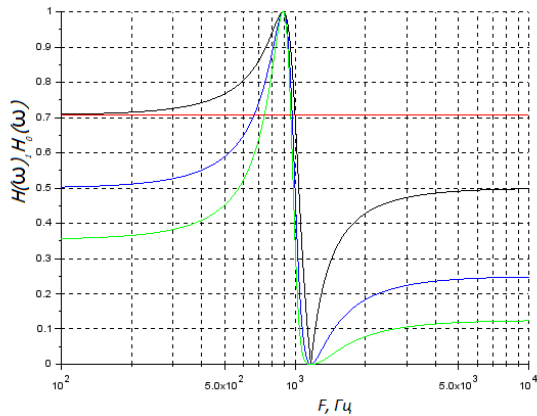


Рис. 4. АЧХ фільтрів еліптичного другого порядку при їх послідовному з'єднанні

На основі одержаних результатів можна відмітити, що для послідовного з'єднання однотипних фільтрів слід використовувати фільтри з плоскою АЧХ у смузі пропускання. Такими фільтрами є фільтри Батерворта та Чебишева другого роду.

Розглянемо вплив послідовного з'єднання однотипних фільтрів Чебишева другого роду другого порядку на їх АЧХ, рис. 5.

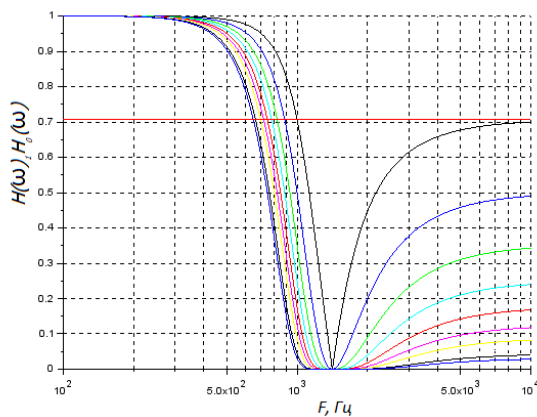


Рис. 5. АЧХ фільтрів Чебишева другого роду другого порядку при їх послідовному з'єднанні

Відмітимо, що в смузі пропускання АЧХ має вигляд аналогічний АЧХ Батерворту з нерівномірним зсувом частот зрізу в область низьких частот, в смузі затримки АЧХ поводить себе подібно еліптичному фільтру.

Дослідження частот зрізу при послідовному з'єднанні фільтрів Чебишева другого роду другого порядку така ж як і у фільтру Батерворта, рис. 6, і може бути апроксимована залежністю у вигляді

$$F = F_0 N^{-0.18}, \quad (3)$$

де  $F_0$  – частота зрізу основного однотипного фільтру другого порядку, розрахованого на частоту 1000 Гц,  $F$  – частота зрізу фільтрів при  $N$  їх послідовному з'єднанні.

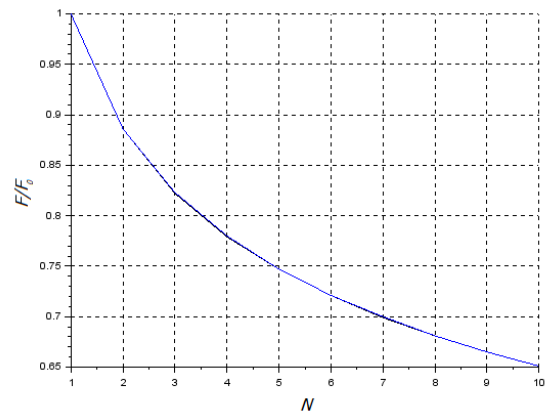


Рис. 6. Залежність нормованих частот зрізу від кількості послідовно з'єднаних фільтрів Чебишева другого роду другого порядку

Виходячи з формули (3) по аналогії з формулою (2) визначимо основну частоту основного типового фільтру по частоті зрізу з'єднання  $F$  з  $N$  з'єднаних фільтрів другого порядку

$$F_0 = FN^{0.18}. \quad (4)$$

При цьому рівень подавлення на максимальній частоті в смузі затримання має вигляд, рис. 7.

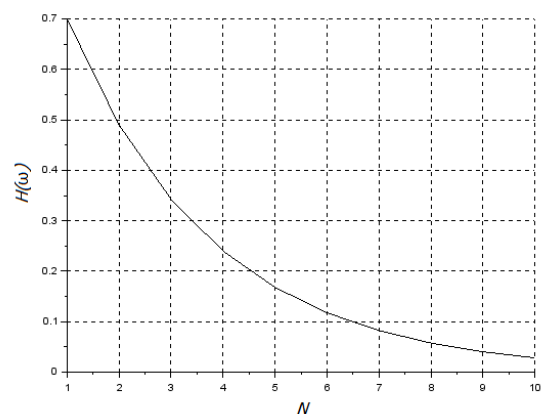


Рис. 7. Залежність рівня подавлення в смузі подавлення на максимальній частоті від кількості послідовно з'єднаних фільтрів Чебишева другого роду другого порядку

Така залежність добре апроксимується рівнянням вигляду

$$A = e^{-0.35N}.$$

Слід відмітити, що формули для визначення частоти зрізу однотипних фільтрів другого порядку (2) і (4) мають однаковий вигляд

$$F_o = FN^b. \quad (5)$$

Реалізація такої формули у робототехнічних системах з обмеженими обчислювальними ресурсами неможливо. Тому, залежність  $N^b$ , де  $N$  - ціле число, а  $0 < b < 1$  представимо у вигляді [16]

$$N^b = e^{b \ln N}. \quad (6)$$

Складність залежності обумовлює необхідність пошуку інших шляхів реалізації подібних залежностей. Оскільки кількість  $N$  обмежена, то доцільно їх обчислити заздалегідь та використовувати у табличному вигляді.

Порівнюючи рівняння (1) та (3) можна зробити висновок, що при послідовному з'єднанні швидкість зростання крутизни АЧХ вища у фільтрі Батерворту, рис. 8.

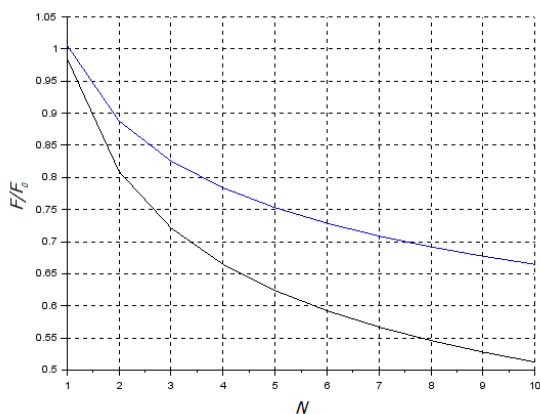


Рис. 8. Залежність нормованих частот зрізу від кількості послідовно з'єднаних фільтрів Батерворта (чорний) та Чебишева другого роду другого порядку (синій)

### 3. Дослідження змін АЧХ однотипних цифрових компонент у робототехнічній системі

При перемножуванні однотипних передатних функцій їх основна АЧХ, як це було показано вище, «стискається», при цьому частота зрізу зсувається в область низьких частот для ФНЧ, а для СФ – частоти зрізу зсуваються до центральної частоти. Слід зазначити зростання крутизни спаду АЧХ.

Для аналізу особливостей побудови цифрового тракту обробки розглянемо основні однотипні ФНЧ и СФ, які описуються

передавальними функціями другого порядку, рис. 9 та рис. 10.

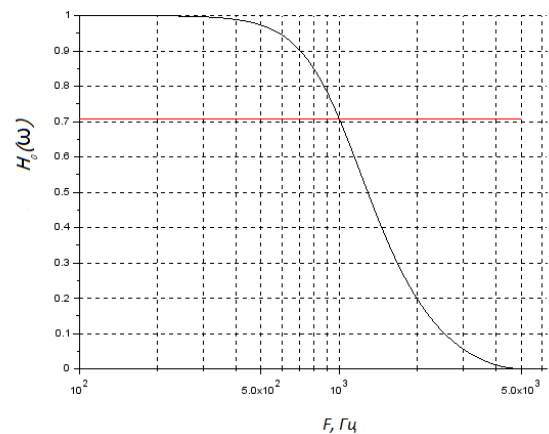


Рис. 9. АЧХ основного цифрового ФНЧ Батерворту другого порядку при частоті зрізу 1000 Гц

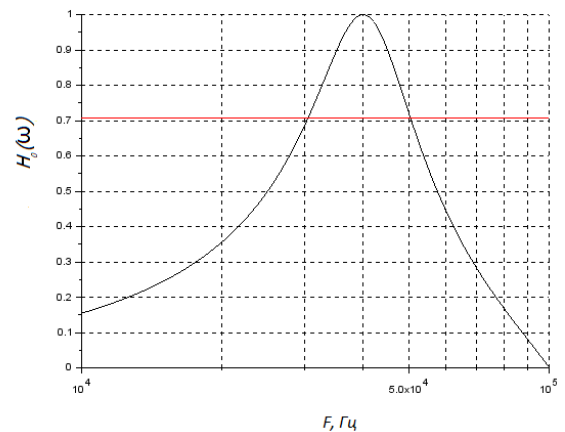


Рис. 10. АЧХ основного цифрового СФ Батерворту при центральній частоті 40 кГц

При послідовному з'єднанні цифрових ФНЧ Батерворту одержимо наступний вигляд АЧХ, рис. 11.

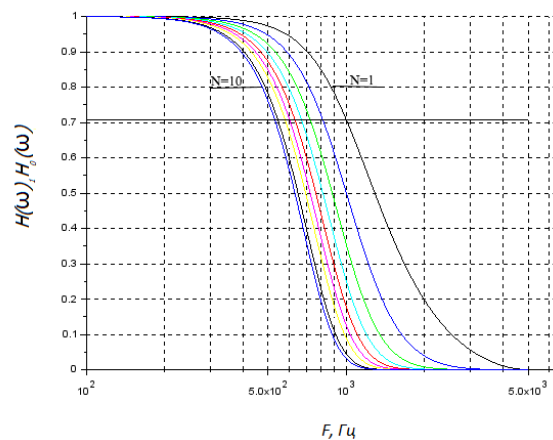


Рис. 11. АЧХ цифрових ФНЧ Батерворту при їх послідовному з'єднанні

Передавальна функція основного фільтру ФНЧ Батерворту математичне описується наступним чином

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}, \quad (7)$$

де  $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2$  — дійсні коефіцієнти чисельника та знаменника.

При підстановці  $z^{-1} = e^{-j\varpi}$  або за формулою Ейлера  $z^{-1} = \cos(\varpi) - j \sin(\varpi)$ , де  $\varpi$

$$\varpi = \frac{2\pi f}{f_d}$$

— нормована кутова частота,  $\omega \in [0, \pi]$ ,  $f, f_d$  — відповідно лінійна частота та частота дискретизації, одержимо комплексний коефіцієнт передачі, а на його основі АЧХ при  $a_0 = a_2$  та  $a_1 = 2a_0$ , і після перетворення маємо квадрат АЧХ

$$H^2(\varpi) = \frac{4a_0^2 (1 + \cos \varpi)^2}{(1 - b_2)^2 + (b_1 + 2 \cos 2\varpi)(b_1 + 2b_2 \cos \varpi)}. \quad (8)$$

Основний фільтр  $H_0(p)$  розрахований на частоту зрізу 1000Гц, який використовується у тракті обробки частотного датчика при зміні частоти від 100 до 950 Гц.

При дослідженні виконано послідовне з'єднання десяти однотипних основних фільтрів. Як видно з рис. 11 частота зрізу зсувається в область низьких частот нерівномірно, рис. 12.

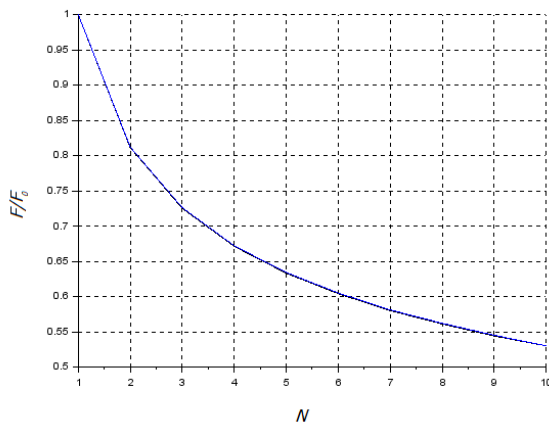


Рис. 12. Графік залежності нормованих частот зрізу АЧХ цифрових ФНЧ Батерворту при їх послідовному з'єднанні

Для фільтру Батерворту другого порядку така залежність добре апроксимується рівнянням у вигляді

$$F = F_0 N^{-0.27} \quad (9)$$

де  $F_0$  — частота зрізу основного фільтру другого порядку, розрахованому на частоту 1000 Гц,  $F$  — частота зрізу при  $N$  послідовно з'єднаних однотипних фільтрів.

Тоді для знаходження частоти зрізу основного фільтру за частотою послідовного з'єднання  $N$  однотипних фільтрів одержимо

$$F_0 = FN^{0.27}. \quad (10)$$

При послідовному з'єднанні фільтрів Чебишева першого роду та еліптичних вигляд АЧХ стає складнішим тому, що є рівень коливальності (ripple) у смузі пропускання (bandpass), рис. 13 та рис. 14.

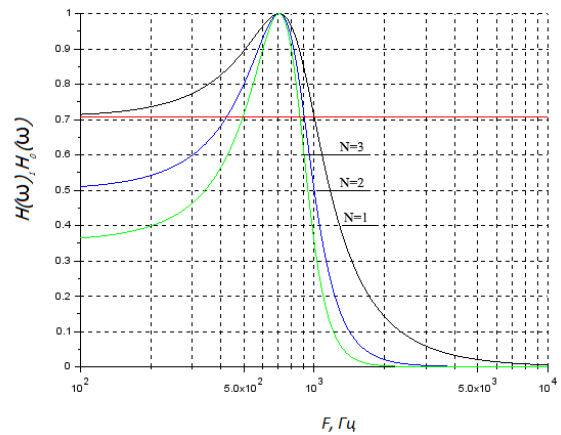


Рис. 13. АЧХ фільтрів Чебишева першого роду другого порядку при їх послідовному з'єднанні

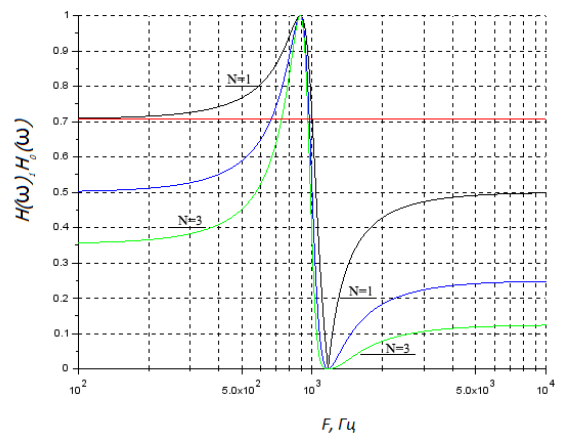


Рис. 14. АЧХ фільтрів еліптичного другого порядку при їх послідовному з'єднанні

З цих рисунків витікає, що частота зрізу зсувається в область низьких частот нерівномірно, аналогічно фільтру Батерворту. Однак, частота піку не зсувається, оскільки усі фільтри послідовного з'єднання однотипні. В смузі пропускання рівень коливальності зростає,

що можна використовувати у спеціальних задачах. У еліптичного фільтру в смузі подавлення (bandstop) рівень подавлення також зростає. Таким чином, послідовне з'єднання фільтрів Чебишева першого роду та еліптичного не дозволяє підвищити порядок фільтру без суттєвих спотворень АЧХ в смузі пропускання. Аналогічне було показано і у аналогових фільтрах.

На основі одержаних результатів дійдемо висновку, що для послідовного з'єднання однотипних фільтрів, як і у аналогових фільтрах, слід використовувати основні фільтри з плоскою АЧХ в смузі пропускання. Такими фільтрами є фільтри Батерворту та Чебишева другого роду другого порядку.

Розглянемо вплив послідовного з'єднання однотипних фільтрів Чебишева другого роду другого порядку на їх АЧХ, рис. 15.

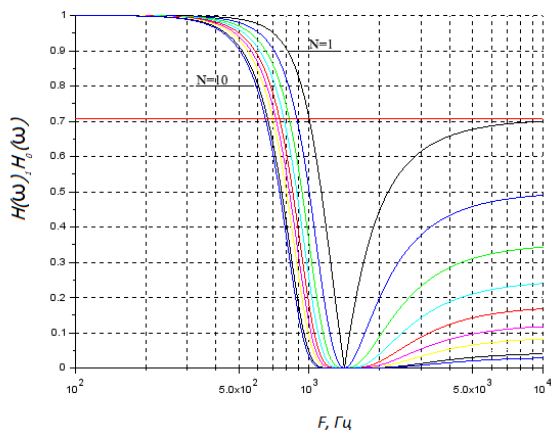


Рис. 15. АЧХ фільтрів Чебишева другого роду другого порядку при їх послідовному з'єднанні

Відмітимо, що в смузі пропускання АЧХ має вигляд аналогічний АЧХ Батерворту з нерівномірним зсувом частот зрізу в область низьких частот, в смузі затримки АЧХ поводить себе як еліптичний фільтр.

Залежність частот зрізу при послідовному з'єднанні основних однотипних фільтрів Чебишева другого роду другого порядку така ж сама, як і у фільтрів Батерворту, рис. 16. Ця залежність може бути апроксимована таким чином, як і у аналогових фільтрів

$$F = F_o N^{-0.18}, \quad (11)$$

де  $F_o$  – частота зрізу основного фільтру другого порядку, розрахованого на частоту 1000 Гц,  $F$  – частота зрізу фільтрів при  $N$  послідовно з'єднаних основних фільтрів.

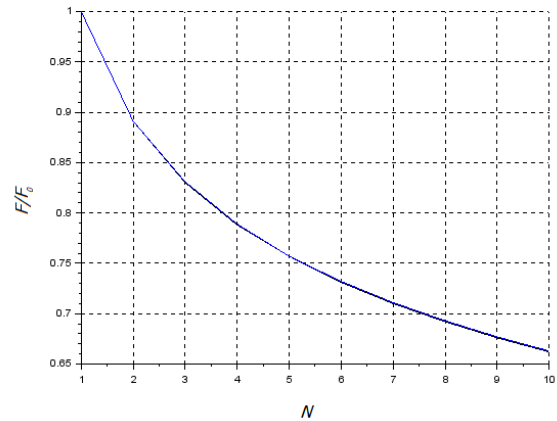


Рис. 16. Залежність нормованих частот зрізу від кількості послідовно з'єднаних основних фільтрів Чебишева другого роду другого порядку

Аналогічно можна одержати звернену формулу

$$F_o = FN^{0.18}. \quad (12)$$

Аналіз рівнянь (9) та (11) показує, що при послідовному з'єднанні однотипних основних фільтрів швидкість зростання крутизни АЧХ вище у фільтру Батерворту, рис. 17.

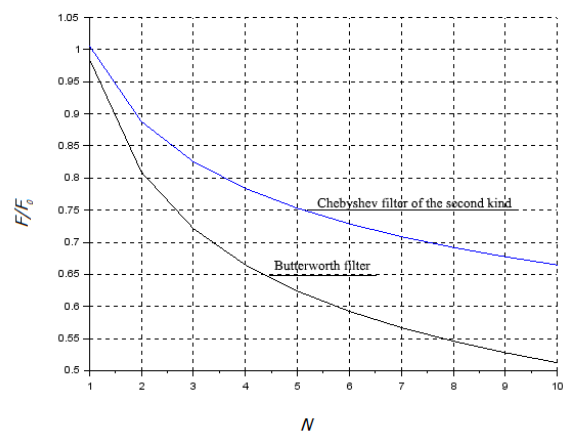


Рис. 17. Залежність нормованих частот зрізу від кількості послідовно з'єднаних основних фільтрів Чебишева другого роду другого порядку

Аналіз застосування однотипних основних смугових фільтрів Батерворту проводився при застосуванні акустичного датчика з частотою випромінювання 40кГц. Основний фільтр має АЧХ, яка наведена на рис. 10, и квадрат АЧХ описується таким чином

$$H^2(\varpi) = \frac{(2a_0 \sin \varpi)^2}{(1 - b_2)^2 + b_1^2 + 2b_1(1 + b_2) \cos \varpi + 4b_2 \cos^2(\varpi)}$$

Послідовне з'єднання основних фільтрів показано на рис. 18.

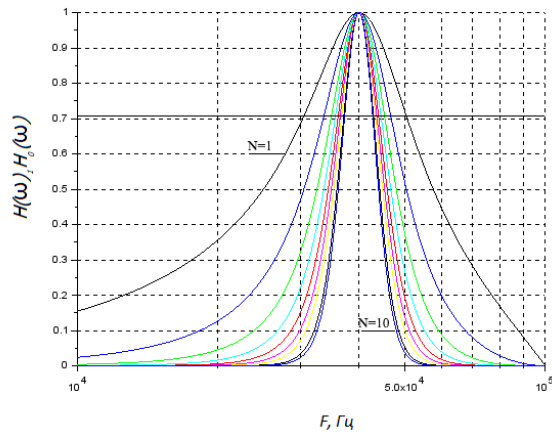


Рис. 18. АЧХ цифрових смугових фільтрів Батерворту при їх послідовному з'єднанні

З рис. 18 витікає, що частоти зрізу зсуваються до центральної частоти 40 кГц при цьому звужується смуга пропускання та зростає крутизна спаду АЧХ. Залежність зсуву частоти зрізу та звуження смуги пропускання показані на рис. 19 та рис. 20.

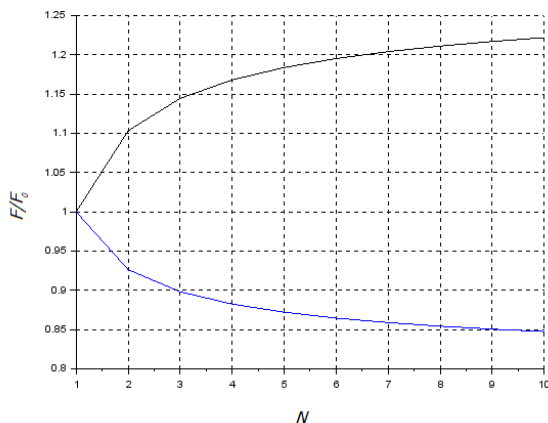


Рис. 19. Графік залежності нормованих частот зрізу АЧХ смугових цифрових фільтрів Батерворту при їх послідовному з'єднанні

З рис. 19 видно, що отримані залежності добре апроксимуються наступними рівняннями

$$\text{- ліва частота зрізу - } F = F_0 N^{0.081}$$

$$\text{- права частота зрізу - } F = F_0 N^{-0.06}$$

Ширину смуги пропускання, при послідовному з'єднанні основних смугових фільтрів, можна апроксимувати залежністю

$$dF = dF_0 N^{-0.55},$$

де  $dF$  – ширина смуги пропускання послідовного з'єднання,  $dF_0$  – ширина смуги пропускання основного фільтру.

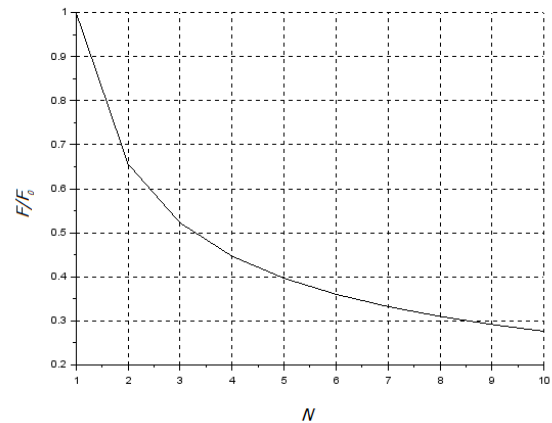


Рис. 20. Графік залежності нормованих смуг пропускання АЧХ цифрових смугових фільтрів Батерворту при їх послідовному з'єднанні

Реалізація таких формул у робототехнічних системах з обмеженими обчислювальними ресурсами неможлива. Тому, як і при використанні аналогових компонент, при обмеженій кількості з'єднань, доцільно їх обчислити заздалегідь та використовувати у табличному вигляді.

### Висновки

У технічних задачах рівень апроксимації обирається з розрахунку відносної похибки не більш 1%, так і при розрахунках у табличному вигляді для зручності використання

При побудові та комутації в аналоговому та цифровому трактах обробки основні однотипні фільтри слід заздалегідь розрахувати на обмежених значеннях та розташувати у пам'яті для оперативної перебудови тракту. Такий варіант попереднього розрахунку найбільш прийнятний та може фізично виконуватись при застосуванні ПЛІС.

Таким чином, при послідовному з'єднанні аналогових та цифрових основних однотипних фільтрів доцільно використовувати основні фільтри другого порядку Батерворту та Чебишева другого роду з плоскими АЧХ в смузі пропускання, що забезпечить добрий ріст крутизни спаду АЧХ та надає можливість прогнозувати значення частоти зрізу для ФНЧ. А для смугових фільтрів тільки фільтри Батерворту.

## References

1. The Industry 4.0 Standards Landscape from a Semantic Integration Perspective Conference Paper (PDF Available) · September 2017 with 4,699 Reads DOI: 10.1109/ETFA.2017.8247584 Conference: Conference: 2017 IEEE 22nd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), At Limassol, Cyprus, available: [https://www.researchgate.net/publication/318208930\\_The\\_Industry\\_40\\_Standards\\_Landscape\\_from\\_a\\_Semantic\\_Integration\\_Perspective](https://www.researchgate.net/publication/318208930_The_Industry_40_Standards_Landscape_from_a_Semantic_Integration_Perspective)
2. Industry 4.0: an overview. Conference Paper (PDF Available) · July 2018 with 7,147 Reads, available at: [https://www.researchgate.net/publication/326352993\\_Industry\\_40\\_an\\_overview](https://www.researchgate.net/publication/326352993_Industry_40_an_overview)
3. Industry 4.0, available: <https://www.cognex.com/ru-ru/what-is/industry-4-0-machine-vision/development>.
4. Adel Amr. Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas. Journal of Cloud Computing volume 11, Article number: 40 (2022), available at: <https://journalofcloudcomputing.springeropen.com/articles/10.1186/s13677-022-00314-5>
5. Ch. Schuster, A. Wiens, "Performance Analysis of Reconfigurable Bandpass Filters With Continuously Tunable Center Frequency and Bandwidth", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 65, i. 11, 2017, pp. 4572 – 4583.
6. M. Rais-Zadeh, J. Fox, D. Wentzloff, Y. Gianchandani, "Reconfigurable radios: a possible solution to reduce entry costs in wireless phones", Proceedings of the IEEE, vol. 103, 2015, pp. 438–451.
7. J. Mao, W. Choi, K. Tam, W. Che, Q. Xue, "Tunable bandpass filter design based on external quality factor tuning and multiple mode resonators for wideband applications", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 61, 2013, pp. 2574–2584.
8. Semenov, S., Voloshyn, D., Ahmed, A.N. "Mathematical model of the implementation process of flight task of unmanned aerial vehicle in the conditions of external impact", International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, vol. 8(1), pp. 7-13, 2019.
9. Zhuravska, I., Musyienko, M., Tohoiev, O. "Development the heat leak detection method for hidden thermal objects by means the information- measuring computer system". CEUR Workshop Proceedings, 2353, pp. 350-364, 2019.
10. Musiyenko, M.P., Denysov, O.O., Zhuravska, I.M., Burlachenko, I.S. "Development of double median filter for optical navigation problems". Proceedings of the 2016 IEEE 1st International Conference on Data Stream Mining and Processing, DSMP 2016, 7583535, pp. 177-181, 2016.
11. Ukhina, H., Sytnikov, V., Streltsov, O., Stupen, P., Yakovlev, D. "Transfer Function Coefficients Influence on the Processing Path Bandpass Frequency-Dependent Components' Amplitude Frequency Characteristics Properties at the NPP TP ACS". Conference Proceedings of 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2019, June 2019, Номер статті 8770050, Pages 193-196 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2019; Leeds; United Kingdom; 5 June 2019 до 7 June 2019, DOI: 10.1109/DESSERT.2019.8770050
12. <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/analog-filters/MAX270.html>
13. <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/analog-filters/MAX274.html>
14. <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/analog-filters/MAX275.html>
15. <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/analog-filters/MAX296.html>
16. <https://www.analog.com/en/products/analog-functions/filters/low-pass-filters.html>
17. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientists and engineers – McGraw Hill Book Company, N.York, 1974 – 832 p.

## ROBOTIC SYSTEM WITH SINGLE-TYPE FREQUENCY-DEPENDENT COMPONENTS DURING PROCESSING OF SENSOR SIGNALS

**T.V. Sytnikov, P.V. Stupen**  
*Odesa Polytechnic National University*

**Abstract.** *The issue of building a sensor signal processing path on the same type of components in computer robotic systems, which can comprehensively rebuild their characteristics by software and hardware means depending on the operating conditions to increase the system efficiency, is considered. Different types of connections of analog and digital second-order frequency-dependent components are considered, since a high-order processing path is easier to form from the same type of low-order components. This is due to the low cost of calculating the coefficients of the transfer function and the number of coefficients, ease of adjustment or reconstruction, moderate power consumption and processing time. It is shown that a serial connection is best suited for the sensor signal processing path, since signal distortion occurs in other connections. To increase the order of the processing path, it is suggested to use a serial connection of the same type of frequency-dependent components of the second order. Obtained ratios that allow to calculate the frequency of the main typical component based on the required frequency of several components connected in series. These ratios are very difficult to implement in robotic systems, as they do not have large computing resources. Since the range of frequencies and the number of components are limited, it is recommended to calculate the necessary frequencies in advance and summarize them in the table. When working in real time, it is advisable to use these tables for rebuilding. When connecting analog and digital basic filters of the same type in series, it is advisable to use the main filters of the second order of Butterworth and Chebyshev of the second kind with flat frequency response in the passband, which will ensure a good increase in the steepness of the frequency response decline and make it possible to predict the value of the cutoff frequency for the low-pass filter. And for bandpass filters, only Butterworth filters.*

**Keywords:** *Industry 4.0-5.0, robotic systems, frequency-dependent components, component connection types, series connection, main typical component, amplitude-frequency characteristic.*

Отримано 25.02.2023



**Ситніков Тихон Валерійович**, Національний університет «Одеська політехніка», аспірант кафедри комп'ютерних систем. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: tykhon.sytnikov@gmail.com, тел. +38-048-705-84-54

**Tykhon Sytnikov**, Odesa Polytechnic National University, post-graduate student of the Computer Systems department, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0002-0137-5643



**Ступень Павло Вячеславович**, Національний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: stek2000@gmail.com, тел. +38-048-705-85-13

**Pavlo Stupen**, Odesa Polytechnic National University, PhD, associate professor, associate professor of the computer systems department, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0003-1952-6144