

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА / THEORETICAL AND APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.4>

УЧЕБНО-ПРОГРАММНАЯ СРЕДА: РАСЧЕТ, МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ И ИСПЫТАНИЕ НЕРЕКУРСИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Научная статья

Марченко А.Л.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-9144-2415;

¹ Московский авиационный институт, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (marchenkoal[at]mail.ru)

Аннотация

В государственных образовательных стандартах последнего поколения предписано требование – сформировать у студентов знания и навыки в изучаемой предметной области. Опыт ведения занятий по дисциплине «Электротехника и электроника» показал, что выполнить указанные требования возможно только при использовании программных сред или тренажеров, вследствие резкого уменьшения в учебных планах обучения (в отдельных направлениях бакалавриата в два раза) как общего объема часов на изучение дисциплины, так и часов в нем на проведение аудиторных занятий.

Для обеспечения студентов всех форм обучения указанными инструментариями на кафедре МАИ разработаны электронные ресурсы (более десятка из них зарегистрированы) с участием студентов в рамках их проектной работы по алгоритмам автора для использования при проведении всех видов занятий по дисциплине.

В статье рассмотрена свободно распространяемая учебно-программная среда DNF по моделированию нерекурсивных цифровых фильтров для установки ее на ноутбуки студентов, обучающихся по отдельным специализациям в области техники и технологий. Индивидуализация выполнения заданий на проектирование фильтра с (само)контролем выполнения его этапов, а также консультации (очно или дистанционно), стимулируют работу студентов в семестре, и несмотря на неравномерное изучение дисциплины в семестре по разным причинам до 15-20% студентов в группах, не выполнивших курсовые работы в установленный срок, остается один или два студента, в основном, по уважительной причине.

Ключевые слова: электроника, цифровая фильтрация сигнала, нерекурсивный цифровой фильтр, синтез фильтра, импульсная характеристика.

TUTORIAL AND SOFTWARE ENVIRONMENT: CALCULATION, SIMULATION ON A COMPUTING DEVICE AND TESTING OF NONRECURSIVE DIGITAL FILTERS

Research article

Marchenko A.L.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-9144-2415;

¹ Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (marchenkoal[at]mail.ru)

Abstract

The state educational standards of the last generation require students to form knowledge and skills in the subject area under study. The experience of "Electrical Engineering and Electronics" discipline has shown that it is possible to meet these requirements only with the use of software or simulators, due to the sharp reduction in the curriculum (in some bachelor's degree programs by half) both the total volume of hours to study the discipline, and the hours in it for classroom studies.

To provide students in all forms of education with these tools at the Department of MAI developed electronic resources (more than a dozen of them are registered) with the participation of students in their project work on the author's algorithms for use in all types of classes in the discipline.

The article reviews the freely distributed DNF learning and software environment for modelling nonrecursive digital filters to install it on the laptops of students pursuing a particular specialization in engineering and technology. Individualization of assignments for designing a filter with (self-)control of its stages, as well as consultations (in person or remotely), stimulate the work of students in the semester, and despite the uneven study discipline in the semester for various reasons to 15-20% of students in the groups who have not completed term papers on time, one or two students remain, mostly for a valid reason.

Keywords: electronics, digital signal filtering, nonrecursive digital filter, filter synthesis, impulse response.

Введение

Вследствие невозможности выполнения вручную из-за больших затрат на вычислительные процедуры и графические построения характеристик, проектирование и испытание цифровых устройств обработки сигналов проводят в программных средах типа Mathcad, Delta Design и др. [1].

В связи с уменьшением объема часов на изучение электротехники и электроники и на планирование курсовых работ по дисциплине в учебных планах многих направлений бакалавриата в области техники и технологий, преподаватель теперь проводит занятия в 5-6 группах: с 80-90 студентами в семестре, из которых 15-20 % по разным причинам нерегулярно изучают дисциплину. В этих условиях выполнение студентами заданий или курсовых работ в

семестре в установленные сроки помогла бы (практически не реализуемая на практике) установка на их ВУ (ноутбук, планшет и др.) лицензионной среды моделирования и анализа электронных устройств.

В данной статье рассматриваются методологические основы проектирования нерекурсивных цифровых фильтров (НЦФ), а также разработка учебно-программной среды DNF [2] для расчета, моделирования и испытания НЧФ нижних частот по заданным параметрам к его амплитудно-частотной характеристике (АЧХ). Среда DNF разработана с использованием языков Visual C++ 6.0 и DHTML для инсталляции на студенческие ВУ с ОС Windows 10 или 11, с браузером Edge и объемом свободной памяти не менее 20 МБ.

Цифровой фильтр - дискретная система, преобразующая последовательность $x(k)$ отсчетов входного сигнала в последовательность $y(k)$ отсчетов выходного сигнала. Среди фильтров выделяют нерекурсивные (КИХ-фильтры) и рекурсивные (БИХ-фильтры) соответственно с конечными и с бесконечными импульсными характеристиками, а по расположению частотных полос пропускания и задержки сигналов их подразделяют на фильтры нижних и верхних частот, полосовые и заграждающие (режекторные) [3], [4] и [5].

Цифровые фильтры используют для цифровой фильтрации и спектрального анализа сигналов [6]: в радиолокации, в медицинской аппаратуре, в каналах связи телекоммуникаций для передачи информации и т.п.

В учебных планах подготовки инженеров уделено большое внимание изучению процессов цифровой обработки сигналов, в частности, расчёту и моделированию цифровых систем для их преобразования [7], [8] и [9].

Методы и принципы исследования

Работа основана на изучении литературы по данной теме и анализе личного многолетнего опыта преподавания электротехнических дисциплин.

Проектирование НЦФ нижних частот выполнялось на основе аппроксимации заданной идеальной АЧХ фильтра модифицированным гармоническим рядом Фурье (метод «окон») [1], [10].

Разработка ПО учебно-программной среды DNF проводилась с использованием языков Visual C++ 6.0 и DHTML.

В реализации НЦФ в виде программы для ВУ использовалась прямая структурная схема, построенная на базе трех типов электронных элементов: сумматоров, умножителей и элементов задержки.

Проверка функциональных возможностей синтезированного НЦФ проводилась по стандартной методике посредством подачи на его вход типовых (тестовых) сигналов: единичного отсчета, единичной последовательности, дискретизированных синусоидального и косинусоидального сигналов.

Проверка значений выходных отсчетов сигналов фильтра, рассчитанных по подпрограмме DNF, выполнялась по их равенству выходным отсчетам, найденных вручную посредством операции свертки двух сигналов: подаваемой на вход фильтра четырехточечной последовательности отсчетов, задаваемых вручную с клавиатуры ВУ, с дискретной импульсной функцией НЦФ.

Основные результаты

Алгоритмы фильтрации, структурные схемы и характеристики НЦФ

Главной характеристикой линейного НЦФ, работающего во временной области, является алгоритм фильтрации, описываемый линейным разностным уравнением N -го порядка

$$y(k\Delta t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n x(k\Delta t - n\Delta t), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (1)$$

где N , a_n - постоянные фильтра; k - номер отсчета входной последовательности (сигнала) $x(k\Delta t)$; $\Delta t = 1/f$ и f_d - шаг и частота дискретизации аналогового сигнала.

Максимально допустимый шаг Δt_{max} , соответственно минимальную частоту f_{dmin} дискретизации входного сигнала $x(t)$, выбирают на основе теоремы отсчетов (теоремы Котельникова) [1, С. 57]:

$$\Delta t_{max} = 1/2f_m; \quad f = 1/\Delta t_{max} = 2f_m,$$

где f_m - максимальная частота спектра сигнала $x(t)$, определяемая на основе, например, энергетического критерия.

В общем случае выходной сигнал $y(k)$ (при $\Delta t = 1$) в текущий момент времени $k\Delta t$ определяется значением входного сигнала $x(k)$ в тот же момент времени k , значениями входного сигнала в предшествующие моменты времени $k - n$ ($n > 0$) и описывается разностным уравнением вида

$$y(k) = a_0 x(k) + a_1 x(k-1) + a_2 x(k-2) + \dots + a_{N-1} x[k - (N-1)], \quad (2)$$

где $x(k-n)$ - задержанный соответственно на n отсчетов входной сигнал.

Варьируя величинами N и a_n в уравнении (1) или (2), создают набор алгоритмов для реализации структуры схемы фильтра на базе трех типов электронных элементов: сумматоров (условное обозначение на схемах \oplus), умножителей \triangleright и элементов задержки Δt .

Системную функцию $H(z)$ прямой структуры НЦФ (рис. 1, а), выражающую соотношение между выходными $y(k)$ и входными $x(k)$ дискретными сигналами, обычно выражают в z -области, т.е.

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{k=0}^{N-1} a_n z^{-k} = a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{N-1} z^{-(N-1)}, \quad (3)$$

где $z = e^{p\Delta t}$, $p = \sigma + j\omega$ - комплексная частота (в рад/с), $N-1 \geq 0$, а в каскадной структуре, состоящей из звеньев 2-го порядка (рис. 1, б),

$$H(z) = C \prod_{k=1}^i H_k(z) = C \prod_{k=1}^i (a_{0k} + a_{1k}z^{-1} + a_{2k}z^{-2}) . \quad (4)$$

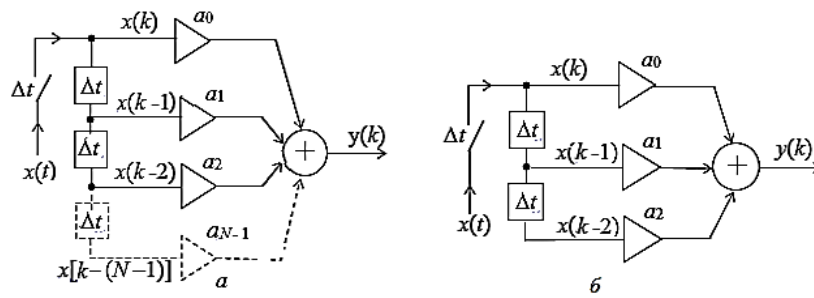


Рисунок 1 - Прямая структурная схема НЦФ (а) и структурная схема звена 2-го порядка (б)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.4.1>

Отсчеты импульсной функции $g(k)$ НЦФ, равные коэффициентам алгоритма фильтрации (2), получают при подаче на его вход единичного импульса $\bar{\delta}(k)$:

$$g(k) = a_0\bar{\delta}(k) + a_1\bar{\delta}(k-1) + a_2\bar{\delta}(k-2) + \dots + a_{N-1}\bar{\delta}[k-(N-1)], \quad (5)$$

Системная функция фильтра в частотной области

$$H(z) = \{z[g(k)]\} = \sum_{k=0}^{N-1} g(k)z^{-k}. \quad (6)$$

является прямым z-преобразованием импульсной функции $g(k)$ фильтра, которая, в свою очередь, равна обратному преобразованию системной функции:

$$g(k) = \{z^{-1}[H(z)]\} = \frac{1}{2\pi j} \oint_{|z|=1} H(z)z^{k-1} dz. \quad (7)$$

Интегрирование выражения (7) обычно ведут по контуру единичного радиуса, при котором $z = e^{j\omega\Delta t}$ подставив которое в (3) получают комплексную передаточную функцию НЦФ:

$$H(e^{j\omega\Delta t}) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{-jn\omega\Delta t} = a_0 + a_1 e^{-j\omega\Delta t} + a_2 e^{-j2\omega\Delta t} + \dots + a_{N-1} e^{-j(N-1)\omega\Delta t}, \quad (8)$$

или

$$H(e^{j\omega\Delta t}) = \sum_{k=0}^{N-1} g(k\Delta t) e^{-jk\omega\Delta t} = H(\omega\Delta t) e^{j\Psi(\omega\Delta t)}, \quad (9)$$

где $H(\omega\Delta t) = |H(e^{j\omega\Delta t})|$ и $\Psi(\omega\Delta t)$ - модуль и аргумент комплексной передаточной функции, называемые соответственно амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристиками фильтра.

Из выражения (9) следует, что характеристики АЧХ и ФЧХ НЦФ являются периодическими функциями частоты ω с периодом, равным частоте дискретизации $\omega = 2\pi/\Delta t = 2\pi f$, и определяются весовыми коэффициентами в прямых a_n связях схемы НЦФ (см. рис. 1, а), а также шагом дискретизации Δt (рис. 2, а), поэтому требования к ним достаточно задавать на интервале угловых частот $[0 \dots \pi/\Delta t]$, а для построения графика модуля $H(\omega\Delta t)$ АЧХ фильтра в диапазоне от 0 до $\omega = 2\pi/\Delta t$ - при изменении угла $\omega\Delta t$ от 0 до 2π .

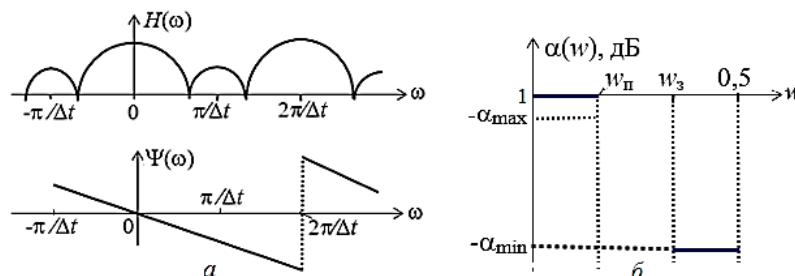


Рисунок 2 - Частотные характеристики АЧХ $H(\omega)$ и ФЧХ $\Psi(\omega)$ НЦФ (а) и границы полос пропускания ω_p и задерживания ω_s (б)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.4.2>

При проектировании цифровых фильтров угловую частоту ω обычно задают в долях от дискретной угловой частоты ω_d , т.е. при $\Delta t = 1$,

$$\hat{\omega} = \omega/\omega_d = 2\pi w,$$

где $w = \hat{\omega}/2\pi$ - относительная циклическая частота НЦФ.

Тогда требования к частотным характеристикам фильтра следует задавать на интервале $w = [0..0,5]$, а реальная шкала частот равна $f = w f_d$. При этом изменяются аргументы в обозначениях характеристик: $H(e^{j2\pi w})$, $H(w)$, $\Psi(w)$.

Методы расчета НЦФ с заданными требованиями к АЧХ

Для разработки учебно-программной среды DNF, с помощью которой по заданным параметрам АЧХ можно определить минимальный порядок N НЦФ нижних частот, синтезировать его и провести анализ его временных и частотных характеристик, необходимо выбрать метод расчета параметров НЦФ нижних частот и получить математические выражения его характеристик.

Метод расчёта НЦФ с заданной идеальной АЧХ связан с выбранным из сгруппированных в три группы [1] критерием ее аппроксимации. Первая группа включает метод разложения в ряд Фурье и метод наименьших квадратов, вторая и третья – алгоритм Ремеза и некоторые другие сравнительно редко используемые алгоритмы.

Выбираем метод разложения в ряд Фурье, так как для его реализации требуется наименьший объём вычислений, особенно при числе отсчетов $N > 5000..10000$.

Комплексный ряд Фурье $H(e^{j2\pi w})$ [1, С. 238] периодической функции $H(w)$ при нечётном и симметричных коэффициентах $c_k = a_{N-k-1}$ (рис. 3, а)

$$H(e^{j2\pi w}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{-jk2\pi w} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cos(k2\pi w), \tag{10}$$

где коэффициенты ряда Фурье c_k (рис. 3, б)

$$c_k = 2 \int_{-0,5}^{0,5} H(w) e^{jk2\pi w} dw = 4 \int_0^{w\pi} H(w) \cos(k2\pi w) dw = \frac{2}{\pi k} \sin 2w_1 \pi k, \tag{11}$$

а соответствующий ряд Фурье

$$H(e^{j2\pi w}) = 2w\pi + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \sin 2w_1 \pi k}{\pi k} \cos k2\pi w. \tag{12}$$

Выполнив замену переменных в (12) при $z = e^{j2\pi w}$, получим ряд Фурье

$$H(e^{j2\pi w}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k z^{-k} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) z^{-k} \tag{13}$$

с коэффициентами c_k , совпадающими с отсчётами функции $g(k)$ фильтра.

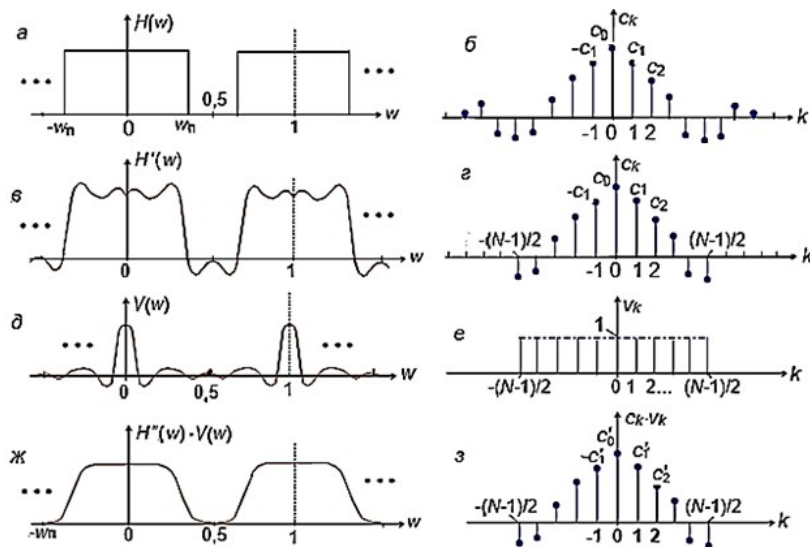


Рисунок 3 - Графики функций при поэтапном выводе выражения системной функции НЦФ по заданной АЧХ при ее аппроксимации модифицированным рядом Фурье

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.4.3>

Прямое использование формул (12) и (13) приводит к физически нереализуемым фильтрам, так как порядок фильтра N оказывается бесконечным и суммирование начинается от отсчёта $k = -\infty$, поэтому в (13) отбрасывают коэффициенты c_k с индексами после некоторого значения L (рис. 3, з): $+L = \pm(N - 1)/2$.

Однако простое усечение ряда Фурье приводит к явлению Гиббса, которое проявляется на графике АЧХ в виде выбросов (до 9%) в зоне пропускания сигнала и пульсаций АЧХ (рис. 3, в). Увеличение числа N не уменьшает максимальную амплитуду пульсаций, а уменьшает лишь ширину выбросов.

Чтобы исключить явление Гиббса, коэффициенты c_k ряда Фурье (см. рис. 3, з) умножают на множители прямоугольной весовой функцию $v(k)$ (рис. 3, е) с передаточной функцией $V(w)$ (рис. 3, г) при $|k| \leq L$ и на нуль при

$|k| > L$. Этот процесс приводит к сглаживанию передаточной функции (рис. 3, ж). При использовании других весовых функций («окон»): треугольного «окна», функций Хемминга, Блэкмана или Кайзера уменьшается колебательный характер у окончатальной передаточной функции, но одновременно увеличивается ширина промежуточной полосы.

Для физической реализации НЦФ ограниченную последовательность коэффициентов c_k Фурье (см. рис. 3, з) сдвигают вправо на L отсчетов и рассчитывают комплексную передаточную функцию $H'(e^{j2\pi w})$ по формуле

$$H'(e^{j2\pi w}) = \left[\sum_{k=-L}^L c_k \cos k2\pi w \right] e^{-jL2\pi w} = H'(w)e^{-j\Psi(w)}, 0 < w < 0,5, \quad (14)$$

а после умножения ее коэффициентов c_k на коэффициенты функции v_k получают модифицированную передаточную функцию

$$\begin{aligned} H'(e^{j2\pi w}) &= \left[\sum_{k=-L}^L c_k \cos k2\pi w \right] e^{-jL2\pi w} = a_0 + a_0 e^{-j2\pi w} + \dots \\ &+ a_L e^{-jL4\pi w} + \dots + a_{L-1} e^{-j(L+1)2\pi w} + \dots + a_1 e^{-j(2L-1)2\pi w} + a_0 e^{-j2L \cdot 2\pi w} \\ &= H''(w)e^{j\Psi(w)}, 0 < w < 0,5, \end{aligned} \quad (15)$$

где $L = (N-1)/2$; a_k - коэффициенты импульсной функции $g(k)$ фильтра, определяемые по формулам: $a_0 = c'_L$, $a_L = c'_0$; $a_k = c'_{L-k}$, $k = 1, 2, \dots, L$.

Если выполняется условие $a_k = a_{N-k-1}$, то ФЧХ НЦФ

$$\Psi(w) = -L2\pi w = -N\pi w, \quad (16)$$

т.е. ФЧХ нерекурсивного фильтра является линейной периодической функцией с областью определения для циклической частоты w от $-0,5$ до $0,5$ со скачком на графике ФЧХ от $-\pi$ до $+\pi$ на границе указанного диапазона.

Полученные выражения (10)...(16) использованы при разработке ПО среды DNF, в которой вычисления ведутся с числами конечной длины, определяемой разрядностью микропроцессора типа Pentium, равной 64 битам (вычисления ведутся с двойной точностью), что позволяет не проводить анализ влияния ограничений разрядности чисел на точность выходных отсчетов.

Проектирование НЦФ с заданными требованиями к его АЧХ

Из проведенного выше анализа следует, что расчет НЦФ сводится к определению коэффициентов правых частей уравнений (2) или (3) по заданным требованиям к его АЧХ в несколько этапов:

- анализ требований к АЧХ фильтра;
- формулировка задачи аппроксимации заданной его АЧХ;
- схемная реализация фильтра;
- проверка работоспособности синтезированного фильтра: он должен быть устойчивым и физически реализуемым.

Исходными данными для расчёта ЦФ являются граничные частоты ω_{Π} и ω_{Σ} полос пропускания и задерживания, допуски $-\alpha_{max}$ (в дБ) на отклонение АЧХ от номинального уровня (равного единице) в полосе пропускания и $-\alpha_{min}$ (в дБ) в полосе задерживания (см. рис. 2, б), а также частота дискретизации входного аналогового сигнала ω_d .

Требования к АЧХ НЦФ при решении задачи ее аппроксимации обычно трансформируются в требования к его коэффициенту затухания $\alpha(\omega)$ (в дБ):

$$\alpha(\omega) = -20 \lg |H(\omega)|,$$

т.е. исходными данными являются: максимальное отклонение коэффициента затухания от номинального уровня в полосе пропускания $w_{\Pi} = \omega_{\Pi}/\omega_d = f_{\Pi}/f_d$

и гарантированное затухание $-\alpha_{min}$ сигнала в полосе $w = \omega/\omega_d = f/f_d$.

Прежде чем начать проектирование НЦФ, студент должен изучить материалы лекций по цифровой обработке сигналов, методику расчета НЦФ и пройти «Опрос по теме» (рис. 4), правильно ответив на 375 % тестовых заданий.

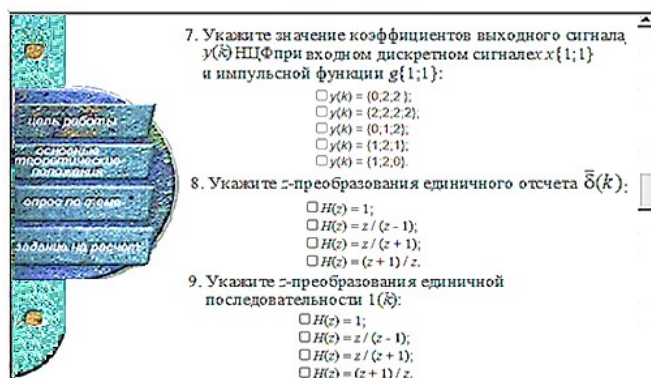


Рисунок 4 - Фрагменты тестовых заданий
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.4.4>

Проектирование НЦФ выполняется с использованием учебно-программной среды DNF, главное меню которой состоит из следующих пунктов (рис. 5):

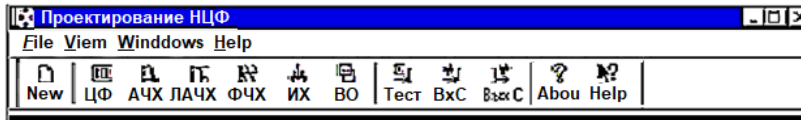


Рисунок 5 - Главное меню учебно-программной среды DNF

- New (проектирование нового НЦФ),
- ЦФ (заставка для ввода параметров ЦФ),
- АЧХ (вывод на экран графика АЧХ фильтра),
- ЛАЧХ (вывод на экран графика логарифмической АЧХ фильтра),
- ФЧХ (вывод на экран графика логарифмической ФЧХ фильтра),
- ИХ (вывод на экран графика импульсной характеристики фильтра),
- ВО (вывод на экран графика весового окна),
- Тест (вывод на экран заставки для выбора тестовых сигналов и ввода их параметров),
- ВхС (вывод на экран графика тестового входного сигнала),
- ВыхС (вывод на экран графика выходного сигнала фильтра),
- About (информация о разработчиках ПО среды DNF).

Проектирование НЦФ начинается со щелчка мышью на кнопке «New» в главном меню среды DNF. При этом всплывает окно «ЦФ» (рис. 6, а) ввода исходных данных для проектирования, например, варианта 1 (табл. 1) фильтра.

Вначале, посредством щелчка мышью на кнопке «ЛАЧХ» на экран дисплея ВУ выводится окно с графиком ЛАЧХ фильтра (рис. 6, б), а после щелчка мышью на кнопке «Enter» клавиатуры ВУ и ввода значений частот w_1 и w_2 в окна «Частота 1» и «Частота 2», выводятся значения коэффициентов $-\alpha_{max}$ и $-\alpha_{min}$ при заданном порядке, например, $N = 17$ фильтра.

Так как полученные коэффициенты $-\alpha_{max}$ и $-\alpha_{min}$ меньше заданных:

$$|-0,196| > |-\alpha_{max} = -0,1| \quad |-32,996| < |-\alpha_{min} = -40|$$

то порядок N фильтра необходимо увеличить, щелкая каждый раз мышью с его увеличением на кнопках «Запомнить» и «ЛАЧХ» в меню среды DNF для автоматического обновления как графика ЛАЧХ, так и ниже него значений новых коэффициентов.

Таблица 1 - Исходные данные для проектирования НЦФ нижних частот

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.4.6>

Номер варианта	f_n , кГц	f_i , кГц	α_{max} , дБ	α_{min} , дБ	f_z , кГц	Номера «окон»	Входной четырехточечный сигнал
1 (16)	4,8	19,2 (9,6)	-0,1	-40	48	1 и 3	{2, -1, -2, 1}
2 (17)	2,4	4,8 (9,6)	-0,2	-50	48	1 и 2	{-1, 1, -2, 2}
3 (18)	2,4	9,6 (19,2)	-0,3	-40	48	1 и 4	{-2, -1, 1, 2}
4 (19)	2,0	6,0 (8,0)	-0,4	-50	48	1 и 2	{1, 2, -1, -2}
5 (20)	1,6	6,4 (9,6)	-0,5	-40	32	1 и 3	{1, 2, -2, 1}
6 (21)	2,0	5,0 (6,0)	-0,1	-50	32	1 и 4	{1, 1, 1, 1}
7 (22)	2,0	6,0 (8,0)	-0,2	-40	32	1 и 2	{1, 1, 2, 1}
8 (23)	3,2	6,4 (9,6)	-0,3	-50	24	1 и 3	{1, 2, 1, 1}
9 (24)	2,4	7,2 (9,6)	-0,4	-40	24	1 и 4	{-1, 1, -1, 1}
10 (25)	2,0	4,0 (6,0)	-0,5	-50	24	1 и 2	{1, -1, 1, -1}
11 (26)	2,4	8,0 (10,0)	-0,1	-40	40	1 и 3	{2, 1, 1, 2}
12 (27)	2,4	5,0 (8,0)	-0,2	-50	40	1 и 4	{2, 2, 1, 1}
13 (28)	4,8	9,6 (6,0)	-0,3	-40	48	1 и 2	{2, 1, 2, 1}
14 (29)	4,8	19,2 (9,6)	-0,4	-50	48	1 и 3	{1, 1, 1, -1}
15 (30)	3	6,0 (9,0)	-0,5	-40	30	1 и 4	{1, -1, 1, 1}

Наконец, при $N = 31$ (рис. 6, з) требования к АЧХ выполнены и даже перевыполнено требование для $-\alpha_{max}$ в полосе пропускания:

$$|-\alpha| = 0,086 < |-\alpha_{max}| = 0,1$$

вследствие необходимости обеспечить второе требование к АЧХ: коэффициент ζ - $a_{min}\zeta$ должен быть равен или больше 40 дБ.

После выбора окна «Хемминга» (см. рис. 6, в) и щелчка мышью на кнопках «ВО» и «ЛАЧХ», на экран ВУ выводится график выбранного окна (рис. 6, д) и график ЛАЧХ (рис. 6, е), на котором видно, что границы полос пропускания и задерживания «размылись» и расширилась переходная полоса w_3 - w_n , что свидетельствует о снижении разрешающей способности фильтра при одновременном уменьшении пульсаций АЧХ в полосе пропускания и лучшем их подавлении в полосе задерживания.

Графики АЧХ фильтра (рис. 6, ж) и его импульсной функции $g(k)$ (рис. 6, з) выведены на экран дисплея ВУ посредством щелчков мышью на кнопках «АЧХ» и «ИХ» главного меню среды DNF. Значения коэффициентов a_k центральной части импульсной характеристики $g(k)$, выведенные слева от ее графика, равны:

$$a_{15} = 0,5; a_{14} = a_{16} = 0,27324; a_{13} = a_{17} = 0; a_{12} = a_{18} = -0,011 \text{ и т.д.}$$

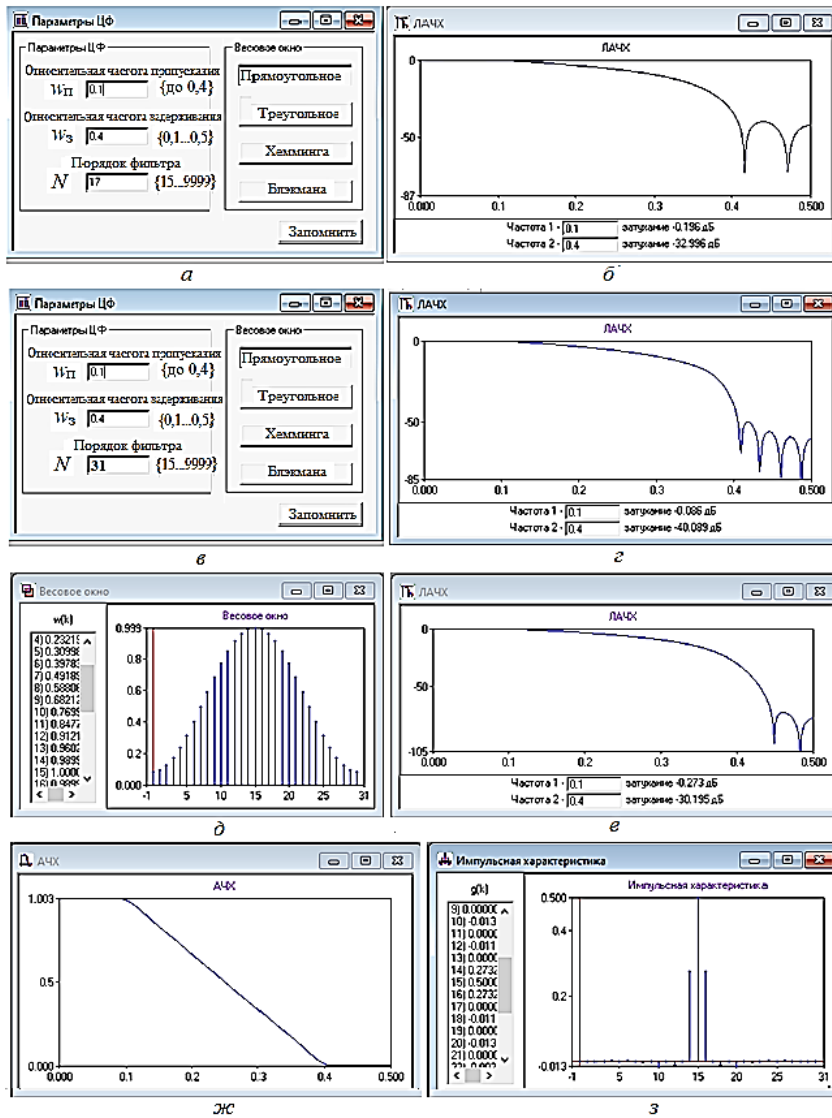


Рисунок 6 - Заставки среды DNF (а, в) и графики характеристик НЦФ:
 б - ЛАЧХ при N=17; г - при N= 31; е - с окном Хемминга; д - окна Хемминга; ж- АЧХ; з- ИХ
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.4.7>

На выведенном на экран графике ФЧХ (рис. 7, а) видны скачки на π радиан выходных отсчетов угла сдвига фаз на частотах $\omega = kN\pi$, где k – четное.

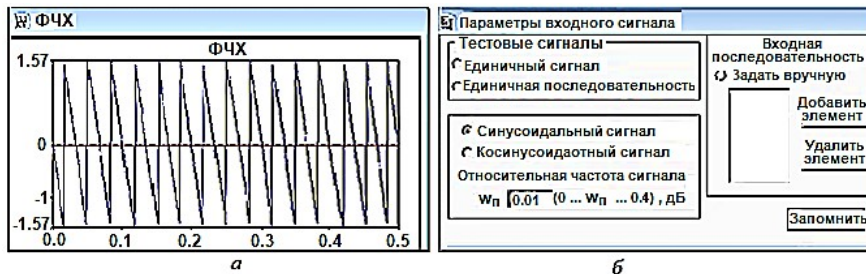


Рисунок 7 - График ФЧХ спроектированного НЦФ (а) и заставка (б) для выбора и ввода тестовых сигналов в подпрограммы среды DNF

Обобщенная структурная схема прямой структуры спроектированного НЦФ аналогична схеме (см. рис. 1, а), с изменением в ней только записи последнего коэффициента на $a_{30}z^{-30}$. Запишем выражения системной функции и импульсной функции фильтра

$$H z = a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{30} z^{-30}$$

$$g(k) = a_0 \delta(k) + a_1 \delta(k - 1) + a_2 \delta(k - 2) + \dots + a_{30} \delta[k - 30]$$

Проверка нерекурсивных ЦФ на устойчивость не проводится, так как они принципиально устойчивые.

Испытание синтезированного НЦФ

При разработке цифрового фильтра в виде специального устройства на базе сигнального процессора типа TSP-320xx и др. предварительно выполняют его синтез в виде программы на базе микропроцессора ВУ и анализируют графики выходных характеристик, полученных посредством подачи на его вход следующих тестовых сигналов: единичного отсчета, единичной последовательности, дискретизированных синусоидального и косинусоидального сигналов, произвольной последовательности отсчетов, задаваемой вручную с клавиатуры ВУ, и, реже, полигармонический синусоидальный сигнал для демонстрации его цифровой фильтрации.

После щелчка мышью на кнопке «Тест» в выведенной на экран заставке (см. (рис. 7, б) выбирают входные сигналы, последовательно подают их на вход НЦФ и выводят на экран ВУ графики входных и выходных сигналов посредством щелчков мышью на кнопках «ВхС» и «ВыхС»:

а) при подаче на вход единичного отсчёта $\bar{\delta}_k$ на выходе НЦФ получают импульсную функцию ИХ $g(k)$ фильтра (см. рис. 6, з), на графике которой видны ярко выраженные отсчеты в центральной ее части ($a_{15} = 0,5$, $a_{14} = a_{16} = 0,27324$) и резкое снижение коэффициентов a_k при удалении от ее центральной части;

б) далее, при подаче на вход фильтра единичной последовательности $\bar{1}_k$ (рис. 8, а) на экран ВУ выводится график переходной функции $h(k)$ (рис. 8, б), время установления которой (от 0 до 0,9 уровня 1) равно $t_{уст} \approx 17\Delta t$;

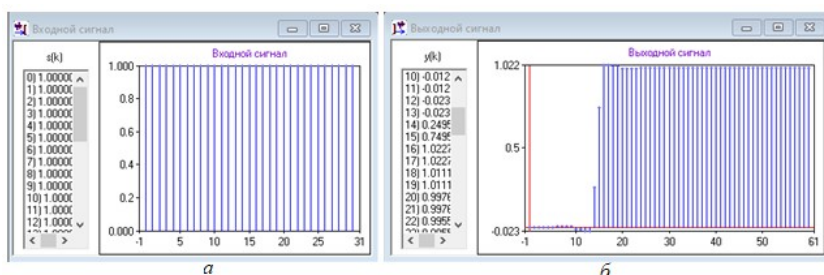


Рисунок 8 - Единичная последовательность (а) и переходная характеристика $h(k)$ (б) НЦФ

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.4.9>

в) для построения АЧХ НЦФ на его вход поочередно подают синусоидальный сигнал $x(k) = \sin(2\pi w_k)$, $0 < w < 0,5$ (рис. 9, а), затем косинусоидальный сигнал $x(k) = \cos(2\pi w_k)$ (рис. 10, а), $0 < w < 0,5$, а отсчеты АЧХ выполнены по программе среды DNF по формуле

$$H(2\pi w_k) = \sqrt{\sin^2(2\pi w_k) + \cos^2(2\pi w_k)}.$$

На рис. 9, б и рис. 10, б представлены графики выходных сигналов с нормированной частотой $w = 0,01$, на которых заметны $1/w = 100$ отсчетов за период, задержка выходных сигналов на $L = 15$ отсчетов и заметное искажение первой полуволны косинусоидального сигнала;

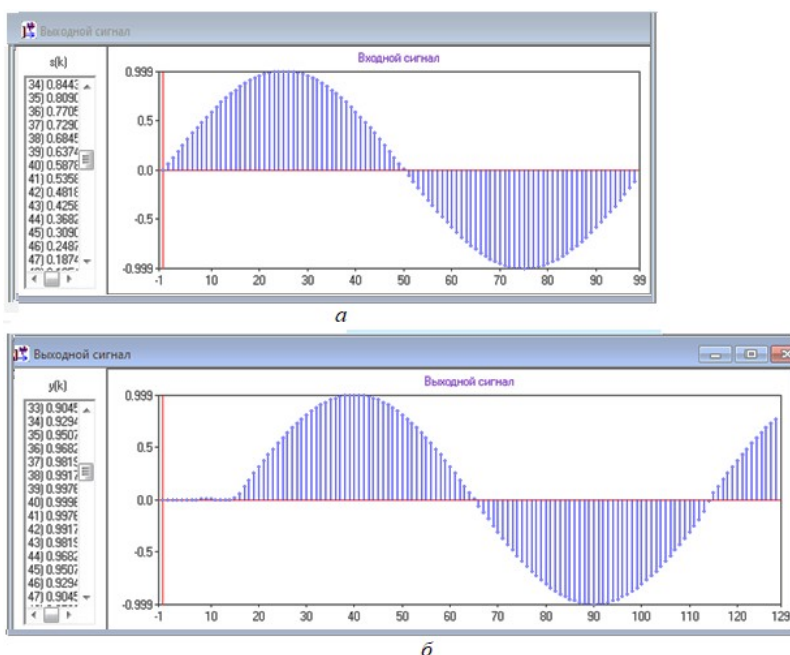


Рисунок 9 - График входного синусоидального сигнала (а) и его график на выходе НЦФ (б)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.4.10>

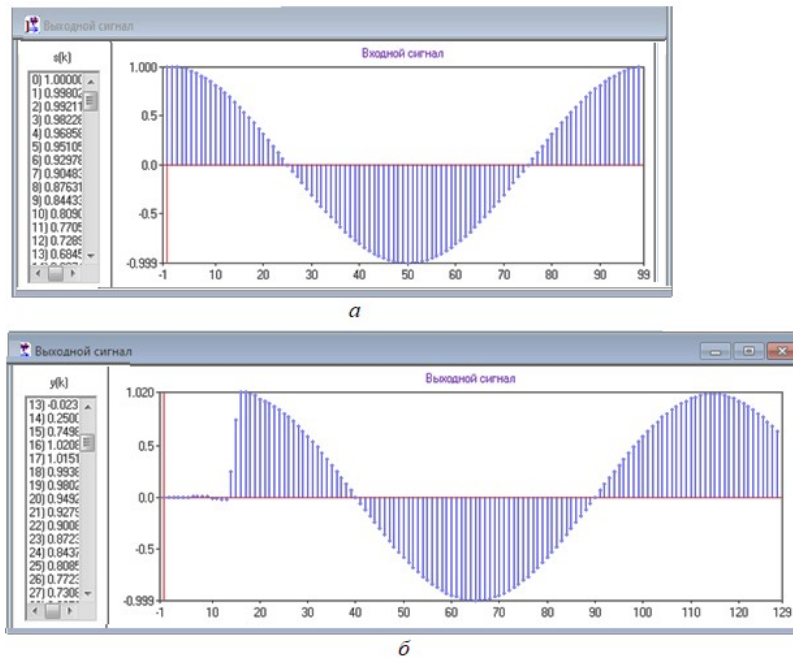


Рисунок 10 - График входного косинусоидального сигнала (а) и его график на выходе НЦФ (б)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.4.11>

Согласно заданию (см. табл. 1, вариант 1) проверим рассчитанные по программе среды DNF и выведенные на экран ВУ значения отсчетов $y_{15} \approx 0,715$, $y_{16} \approx -0,499$ и $y_{17} \approx -0,999$ (рис. 11, б)

$$y(k) = x(k) * g(k),$$

операции свертки двух дискретных сигналов: четырехточечной последовательности $x(k) = \{2, -1, -2, 1\}$, введенной вручную с клавиатуры ВУ и поданной на вход фильтра (рис. 11, а), и импульсной функции $g(k)$ (см. рис. 6. з) фильтра, посредством сравнения с рассчитанными вручную значениями отсчетов операции свертки указанных сигналов $x(k)$ и $g(k)$ при $k = L = 15$, $L + 1 = 16$ и $L + 2 = 17$ следующим образом [1, С. 136]:

- отсчеты входного сигнала записывают в обратном направлении, т.е.

$$x(-k) = x_3 x_2 x_1 x_0 = \{1, -2, -1, 2\};$$

- выписывают в одну строку значения отсчетов, например, $a_{11} \dots a_{19}$ импульсной характеристики $g(k)$ (см. рис. 6, з, слева);

• размещают полученную последовательность отсчетов $x(-k) = \{1, -2, -1, 2\}$ ниже строки с последовательностью отсчетов центральной части импульсной функции $g(k)$ фильтра таким образом, чтобы отсчет x_0 оказался напротив центрального отсчета L_{15} ;

- вычисляют значение выходного отсчета

$$y_{15} = x_3 a_{12} + x_2 a_{13} + x_1 a_{14} + x_0 a_{15} \approx$$

$$\approx 1 \times (-0,011) + (-2) \times 0 + (-1) \times 0,273 + 2 \times 0,5 \approx 0,716;$$

значения отсчетов $y_{16} \approx -0,5$ и $y_{17} \approx -1$ определены посредством суммирования произведений соответствующих значений $x(k)$ и значений отсчетов импульсной функции фильтра $g(k)$ при сдвиге вправо на один и два шага последовательности $\{1, -2, -1, 2\}$.

Количества всех отсчетов выходного сигнала в данной свертке сигналов

$$Y_k = N + X - 1 = 31 + 4 - 1 = 34 \quad (\text{см. рис. 11, б}),$$

где $N = 31$ - число отсчетов импульсной функции $g(k)$; $X = 4$ - число отсчетов входного сигнала $x(k)$.

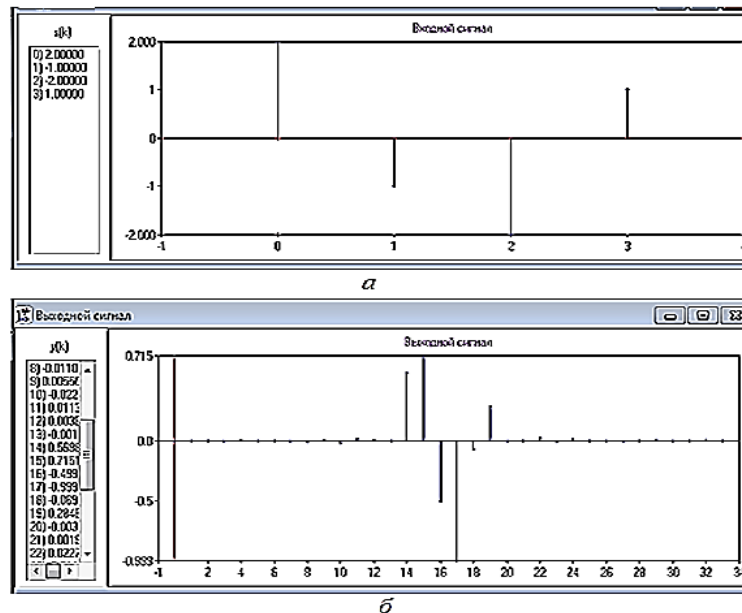


Рисунок 11 - Графики входной последовательности $x(k)$ (а) и последовательности выходных отсчетов $y(k)$ свертки входного сигнала $x(k)$ и ИХ $g(k)$ НЦФ (б)
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.4.12>

Заключение

Разработан свободно распространяемый электронный ресурс (учебно-программная среда DNF с требуемым объемом памяти для установки 20 МБ) для проектирования цифровых нерекурсивных фильтров и анализа выводимых на экраны ВУ студентов его графиков временных и частотных характеристик.

В сравнение с лицензионными средами типа Mathcad и др., используемые студентами на кафедрах вуза, и на освоение которых требуется определенное время, затраты же времени на освоение среды DNF, предназначенной для инсталляции на ВУ студентов, сведены к минимуму: она имеет простой и понятный интерфейс, выполненный в виде одной командной строки кнопок. После щелчка мышью на каждой из них на экран дисплея ВУ выводится заставка для ввода исходных данных или график соответствующей характеристики синтезированного в виде программы НЦФ.

Разработаны варианты заданий на проектирования НЦФ; приведен пример расчета одного из вариантов, а также синтез структурной схемы фильтра и его испытание по стандартной методике с подачей на его вход тестовых сигналов и анализом выводимых на экран ВУ графиков характеристик фильтра.

Представлен подробный вывод формулы модифицированного ряда Фурье с построением графиков получаемых временных и частотных промежуточных функций, используемых студентами для сравнения с видом графиков характеристик спроектированных фильтров при их анализе.

Наличие программной среды DNF обуславливает выполнение курсовых работ в удобное студентам время и их защиту в установленный срок, а невыполненные курсовые работы в срок одним или двумя студентами в группах вызваны, в основном, уважительными причинами.

Программная среда DNF включена в программный комплекс УМК-Э2 по электронике [8] и используется преподавателями для демонстрации ее фрагментов на лекциях и практических занятиях при любом нечетном числе порядка фильтра N (вплоть до 9999 и более).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Смит С. Цифровая обработка сигналов: практическое руководство для инженеров и научных работников / С. Смит — М.: ДМК Пресс, 2018. — 718 с.
2. Марченко А.Л. Частотные фильтры: пассивные, активные и цифровые / А.Л. Марченко — М.: Горячая линия : Телеком, 2017. — 166 с.
3. Мангазин А.Т. Взвешенная чебышевская аппроксимация в синтезе формирующих КИХ-фильтров для систем цифровой связи. / А.Т. Мангазин // Цифровая обработка сигналов. — 2022. — 2. — с. 3-11.

4. Зиндинов С.И. Синтез действительных дискретных полосовых и режекторных фильтров методом z-преобразования. / С.И. Зиндинов // Цифровая обработка сигналов. — 2022. — 2. — с. 46-50.
5. Попов Д.И. Оптимизация режекторных фильтров по вероятностному критерию. / Д.И. Попов // Цифровая обработка сигналов. — 2022. — 1. — с. 55-58.
6. Яковлев А.Н. Цифровая фильтрация и синтез цифровых фильтров / А.Н. Яковлев, Д.О. Соколова — Новосибирск: НГТУ, 2012. — 64 с.
7. Марченко А.Л. Актуальные вопросы разработки и использования электронных изданий и ресурсов в обучении электротехнике и электронике в вузе / А.Л. Марченко — М.: ДМК Пресс, 2010. — 272 с.
8. Марченко А.Л. Разработка учебно-методического комплекса по электронике: структура и функциональные возможности. / А.Л. Марченко // Международный научно-исследовательский журнал. — 2020. — 5(95)-1. — с. 49-58.
9. Марченко А.Л. Использование учебно-программных сред при изучении дисциплины «Электротехника и электроника» в условиях пандемии covid-19. / А.Л. Марченко // Международный научно-исследовательский журнал. — 2022. — 5(119)-1. — с. 67-80.
10. Гадзиковский В.И. Методы проектирования цифровых фильтров / В.И. Гадзиковский — М.: Горячая линия; Телеком, 2007. — 416 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Smit S. Cifrovaya obrabotka signalov: prakticheskoe rukovodstvo dlya inzhenerov i nauchny'x rabotnikov [Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists] / S. Smit — М.: ДМК Пресс, 2018. — 718 p. [in Russian]
2. Marchenko A.L. Chastotny'e fil'try': passivny'e, aktivny'e i cifrovye [Frequency filters: passive, active and digital] / A.L. Marchenko — М.: Goryachaya liniya : Telekom, 2017. — 166 p. [in Russian]
3. Mangazin A.T. Vzveshennaya cheby'shevskaya approksimatsiya v sinteze formiruyushhix KIX-fil'trov dlya sistem cifrovoj svyazi [Weighted Chebyshev approximation in the synthesis of forming FIP filters for digital communication systems]. / A.T. Mangazin // Cifrovaya obrabotka signalov [Digital Signal Processing]. — 2022. — 2. — p. 3-11. [in Russian]
4. Zindinov S.I. Sintez dejstvitel'ny'x diskretny'x polosovy'x i rezhektorny'x fil'trov metodom z-preobrazovaniya [Synthesis of actual discrete strip and notch filters by z-transformation method]. / S.I. Zindinov // Cifrovaya obrabotka signalov [Digital Signal Processing]. — 2022. — 2. — p. 46-50. [in Russian]
5. Popov D.I. Optimizatsiya rezhektorny'x fil'trov po veroyatnostnomu kriteriyu [Optimization of notch filters by probabilistic criterion]. / D.I. Popov // Cifrovaya obrabotka signalov [Digital Signal Processing]. — 2022. — 1. — p. 55-58. [in Russian]
6. Yakovlev A.N. Cifrovaya fil'tratsiya i sintez cifrovyy'x fil'trov [Digital Filtering and Synthesis of Digital Filters] / A.N. Yakovlev, D.O. Sokolova — Novosibirsk: NGTU, 2012. — 64 p. [in Russian]
7. Marchenko A.L. Aktual'ny'e voprosy' razrabotki i ispol'zovaniya e'lektronny'x izdaniy i resursov v obuchenii e'lektrotexnike i e'lektronike v vuze [Topical issues of development and use of electronic publications and resources in teaching electrical engineering and electronics at the university] / A.L. Marchenko — М.: ДМК Пресс, 2010. — 272 p. [in Russian]
8. Marchenko A.L. Razrabotka uchebno-metodicheskogo kompleksa po e'lektronike: struktura i funktsional'ny'e vozmozhnosti [Development of training on electronics: structure and functionality]. / A.L. Marchenko // Mezhdunarodny'j nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2020. — 5(95)-1. — p. 49-58. [in Russian]
9. Marchenko A.L. Ispol'zovanie uchebno-programmny'x sred pri izuchenii discipliny' «E'lektrotexnika i e'lektronika» v usloviyax pandemii covid-19 [The use of educational and software environments in the study of the discipline Electrical Engineering and Electronics in the context of the covid-19 pandemic]. / A.L. Marchenko // Mezhdunarodny'j nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2022. — 5(119)-1. — p. 67-80. [in Russian]
10. Gadzikovskij V.I. Metody' proektirovaniya cifrovyy'x fil'trov [Methods of designing digital filters] / V.I. Gadzikovskij — М.: Goryachaya liniya; Telekom, 2007. — 416 p. [in Russian]