

Корольов А.П. к.т.н., доцент,
професор кафедри комп'ютерної математики та захисту інформації,
ДВНЗ «КНЕУ імені Вадима Гетьмана».

Рибка С.В. к.т.н., доцент,
помічник директора Інституту проблем моделювання в енергетиці
НАН України.

Варава І.А. к.т.н., доцент,
доцент кафедри автоматизованого проектування
енергетичних процесів та систем,
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Мацаєнко А.М. к.т.н.,
старший викладач кафедри побудови телекомунікаційних систем,
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації
імені Героїв Крут.

Korolov A.P., Candidate of Technical Sciences,
Professor of the Department of Computer Mathematics
and Information Security,
SHEI KNEU named after V. Hetman.

Rybka S.V., Candidate of Technical Sciences,
assistant director Institute of Energy Modeling Problems
of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Varava I.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Automated Design of Energy
Processes and Systems, NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Matsaenko A.M., Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer of the Department of Construction
of Telecommunication Systems,

Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Informatization.

ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ «ДИЗАЙНЕР СМУГОВИХ ФІЛЬТРІВ НА ОСНОВІ ЧАСТОТНОЇ ВИБІРКИ»

SOFTWARE FOR DESIGN OF DIGITAL FILTERS “DESIGNER OF BANDPASS FREQUENCY SAMPLING FILTERS”

Анотація. Існує багато програмних засобів для проектування цифрових фільтрів. Наприклад, пакет прикладних програм MATLAB має можливість моделювати та обчислювати різні типи цифрових фільтрів. Однак фільтрам частотної дискретизації (FSF) приділяється мало уваги, а відомих і доступних програмних засобів для їх розрахунку немає. Такі фільтри мають високу обчислювальну ефективність і гнучкість у переналаштуванні діапазонів частот, які аналізуються. Вони можуть бути корисними при розробці високопродуктивних аналізаторів спектру, обробки мовних сигналів, маніпуляції квадратурними фазовими сигналами тощо. Метод частотної дискретизації є одним із методів проектування фільтрів із кінцевою імпульсною характеристикою (KIX). Він полягає в отриман-

ні коефіцієнтів передатної функції фільтра безпосередньо з відліків заданої амплітудно-частотної характеристики (частотної характеристики). Ця характеристика легко встановлюється для смуг затримання (вона дорівнює нулю) і смуги пропускання (це одиниця). Отже, вагові коефіцієнти передатної функції, що визначаються частотною характеристикою в смугі пропускання, дорівнюють одиниці. Результуюча частотна характеристика фільтра відрізняється від бажаної на інтервали між вузлами інтерполяції. Ця різниця суттєво визначається заданими значеннями коефіцієнтів у перехідних смугах (так звані коефіцієнти переходу). Таким чином, основна проблема апроксимації полягає у правильному виборі порядку передатної функції та оптимальному визначенні коефіцієнтів переходу.

Метою даної статті є опис можливостей програмного засобу «Конструктор смугових частотних дискретизаційних фільтрів», що дозволяє оптимально розв'язати задачу апроксимації ФЧП, та продемонструвати приклад розв'язання такої задачі. Стаття має науково-методичний характер.

Ключові слова: цифровий фільтр; фільтри частотної дискретизації; вагові коефіцієнти; частотні коефіцієнти; коефіцієнти переходу; передатна функція; характеристика загасання; цифровий банк смугових фільтрів.

Abstract. There are many software tools for designing digital filters. For example, the MATLAB application package has the ability to model and calculate different types of digital filters. However, little attention is paid to frequency sampling filters (FSF) and there are no well-known and available software tools for their calculation. Such filters have high computational efficiency and flexibility in reconfiguring the frequency bands that are analyzed. They can be useful in the design of high-performance spectrum analyzers, speech signal processing, quadrature phase signal manipulation, etc.

The frequency sampling method is one of the methods of designing filters with finite impulse response (FIR). It consists in obtaining the coefficients of the transfer function of the filter directly from the samples of a given amplitude-frequency characteristic (frequency response). This characteristic is easily set for stopbands (it is zero) and passband (it is one). Therefore, the weighting coefficients of the transfer function, determined by the frequency response in the passband are equal to one. The resulting frequency response of the filter differs from the desired at intervals between interpolation nodes. This difference is significantly determined by the specified values of the coefficients in the transition bands (so-called transition coefficients). Thus, the main problem of approximation is contained in the correct choice of the order of the transfer function and the optimal determination of the transition coefficients.

The purpose of this article is to describe the capabilities of the software tool "Designer of bandpass frequency sampling filters", which allows you to optimally solve the problem of approximation FSF, and demonstrate an example of solving such a problem. The article has a scientific and methodological nature.

Keywords: digital filter; frequency sampling filters; weighting coefficients; frequency coefficients; transition coefficients; transfer function; attenuation characteristic; digital bank of bandpass filters.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує багато програмних засобів для проектування цифрових фільтрів. Наприклад, у пакеті прикладних MATLAB є можливості моделювання та розрахунку різних типів цифрових фільтрів [1–4]. Проте фільтрам на основі частотної вибірки (ФОВ) приділяється мало уваги та загально-відомих і доступних програмних засобів їх розрахунку немає. Такі фільтри мають високу обчислювальну ефективність і гнучкість при переналаштуванні

смуг частот, що аналізуються. Вони можуть бути корисними при проектуванні високопродуктивних аналізаторів спектру, обробці мовних сигналів, квадратурній фазовій маніпуляції сигналів тощо.

Метод частотної вибірки є одним з методів проектування фільтрів з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ) [5, 9–14]. Він полягає в отриманні коефіцієнтів передавальної функції фільтра безпосередньо з вибірок заданої амплітудно-частотної характеристики (АЧХ). Ця характеристика легко задається для смуг затримки (вона дорівнює нулю) і смуги пропускання (вона дорівнює одиниці). Тому вагові коефіцієнти передавальної функції, що визначаються АЧХ у смузі пропускання дорівнюють одиниці. При цьому результуюча частотна характеристика фільтра відрізняється від бажаної на інтервалах між вузлами інтерполяції. Ця різниця суттєво визначається заданими значеннями вагових коефіцієнтів у перехідних смугах, так званими перехідними коефіцієнтами [5, 13, 14]. Таким чином, основна задача апроксимації міститься у правильному виборі порядку передавальної функції та оптимальному визначенні перехідних коефіцієнтів. Відомий американський спеціаліст в області цифрової обробки сигналів Р. Лайонс у своїй роботі [5] розглядає задачу проектування ФОЧВ і наводить таблиці для їх розрахунку із значеннями перехідних коефіцієнтів передавальних функцій фільтрів нижніх частот (ФНЧ). Але не наводить інформації про те, як вони отримані та які алгоритми або програмні продукти використані. Крім того, наведені таблиці не враховують такий важливий параметр фільтрів, як нерівномірність характеристики загасання у смузі пропускання. Таблиці включають обмежене коло результатів і лише для ФНЧ.

У дослідженнях [9–14] оптимальні значення цих коефіцієнтів розраховуються за допомогою програм на основі алгоритмів чисельної оптимізації. Так у роботі [10] використовується метод еволюційного програмування, у роботі [9] — генетичний алгоритм (GA), у роботі [11] — метод рою частинок (PSO). У цих роботах критерієм розрахунку найчастіше є максимальне гарантоване загасання у смугах затримки. У роботах [12–14] отримано аналітичні вирази для розрахунку перехідних коефіцієнтів на основі мінімальної середньоквадратичної помилки між бажаною та результуючою частотною характеристикою фільтра у смугах затримки. Рішення задачі апроксимації за допомогою таблиць можливо лише для фільтрів, характеристики яких відповідають табличним. Для випадку задання нетабличних вимог обрані табличні рішення можуть бути далеко не оптимальними. Запропоновані оптимізаційні методи складні для програмної реалізації та

потребують багато часу для пошуку оптимального рішення. Недоліком відомих методів є також відсутність чіткого алгоритму дій щодо знаходження порядку фільтра та початкових значень перехідних коефіцієнтів передавальної функції, який дав би змогу проектувальникам послідовно вирішувати задачу апроксимації і програмно реалізовувати цю методику. У роботі [6] запропоновано оптимізаційну методику вирішення задачі апроксимації ФОЧВ, яку можна реалізувати програмно. Ця методика була покладена в основу оптимізаційної процедури, яка реалізована у програмному засобі.

Метою даної статті є опис можливостей цього програмного засобу та демонстрація прикладу вирішення задачі апроксимації ФОЧВ. Стаття має науково-методичний характер.

Опис програмного засобу. Пропонується розроблений програмний засіб «Дизайнер смугових фільтрів на основі частотної вибірки» [7], за допомогою якого можна провести інтерактивне проектування цифрових фільтрів методом частотної вибірки на основі модифікованої передавальної функції з дійсними коефіцієнтами. Інтерфейс користувача може бути відображений українською та англійською мовами. Користувачі спершу переходять за посиланням на головну сторінку публічної частини сайту, де приводиться основна інформація про можливості програмного продукту.

Меню містить посилання для переходу на сторінки «Головна», «Дизайнер фільтрів», «Публікації» та «Контакти». Основна робота здійснюється на сторінці «Дизайнер фільтрів»

Користувачу надається форма для вводу основних вимог до параметрів цифрового фільтру, що проектується:

- частоти зрізу;
- задане гарантоване загасання у смузі затримування;
- задана нерівномірність загасання у смузі пропускання.

При введенні цих параметрів автоматично розраховуються параметри, які застосовуються при апроксимації передавальної функції: порядок фільтру, значення частот у вузлах інтерполяції, частотні коефіцієнти, початкові інтерпольовані значення вагових коефіцієнтів у смузі пропускання та перехідній смузі, а також інші коефіцієнти. Одночасно відбувається оновлення графіку частотної характеристики загасання.

В алгоритмі апроксимації застосовуються:

- спосіб найкращого розташування сплесків загасання в смузі затримування фільтру на основі частотної вибірки;
- критерій досягнення глобально-оптимального рішення задачі апроксимації у смузі затримування фільтру на основі частотної вибірки;

- спосіб досягнення заданої величини нерівномірності характеристики загасання у смузі пропускання за допомогою коефіцієнтів Гіббса;
- властивість симетрії частотних характеристик передавальної функції;
- спосіб зменшення ширини перехідної смуги;
- властивість ідентичності вагових коефіцієнтів передавальної функції.

Рішення може бути використане для проектування банків цифрових смугових фільтрів і застосоване при обробці широкосмугових сигналів в радіолокації, гідролокації, телекомунікаціях, медичному електронному обладнанні. Адміністративна частина сайту дозволяє переглядати статистику відвідувань і повідомлення залишені за допомогою форми зворотного зв'язку із сторінки «Контакти».

Веб-ресурс реалізовано за допомогою стеку технологій *HTML5*, *JavaScript*, *PHP* і *MySQL*.

Мета створення дизайнеру смугових фільтрів на основі частотної вибірки. Дизайнер фільтрів створений з метою зручного інтерактивного визначення передавальної функції цифрових смугових фільтрів на основі частотної вибірки (ФОВ) за заданими вимогами до частотної характеристики загасання.

Програмний продукт допомагає розробникам ФОВ вирішити задачу першого етапу синтезу — задачу апроксимації. Єдиного загальноприйнятого алгоритму вирішення цієї задачі на даний час немає, що обумовлює відсутність відповідних довідників з розрахунку ФОВ. Отримані за допомогою дизайнера рішення є близькими до оптимальних.

Перша версія програмного продукту надає можливість розраховувати значення перехідних вагових коефіцієнтів (від одного до трьох для кожної смуги переходу) і вагових коефіцієнтів Гіббса. Ці коефіцієнти забезпечують локально оптимальне вирішення задачі апроксимації. Інші вагові коефіцієнти передавальної функції для смуги пропускання задаються рівними одиниці. Це значно полегшує задачу реалізації фільтра, але обумовлює не повну оптимальність рішення. Граничні частоти смуг затримування та пропускання фільтра визначаються «по факту розрахунку», тобто після забезпечення вимог до загасання. Всі інші параметри передавальної функції задаються у вихідних даних або розраховуються за наведеними формулами.

Наступна версія програмного продукту буде надавати можливість проводити розрахунки при строго заданих у вихідних даних частотах зрізу смугового фільтра.

Опис передавальної функції, що використовується

Модифікована передавальна функція має вигляд:

$$H(z) = (1 - t \times z^{-m}) \times \frac{1}{m} \times (1 - z^{-2}) \times \sum_k \frac{A_k(x_k) \times (-1)^k}{(1 + b_{1k}z^{-1} + b_{2k}z^{-2})}. \quad (1)$$

Коефіцієнти $A_k(x_k)$ функції (1) визначаються як модуль комплексної передавальної функції у вузлах інтерполяції:

$$A_k = |H(jx_k)|,$$

де k — номер вузла інтерполяції;

x_k — фіксовані значення нормованої цифрової частоти у особливих точках на інтервалі $x \in [0; \pi]$, які визначаються за формулами:

$$x_k = k \times \left(\frac{2\pi}{m}\right); \quad k = 0 \dots \left(\frac{m}{2}\right).$$

Або коефіцієнти A_k можна визначити через частотну характеристику загасання:

$$A_k = 10^{-\frac{a_k}{20}},$$

де a_k — значення характеристики загасання, що апроксимується, у вузлах інтерполяції (дБ).

Коефіцієнти b_{1k} і b_{2k} визначаються таким чином:

$$b_{1k} = -2r \cos(x_k), \quad b_{2k} = 1 - 2^{-d_d},$$

де $r = \sqrt{1 - 2^{-d_d}}$ — полюсна відстань;

d_d — розрядність регістрів для запису кодів дробової частини;

m — порядок гребінчастого фільтра;

b_{1k} — частотні коефіцієнти, що визначають частоти резонансів цифрового резонатора;

b_{2k} — це фазовий коефіцієнт цифрового резонатора;

$\frac{1}{m}$ — нормуючий коефіцієнт;

t — коефіцієнт гребінчастого фільтра, який вводиться для усунення стану «множення на нуль» і враховує розрядність регістрів: $t = r^m = \left(\sqrt{1 - 2^{-d_d}}\right)^m$.

Після задання вихідних даних усі коефіцієнти передавальної функції (1), за виключенням вагових коефіцієнтів A_k просто розраховуються за допомогою наведених вище формул.

Найскладнішою задачею у даному випадку є знаходження оптимальних значень вагових коефіцієнтів A_k .

З метою зменшення числа математичних операцій вагові коефіцієнти цифрових резонаторів, центральні частоти яких знаходяться в смузі пропускання, доцільно прирівнювати одиниці ($A_k = 1$).

Вагові коефіцієнти цифрових резонаторів, центральні частоти яких знаходяться у перехідній смузі, називають перехідними ваговими коефіцієнтами і позначають — T_1, T_2, T_3 (рис. 1). У передавальній функції (1) перехідні коефіцієнти підставляються замість відповідного за частотою резонансу вагового коефіцієнта A_k цифрового резонатора. Перехідні вагові коефіцієнти в найбільшій мірі впливають на формування гарантованого загасання у смугах затримки фільтра. Кількість перехідних вагових коефіцієнтів в одній перехідній смузі позначається — T .

Для зменшення величини нерівномірності характеристики загасання фільтра у смузі пропускання застосовуються вагові коефіцієнти Гіббса. Ваговий коефіцієнт Гіббса (G) — це ваговий коефіцієнт цифрового резонатора, центральна частота якого знаходиться в перехідній смузі біля межі із смугою пропускання фільтра (рис. 1). Вагові коефіцієнти Гіббса в найбільшій мірі впливають на формування мінімальної нерівномірності характеристики загасання у смузі пропускання фільтра. У передавальній функції (1) коефіцієнти Гіббса підставляються замість відповідних вагових коефіцієнтів A_k . Їх кількість — завжди по одному в кожній перехідній смузі.

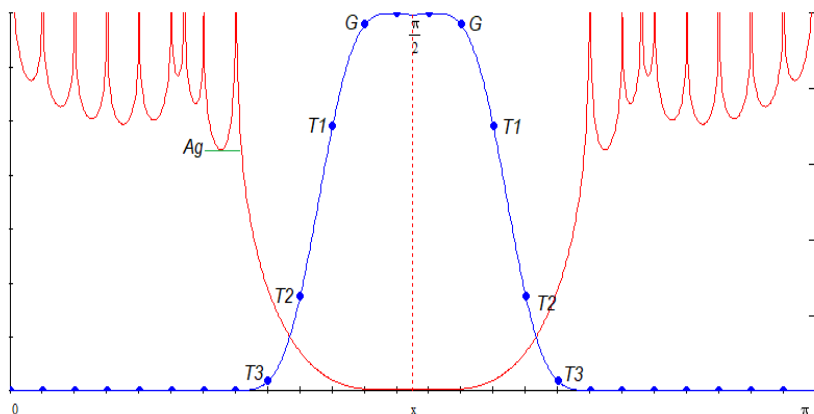


Рис. 1. Характеристики фільтра — АЧХ і загасання

Приклад розрахунку та аналіз результату. Покажемо приклад, в якому за заданими параметрами смугового ФОЧВ за допомогою ресурсу [7] визначається його модифікована передавальна функція (1). Вона забезпечує абсолютно симетричну відносно основної осі симетрії робочого діапазону нормованих цифрових частот $\pi/2$ частотну характеристику ослаблення. Проводиться аналіз цієї характеристики — визначається гарантоване ослаблення у смузі затримування a_g та нерівномірність ослаблення у смузі пропускання Δa .

Наприклад, вихідні дані для розрахунку ФОЧВ такі:

$m = 118$ — порядок гребінчастого фільтру;

$k \in \left\{1; \frac{118}{2} - 1\right\}$ — номери вузлів інтерполювання;

$K = 4$ — кількість вагових коефіцієнтів у смузі пропускання значення яких дорівнює одиниці ($A_k(x_k) = 1$);

$T = 2$ — кількість перехідних вагових коефіцієнтів;

G — коефіцієнт Гіббса (завжди один);

$i \in \{1 \dots 11\}$ — номери виходів банку фільтрів.

З початку розраховується абсолютно симетричний варіант відносно основної осі симетрії робочого діапазону нормованих цифрових частот — $\pi/2$. Для цього використовуємо «Дизайнер смугових фільтрів на основі частотної вибірки» [13]. Отримуємо групу вагових коефіцієнтів смугового ФОЧВ (табл. 1). Номери вагових коефіцієнтів $k = 25 - 34$ визначаються автоматично з умови симетрії вузлів інтерполювання відносно значення $\pi/2$ та відповідно до інших вихідних даних.

Значення нормуючого коефіцієнту $n_s = 1.001927999$. Передавальну функцію (1) потрібно помножити на коефіцієнт $1/n_s$.

Таблиця 1

ВАГОВІ КОЕФІЦІЄНТИ СМУГОВОГО ФОЧВ ($M = 118, T = 2$)

Номери вагових коефіцієнтів	Значення вагових коефіцієнтів
$T_2 = A_{25}$	0.04615100973
$T_1 = A_{26}$	0.35726722354
$G = A_{27}$	0.83074043393
A_{28}	1
A_{29}	1
A_{30}	1
A_{31}	1
$G = A_{32}$	0.83074043393
$T_1 = A_{33}$	0.35726722354
$T_2 = A_{34}$	0.04615100973

Характеристику ослаблення цього фільтру зображено на рис. 2. Отримане рішення відповідає умові:

$$\begin{cases} \Delta a = \Delta a_{\min \min}; \\ a_g = a_{g\max \max}. \end{cases}$$

При цьому:

$a_g = 105.39$ дБ (значення гарантованого загасання у смузі затримування);

$\Delta a = 0.021$ дБ (нерівномірність загасання у смузі пропускання).

Всі інші коефіцієнти передавальної функції (1) ФОЧВ розраховуються відповідно з формулами, приведеними в описі ресурсу [13].

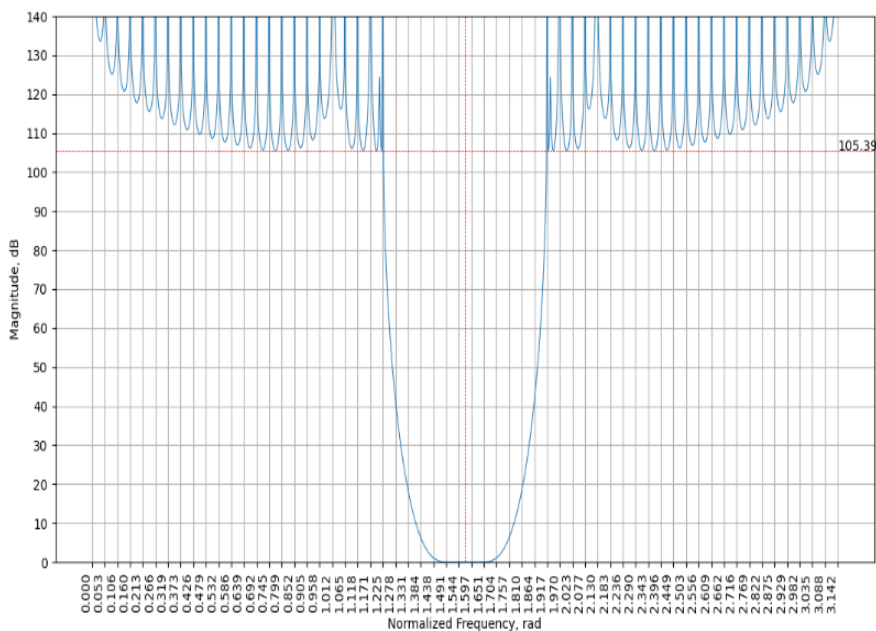


Рис. 2. Характеристика загасання смугового ФОЧВ ($m = 118$, $T = 2$)

Відповідно до табл. 1, для зберігання значень вагових коефіцієнтів на етапі реалізації можна використати не десять, а чотири регістри пам'яті (це кількість різних коефіцієнтів у групі).

Висновки. Розроблений програмний засіб «Дизайнер смугових фільтрів на основі частотної вибірки» [7] дозволяє розробля-

ти ФОЧВ — цифрові КІХ-фільтри з лінійною фазою, які мають значно вищу обчислювальну ефективність ніж традиційні КІХ-фільтри з лінійною затримкою. Так, для ФОЧВ, характеристика якого показана на веб-сторінці <https://filterdesigner.com/index/bank> дизайнеру, необхідно виконати 22 множення та 25 додавань на вихідну вибірку. Відомий традиційний КІХ-фільтр Паркса-Макклеллана [8] з відгалуженою лінією затримки з аналогічною АЧХ потребує 72 множення та 143 додавання на вихідну вибірку.

Розглянуте програмне забезпечення дозволяє отримати оптимальне рішення задачі апроксимації у процесі синтезу ФОЧВ, тобто задачі визначення його передавальної функції.

Рішення може бути використане для проектування банків цифрових смугових фільтрів і застосоване для розробки високопродуктивних аналізаторів спектру, при обробці широкосмугових сигналів в радіолокації, гідролокації, телекомунікаціях, медицині.

Напрямами подальшого вдосконалення програмного засобу «Дизайнер смугових фільтрів на основі частотної вибірки» є забезпечення можливості проектування ФНЧ. Також наступна версія програмного продукту буде надавати можливість проводити розрахунки при строго заданих у вихідних даних частотах зрізу фільтру.

Бібліографічні посилання

1. Дьяконов В.П. Пользовательские характеристики *MATLAB 6.5 SP 1/7.0 + Simulink 5/6*. Обработка сигналов и проектирование фильтров, 2010. — СОЛОН-пресс. 578 с.
2. Строганов А. Проектирование цифровых фильтров в системе *MATLAB/Simulink* и САПР ПЛИС *Quartus*, 2008. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-tsifrovyyh-filtrov-v-sisteme-matlab-simulink-i-sapr-plis-quartu> (дата звернення 05.11.21).
3. Солонина А. Моделирование цифровой обработки сигналов в *MATLAB*. Часть 3. Описание структур КИХ- и БИХ-фильтров в *MATLAB*, 2009. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-tsifrovoy-obrabotki-signalov-v-matlab-chast-3-opisanie-struktur-kih-i-bih-filtrov-v-matlab> (дата звернення 04.11.21).
4. Андреев И.И., Ланнэ А.А. *MATLAB для DSP: SPTool* – инструмент для расчета цифровых фильтров и спектрального анализа сигналов. *Цифровая обработка сигналов*. 2000. С. 6-13.
5. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. М.: ООО „Бином-Пресс”, 2006. 656 с.
6. Рибка С.В., Корольов А.П., Мацаенко А.М., Варава І.А. Методика автоматизованого вирішення задачі апроксимації цифрових фільтрів на основі частотної вибірки. *Стаття у збірнику наукових праць ВІПІ, збірник*. №2. 2019.

7. Дизайнер смугових фільтрів на основі частотної вибірки. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://filterdesigner.com>.
8. Algorithm дизайна фільтра Паркса-Макклеллана. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ru.knledgr.coowm> ».
9. Emmanuel C. Ifeachor, Barrie W. Jervis, Digital Signal Processing: A Practical Approach (2nd Edition), Prentice Hall, 2002, 960 pages.
10. Chen X. P., Yu S. L., FIR filter design: frequency-sampling method based on evolutionary programming. *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation*. Vol. 1. 2000. P. 575-579.
11. Wan-Ping Huang, Zhou Li-fang, Ji-xin Qian, FIR filter design: frequency sampling filters by particle swarm optimization algorithm, *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Shanghai, 26-29 August 2004, Vol. 4. P. 2322-2327.
12. Der-Feng Huang. A Computational Form of the Least Square Error Frequency Sampling Method for the Linear Phase FIR Filter Design, 2nd International Congress on Image and Signal Processing CISP '09, 17-19 Oct. 2009, pp. 1-4.
13. R. Y. Belorutsky, I. S. Savinykh. Modified technique of FIR filter design by the frequency sampling method, 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). Novosibirsk. 2016., P. 259-262. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2016.7884100.
14. R. Y. Belorutsky, M.V. Oreshkina, I. S. Savinykh. The analytical approach for designing bandpass FIR filters by frequency sampling method, 2017, IEEE. P. 239-244. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109879.

Статтю подано до редакції 14.11.2021

УДК: 519.71

DOI 10.33111/mise.101.11

Піскунова О. В., д. е. н., професор,
професор кафедри математичного моделювання та статистики,
ДВНЗ «КНЕУ імені Вадима Гетьмана»

Лігоненко Л. О., д. е. н., професор,
професор кафедри бізнес-економіки та підприємництва,
ДВНЗ «КНЕУ імені Вадима Гетьмана»

Клочко Р. С., здобувач
кафедри математичного моделювання та статистики,
ДВНЗ «КНЕУ імені Вадима Гетьмана»

Білик Т. О., к. е. н., доцент,
доцент кафедри математичного моделювання та статистики,
ДВНЗ «КНЕУ імені Вадима Гетьмана»

Piskunova O.V., Doctor of Economics, Professor,
Professor of the Department of Mathematical Modeling and Statistics,
SHEI KNEU named after V. Hetman