

УДК 621.317.08

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ РАВНОАМПЛИТУДНОГО КОМПЛЕКСНОГО РЯДА

Павлов Павел Александрович, студент, направление подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: pawlowoqa@mail.ru

Фролов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: FrolovSergej@yandex.ru

Аннотация. В предлагаемой работе представлены результаты применения функции вида $y(x) = \sin(n \cdot x/2) / \sin(x/2)$ при автоматизированном измерении амплитудно- (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик. В диапазоне звуковых и инфразвуковых частот существующие автоматизированные методы измерения не точны, а мануальные – неэффективны. Рассматриваемая функция соответствует ограниченному гармоническому или комплексному ряду Фурье с одинаковыми коэффициентами. Указанное свойство используется в работе для уменьшения погрешности и времени измерения. Для формирования сигнала функции создана экспериментальная лабораторная установка на основе платы разработки STM32L073RZ Nucleo-64. С помощью анализатора Фурье, встроенного в цифровой осциллограф Hantek DSO8060, экспериментально исследованы результаты БПФ сформированного равноамплитудного комплексного ряда $y(x)$ при разных значениях n . Качественно подтверждена прямоугольность спектров. Также исследованы итоги БПФ реакций фильтров нижних и верхних частот, полосового фильтра второго порядка. Качественно проверена повторяемость огибающими спектров расчётных АЧХ фильтров.

Ключевые слова: равноамплитудный ряд, комплексный ряд, ряд Фурье, равномерный спектр, прямоугольный спектр, автоматические измерения, измерения АЧХ, АЧХ фильтров, испытательный сигнал.

Для цитирования: Павлов П. А., Фролов С. С. Программно-аппаратный лабораторный формирователь равноамплитудного комплексного ряда // Шаг в науку. – 2024. – № 1. – С. 66–72.

SOFTWARE AND HARDWARE LABORATORY GENERATOR OF EQUAL-AMPLITUDE COMPLEX SERIES

Pavlov Pavel Aleksandrovich, student, training program 11.03.02 Infocommunication technologies and communication systems, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: pawlowoqa@mail.ru

Frolov Sergey Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of industrial electronics and information and measuring technology, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: FrolovSergej@yandex.ru

Abstract. The proposed work presents the results of using a function of the form $y(x) = \sin(n \cdot x/2) / \sin(x/2)$ in the automated measurement of amplitude-frequency response and phase-frequency response characteristics. In the range of sound and infrasound frequencies, existing automated measurement methods are not accurate, and manual ones are ineffective. The function under consideration corresponds to a limited harmonic or complex Fourier series with identical coefficients. This property is used in the work to reduce the error and measurement time. To generate the signal of function, an experimental laboratory setup was created based on the STM32L073RZ Nucleo-64 development board. Using a Fourier analyzer built into a Hantek DSO8060 digital oscilloscope, the FFT results of the formed equal-amplitude complex series $y(x)$ for different values of n were experimentally studied. The rectangularity of the spectra was qualitatively confirmed. The results of the FFT of reactions of low- and high-pass filters and a second-order bandpass filter were also studied. The repeatability of the spectral envelopes of the calculated frequency response filters was qualitatively tested.



Key words: equal-amplitude series, complex series, Fourier series, uniform spectrum, rectangular spectrum, automatic measurements, frequency response measurements, frequency response of filters, test signal.

Cite as: Pavlov, P. A., Frolov, S. S. (2024) [Software and hardware laboratory generator of equal-amplitude complex series]. *Shag v nauku* [Step into science]. Vol. 1, pp. 66–72.

Существующие мануальные методы анализа частотных характеристик (ЧХ) неэффективны и в диапазонах инфра-низких и низких частот требуют значительных трудозатрат – до десятков человеко-часов [6]. Как вариант решения проблемы измерения ЧХ ли-

нейных четырёхполюсников в лабораториях кафедры ПЭИИИТ при изучении теории цепей и профильных дисциплин рассмотрено тестирование сигналом равно амплитудного комплексного ряда (СРКР) [3]

$$y(x) = \frac{\sin\{n \cdot x/2\}}{\sin(x/2)}, \quad x = 2\pi \cdot f \cdot t, \quad n = 2, 3, 4, \dots,$$

вид диаграмм которых различен при чётных и нечётных n (рисунок 1), а комплексный спектр – вещественен и прямоуголен (рисунок 2).

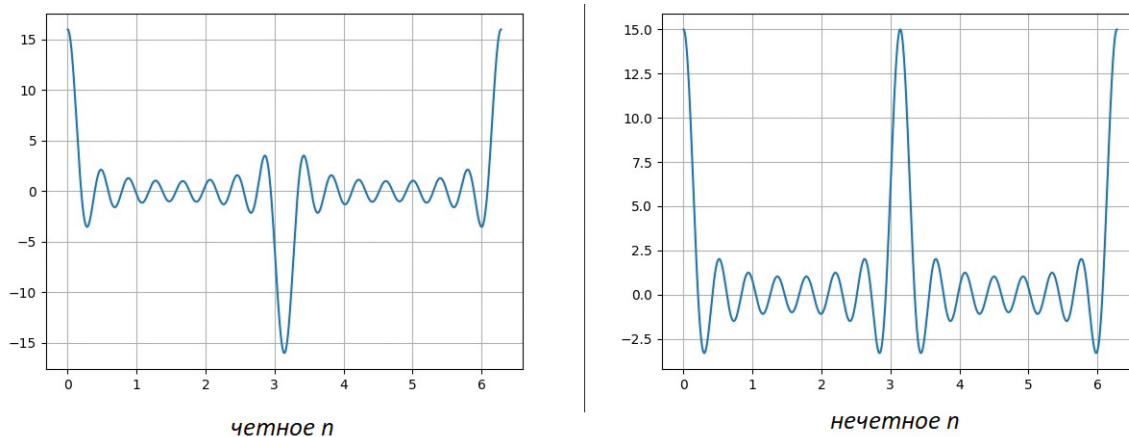


Рисунок 1. Сигналы равно амплитудного комплексного ряда
 Источник: разработано Павловым П. А. в программе Mathcad

В лабораторной установке, формирующей СРКР, используется отладочная плата NUCLEO-64 с микроконтроллером (МК) STM32L073RZ на основе

высокопроизводительного 32-разрядного RISC-ядра Arm Cortex-M32+ (рисунок 3), работающем на частоте 32 МГц.

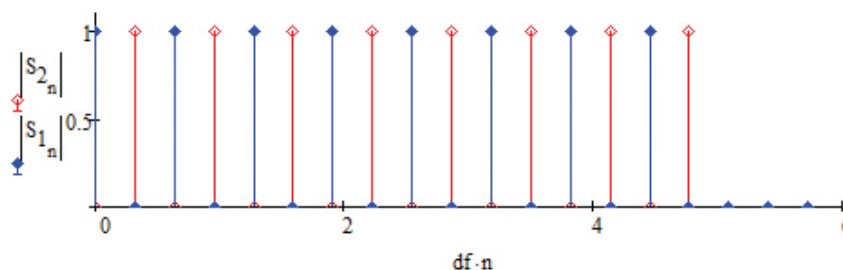


Рисунок 2. Спектры при чётных («красный») и нечётных («синий») n
 Источник: разработано Павловым П. А. с помощью функций БПФ в программе Mathcad

Из периферийных устройств использованы 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для оцифровки отсчётов сигнала отклика на

СРКР и 12-разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) (рисунок 3) для получения тестового сигнала.

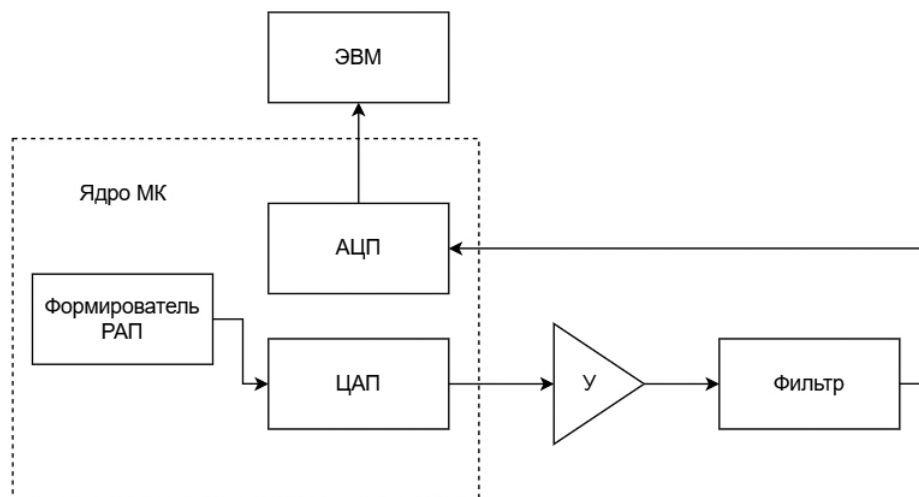


Рисунок 3. Структурная схема лабораторной системы

Источник: разработано авторами

Формирование СРКР в МК описывается на языке C/C++ с помощью библиотеки HAL STM32¹. Массив отсчётов испытательного СРКР (рисунок 1) прошивается в постоянную флэш-память МК.

Сформированный СРКР поступает на вход широ-

кополосного согласующего усилителя, защищающего ЦАП от перегрузки, согласующего последний с малыми входными сопротивлениями фильтров. Схема включения неинвертирующего усиления выполнена на микросхеме LMH6703 (рисунок 4).

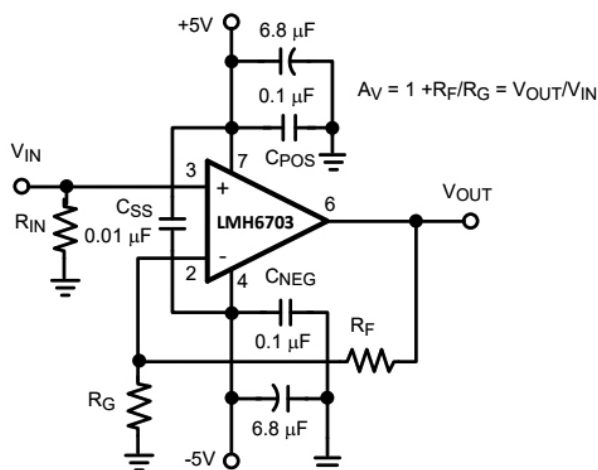


Рисунок 4. Схема включения согласующего усилителя

Источник: взято из LMH6703 1.2 GHz, Low Distortion Op Amp with Shutdown. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/273/DOC012273509.pdf> (дата обращения: 05.03.2023)

¹ Description of STM32L0 HAL and low-layer drivers. – URL: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00113898-description-of-stm32l0-hal-and-low-layer-drivers-stmicroelectronics.pdf (дата обращения: 05.03.2023).

Усилитель требует двухполярного питания. В качестве источника положительного используем USB-порт компьютера. Для отрицательного питания

используем микросхему DC-DC-преобразователя MAX764 (рисунок 5).

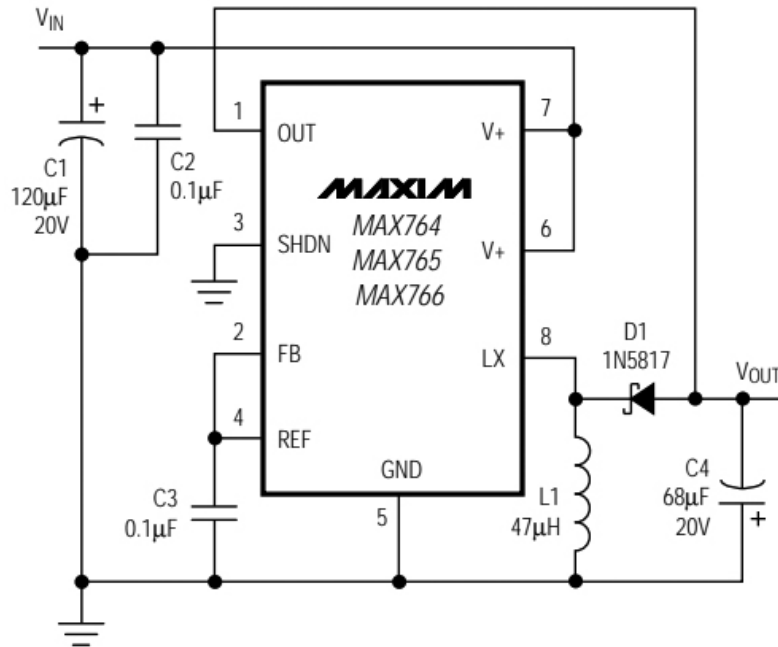


Рисунок 5. Схема преобразователя напряжения

Источник: взято из *-5V/-12V/-15V or Adjustable, High-Efficiency, Low IQ DC-DC Inverters*. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/235/DOC000235559.pdf> (дата обращения: 05.03.2023)

В программе Mathcad выполнен расчётный эксперимент для фильтров нижних (ФНЧ) и верхних частот (ФВЧ), полосового (ПФ) фильтров второго порядка. Рассчитаны ожидаемые выходные спектрограммы (рисунки 6–8).

Сигналы фильтров должны поступать на вход АЦП. Массив отсчётов от МК передаётся по UART протоколу в ЭВМ и сохраняется в файле *.txt.

Полученные результаты

Отлажена программа формирования СРКР для МК. Анализатором Фурье, встроенном в цифровой осциллограф Nantek DSO8060, качественно проверена прямоугольность спектров СРКС при $n = 8, 9, \dots 32$ для частот первых гармоник $f_1 = 7,5 \dots 82$ Гц.

С помощью СРКР протестированы отклики перечисленных выше фильтров. Получившиеся спектры качественно аналогичны представленным выше расчётным. В качестве примера на рисунке 9 представлены диаграммы входного СРКС, отклика ПФ и спектра отклика.

Следующие цели проектирования: закончить разработку структуры рисунка 3 – выполнить ДПФ отклика в том же МК, где формируется СРКР, запрограммировать в МК UART-интерфейс для передачи отклика и его спектра на ЭВМ, реализовать возможность обработки полученных данных – построения диаграмм АЧХ и ФЧХ, измерения их параметров.

Программно-аппаратная лабораторная система на основе формирователя СРКР позволит автоматически исследовать частотные характеристики фильтров со степенью неравномерности менее 1% [7], с разными границами полос пропускания в области 0 Гц ... 20 кГц, включая инфра-низкий диапазон. При работе с системой у студентов сократится время исследования АЧХ и ФЧХ фильтров, улучшится степень их детализации и точность расчёта параметров.

После испытаний системы в учебном процессе и её совершенствования она может быть полезна при производстве и эксплуатации радиоэлектронных [5], измерительных [4], инфо- и телекоммуникационных систем [2].

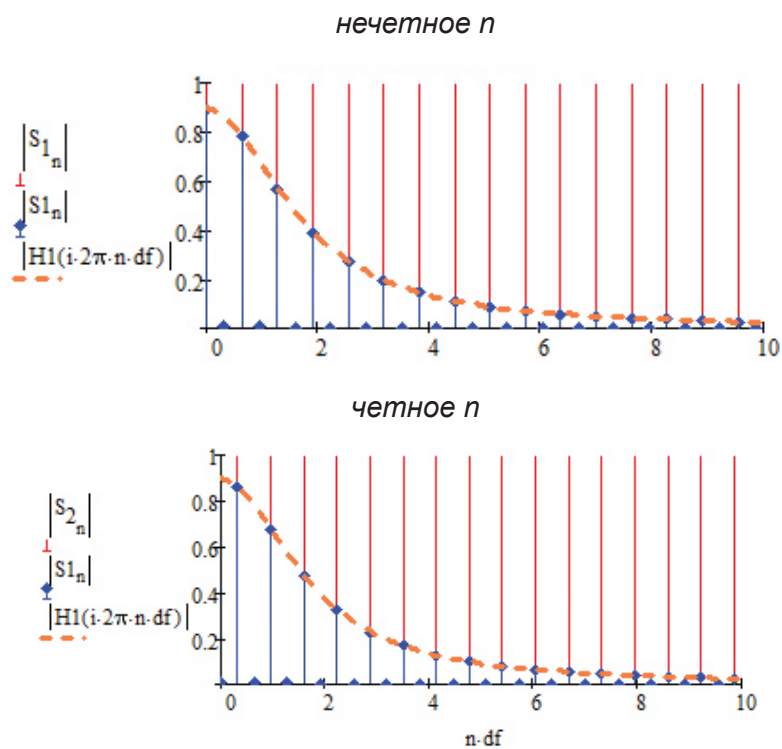


Рисунок 6. Спектры на входе и выходе ФНЧ на фоне его АЧХ
Источник: разработано Павловым П. А. в программе Mathcad

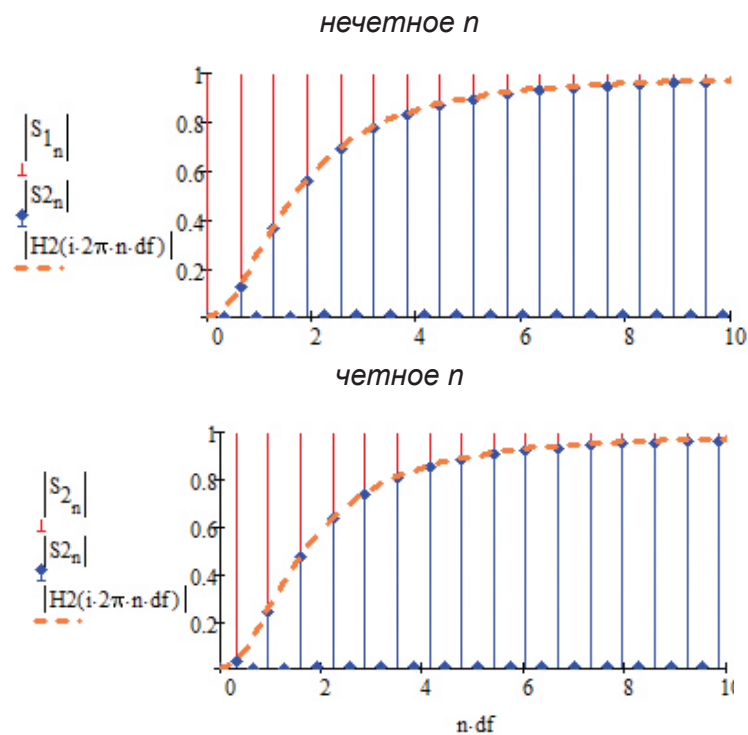


Рисунок 7. Спектры на входе и выходе ФВЧ на фоне его АЧХ
Источник: разработано Павловым П. А. в программе Mathcad

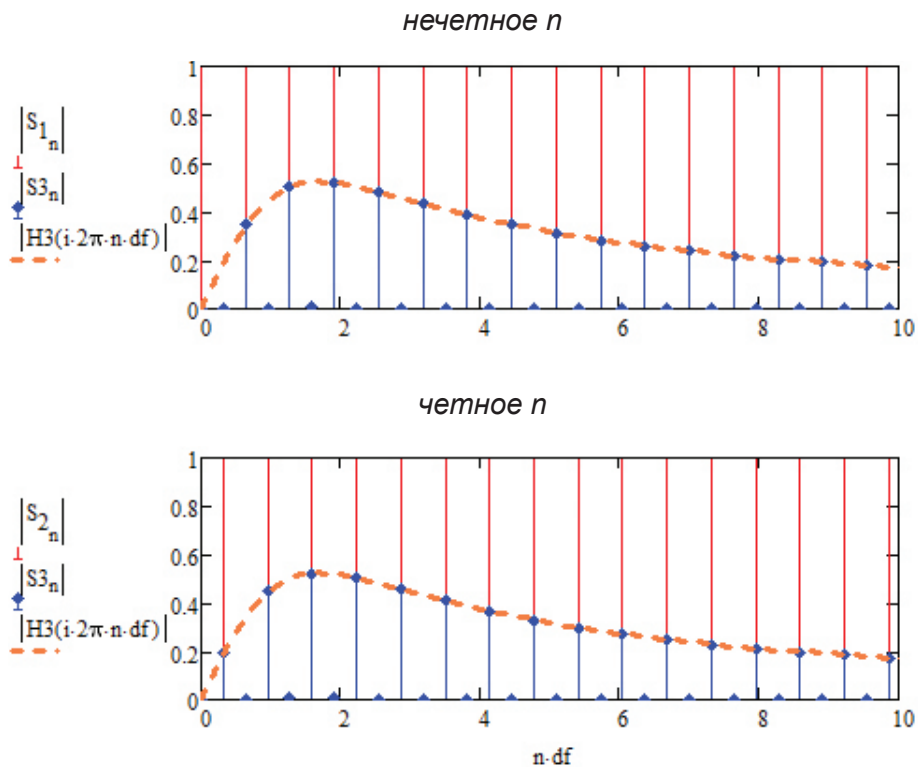


Рисунок 8. Спектры на входе и выходе ПФ на фоне его АЧХ
Источник: разработано Павловым П. А. в программе Mathcad

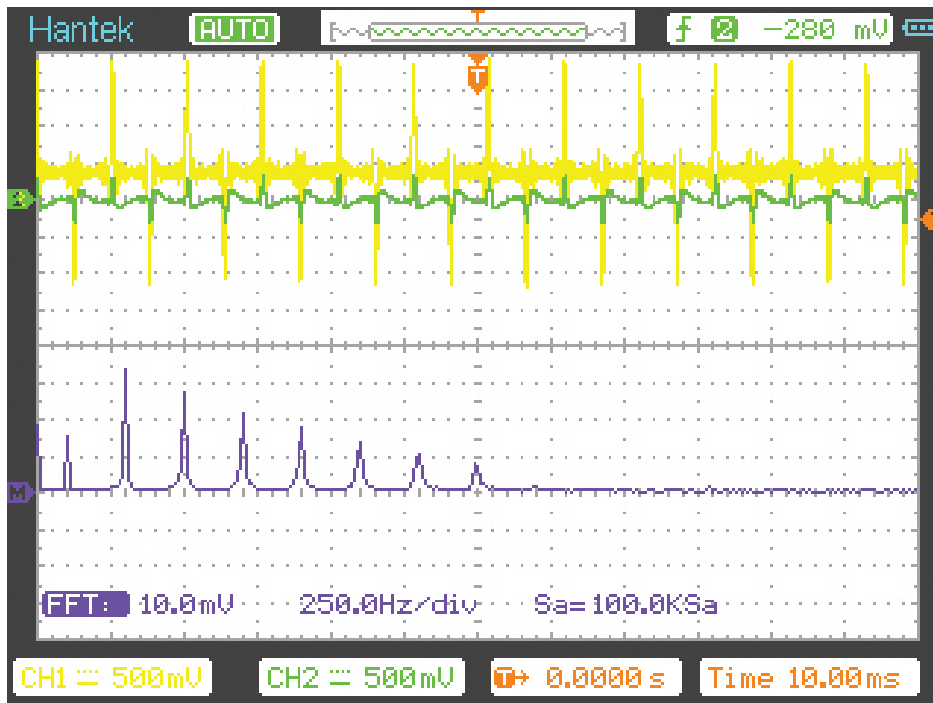


Рисунок 9. Спектр на выходе ПФ. Электронная копия дисплея осциллографа Hantek DSO8060
Источник: разработано Павловым П. А.

Литература

1. Гутников В. С. Фильтрация измерительных сигналов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 192 с.
2. Петросьянц В. В., Бурындина А. Д. Автоматизация процесса снятия амплитудно-частотных характеристик электронных устройств // Молодой учёный. – 2017. – № 22 (156). – С. 65–68.
3. Способ восстановления исходного сигнала: пат. 2259591 Рос. Федерация. № 2003113165/09; заявл. 05.05.2003; опубл. 27.08.2005, Бюл. № 24. – 11 с.
4. Способ контроля амплитудно-частотной характеристики фильтра: пат. 2721018 Рос. Федерация. № 2019108858; заявл. 26.03.2019; опубл. 15.05.2020, Бюл. № 14. – 7 с.
5. Устройство для контроля и настройки амплитудно-частотных характеристик: пат. 2025899 Рос. Федерация. № 4676485/09; заявл. 11.04.1989; опубл. 30.12.1994, Бюл. № 36. – 15 с.
6. Фролов С. С., Шевеленко В. Д., Гусаров А. А. Метод аппроксимации синусоидального равноамплитудного полинома // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – № 9. – С. 317–325.
7. Фролов С. С., Шевеленко В. Д., Гусаров А. А. Уточненный метод аппроксимации равноамплитудных временных полиномов // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : Труды Всероссийской научно-технической конференции, Оренбург, 08–12 октября 2007 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2007. – С. 341–347.

Статья поступила в редакцию: 15.05.2023; принята в печать: 06.03.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.