

УДК 621.317.08

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТЕНДА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИЙ РАВНОАМПЛИТУДНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ РЯДОВ

Лукьянчиков Алексей Андреевич, магистрант, направление подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: vincentcassel985@gmail.com

Демешко Артем Алексеевич, студент, направление подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: demeshko-11@mail.ru

Третьяков Михаил Андреевич, магистрант, направление подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: ms.miha12345@gmail.com

Научный руководитель: **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 данной статье представлены результаты разработки макета стенда для автоматизированного измерения амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных характеристик (ФЧХ) линейных четырехполюсников с применением в качестве тестовых воздействий функций равноамплитудных гармонических рядов (РАП). Особенность функций – прямоугольность амплитудного спектра и нулевые значения фазового спектра. Указанные свойства облегчают повышение точности измерений и эффективности работы измерительных систем АЧХ и ФЧХ. Рассмотрена структура стенда, принцип его работы в совокупности с программным обеспечением микроконтроллера (МК) и особенности формирования функций гармонических рядов, связанных с архитектурой МК. Использован микроконтроллер из серии STM32. Полученные результаты могут быть полезными для специалистов в области электроники, измерительной техники и автоматизации измерительных процессов.*

***Ключевые слова:** автоматизированное измерение, измерение частотных характеристик, прямоугольный спектр, равноамплитудный косинусоидальный ряд, равноамплитудный комплексный спектр, равноамплитудный синусный ряд.*

***Для цитирования:** Лукьянчиков А. А., Демешко А. А., Третьяков М. А. Разработка автоматизированного стенда измерения частотных характеристик с использованием функций равноамплитудных гармонических рядов // Шаг в науку. – 2024. – № 3. – С. 36–42.*

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED STAND FOR MEASURING FREQUENCY CHARACTERISTICS USING FUNCTIONS OF EQUAL-AMPLITUDE HARMONIC SERIES

Lukyanichikov Alexey Andreevich, postgraduate student, training program 11.04.04 Electronics and nanoelectronics, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: vincentcassel985@gmail.com

Demeshko Artem Alekseevich, student, training program 11.03.04 Electronics and nanoelectronics, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: demeshko-11@mail.ru



Tretyakov Mikhail Andreevich, postgraduate student, training program 11.04.04 Electronics and nanoelectronics, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: ms.miha12345@gmail.com

Research advisor: **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. This article presents the current results of work on the development of a bench layout for automatic measurement of amplitude-frequency (AFC) and phase-frequency characteristics (PFC) of linear harmonic quadripoles using functions of equal-amplitude series as test influences. Special functions are the squareness of radius radiation and zero values of phase radiation. These properties improve the accuracy of measurements and the operating efficiency of measuring systems for frequency response and phase response.

The structure of the stand, the principle of its operation in conjunction with microcontroller (MC) software and the features of the formation of harmonic series functions associated with the architecture of the MC are considered. The microcontroller used is from the STM32 series. The results obtained can be useful for specialists in the field of electronics, measurement technology and automation of measurement processes.

Key words: automated measurement, measurement of frequency characteristics, rectangular spectrum, equal-amplitude cosine series, equal-amplitude complex spectrum, equal-amplitude sine series.

Cite as: Lukyanchikov, A. A., Demeshko, A. A., Tretyakov, M. A. (2024) [Development of an automated stand for measuring frequency characteristics using functions of equal-amplitude harmonic series]. *Shag v nauku* [Step into science]. Vol. 3, pp. 36–42.

Информационно-измерительные системы (ИИС) актуальны во многих областях производства и жизнедеятельности: нефтедобыча, газодобыча, электромашиностроение. В частности, при диагностике механических, электромеханических конструкций и в медицине востребованы ИИС, работающие на инфранизких и низких частотах (НИИС).

Для того чтобы информационные измерительные системы, работающие на инфра-низких и низких частотах, могли обрабатывать измерительную информацию с достоверностью, удовлетворяющей техническим условиям, в процессе их разработки, промышленного производства и технического обслуживания требуется контроль и измерение параметров амплитудно-фазочастотных характеристик (АФЧХ) [3] линейных электронных узлов – четырёхполюсников, входящих в измерительные и информационные каналы указанных информационных измерительных систем, работающих на инфра-низких и низких частотах.

При автоматическом анализе частотных характе-

ристик фильтров применяются следующие методы:

- воздействие ЛЧМ-импульсом (сви́пирование частоты) с индикацией или анализом результата детектирования отклика;
- воздействие на четырёхполюсник шумом, близким к «белому»;
- автоматизация метода «генератор синуса – осциллограф».

Однако у перечисленных методов есть недостатки [7]:

- первым и вторым методами не измеряется фазочастотная характеристика;
- неравномерность амплитуды ЛЧМ-импульса измерителей не меньше 0,3 дБ;
- при тестировании (с помощью ЛЧМ-импульсов) узлов звуковых устройств требуется время от единиц до нескольких десятков секунд.

В данной работе тестовыми сигналами выступают равноамплитудные ряды косинусов (РРК) и синусов (РРС):

$$D_N(x) = \frac{\sin\left(\frac{Nx}{2}\right)}{\sin\left(\frac{x}{2}\right)}, \quad (1)$$

$$D_N(x) = \frac{\sin^2\left(\frac{Nx}{2}\right)}{\sin\left(\frac{x}{2}\right)}. \quad (2)$$

Что касается РРК, в работе [6] выделены следующие преимущества:

- фазовый спектр – нулевой, поэтому методическая погрешность оценки ФЧХ, обусловленная формированием тестового сигнала, будет отсутствовать;
- амплитудный спектр абсолютно прямоуголен – в области низких частот его неравномерность $\Delta A = 0$, после некоторой частоты f_b он нулевой.

Для вычисления выходного спектра исследуемого четырёхполосника потребуется минимальное количество временных выборок, определяемое теоремой Котельникова. Что же касается РРС, на данном этапе

он еще не исследован полностью, но можно выделить одно преимущество по отношению к РРК: при оцифровке РРС искажения, обусловленные квантованием, меньше, чем при оцифровке РРК.

Автоматизированная система измерения частотных характеристик (ЧХ) состоит из отладочной платы NUCLEOL073-RZ, двух блоков согласования, избирательного устройства (ФНЧ) и персонального компьютера. В дальнейшем планируется исследование и с другими фильтрами в качестве избирательных устройств. Схема системы изображена на рисунке 1.

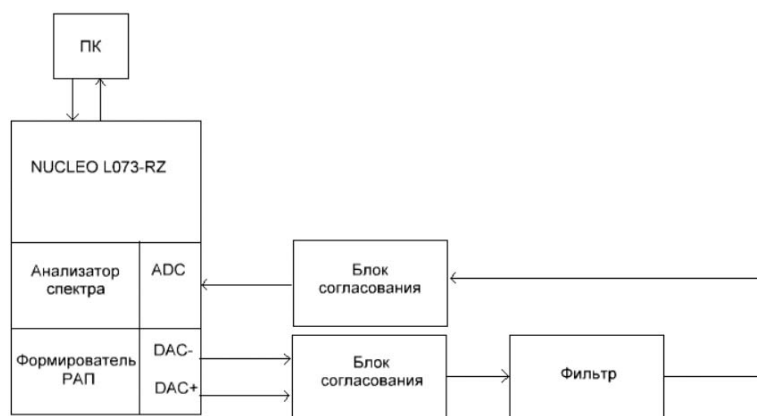


Рисунок 1. Структурная схема системы

Источник: разработано автором А. А. Лукьянчиковым

Принцип работы системы состоит в следующем: массив отсчетов РАП формируется и разделяется на отрицательные и положительные массивы значений на компьютере, массивы отсылаются в микроконтроллер, после чего отсчеты поступают на блок согласования (дифференциальный усилитель) через два ЦАП с целью согласования по мощности, затем сигнал поступает на избирательное устройство (фильтр). Сигнал реакции фильтра попадает на второй блок согласования (схема сдвига уровня) из-за того, что АЦП

работает с однополярным сигналом и нам нужно избежать этого. После блока согласования сдвинутый сигнал поступает на АЦП микроконтроллера, где оцифровывается и вычисляется спектр сигнала реакции фильтра, используя дискретное преобразование Фурье.

Для формирования массива РАП используем математический пакет Mathcad. Диаграмма равноамплитудного ряда косинусов во временной области представлена на рисунке 2.

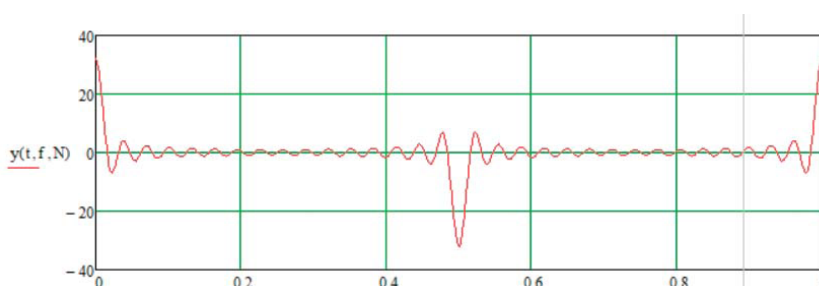


Рисунок 2. Временная диаграмма равноамплитудного ряда косинусов

Источник: разработано автором А. А. Лукьянчиковым

Для отправки в ЦАП данные разделили на 2 массива [1]: положительных и модулей отрицательных значений (Positive и Negative на рисунках 3 и 4).

$$\begin{pmatrix} 3686 & 3319 & 2348 & 1107 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 372 & 474 & 305 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 201 & 269 & 181 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 141 & 193 & 132 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 112 & 155 & 108 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 96 & 134 & 94 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 87 & 122 & 86 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 83 & 116 & 82 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 81 & 115 & 82 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 83 & 119 & 85 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 89 & 127 & 91 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 143 & 103 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 118 & 172 & 125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 152 & 224 & 165 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 226 & 342 & 260 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 476 & 785 & 665 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 665 & 785 & 476 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 260 & 342 & 226 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 165 & 224 & 152 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 125 & 172 & 118 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 103 & 143 & 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 91 & 127 & 89 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 85 & 119 & 83 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 82 & 115 & 81 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 82 & 116 & 83 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 86 & 122 & 87 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 94 & 134 & 96 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 108 & 155 & 112 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 132 & 193 & 141 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 181 & 269 & 201 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 305 & 474 & 372 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1107 & 2348 & 3319 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3. Массив Positive для отправки в ЦАП
 Источник: разработано автором А. А. Лукьянчиковым

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 665 & 785 & 476 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 260 & 342 & 226 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 165 & 224 & 152 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 125 & 172 & 118 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 103 & 143 & 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 91 & 127 & 89 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 85 & 119 & 83 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 82 & 115 & 81 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 82 & 116 & 83 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 86 & 122 & 87 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 94 & 134 & 96 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 108 & 155 & 112 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 132 & 193 & 141 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 181 & 269 & 201 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 305 & 474 & 372 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1107 & 2348 & 3319 \\ 3686 & 3319 & 2348 & 1107 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 372 & 474 & 305 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 201 & 269 & 181 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 141 & 193 & 132 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 112 & 155 & 108 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 96 & 134 & 94 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 87 & 122 & 86 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 83 & 116 & 82 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 81 & 115 & 82 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 83 & 119 & 85 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 89 & 127 & 91 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 143 & 103 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 118 & 172 & 125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 152 & 224 & 165 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 226 & 342 & 260 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 476 & 785 & 665 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рисунок 4. Массив Negative для отправки в ЦАП
 Источник: разработано автором А. А. Лукьянчиковым

В программе было отлажено формирование сигнала РРК, управление периодом повторения, первая версия алгоритма дискретного преобразования Фу-

рье (ДПФ): результат сформированного РРК сигнала с регулировкой периода повторения можно видеть на рисунках 5, 6. Из рисунков видно, что можно ре-

гулировать период сигнала при помощи управления модулем счета и предделителем частоты счета таймера TIM2. На рисунке 7 показана разработанная печатная плата (2 блока согласования и стабилизатор напряжений $\pm 5V$ для питания усилителей). Потенциометр нужен для регулирования амплитуды сигнала

отклика фильтра в целях согласования с диапазоном напряжений на входе АЦП. Конструкция системы рисунка 1 – отладочная плата микроконтроллера, плата согласующих усилителей и плата исследуемого фильтра – представляют собой многоэтажную сборку типа «сэндвич».

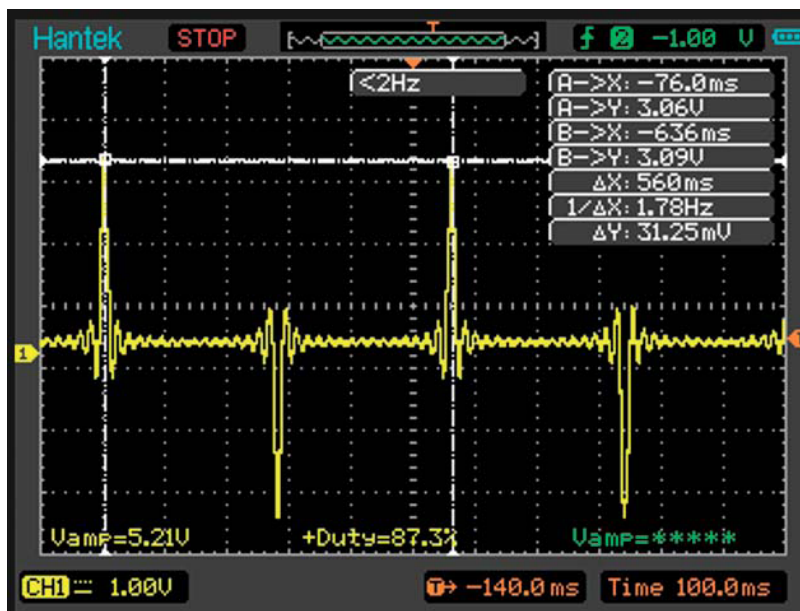


Рисунок 5. Сформированный равноамплитудный ряд косинусов с периодом 560 мс
Источник: разработано автором А. А. Лукьянчиковым

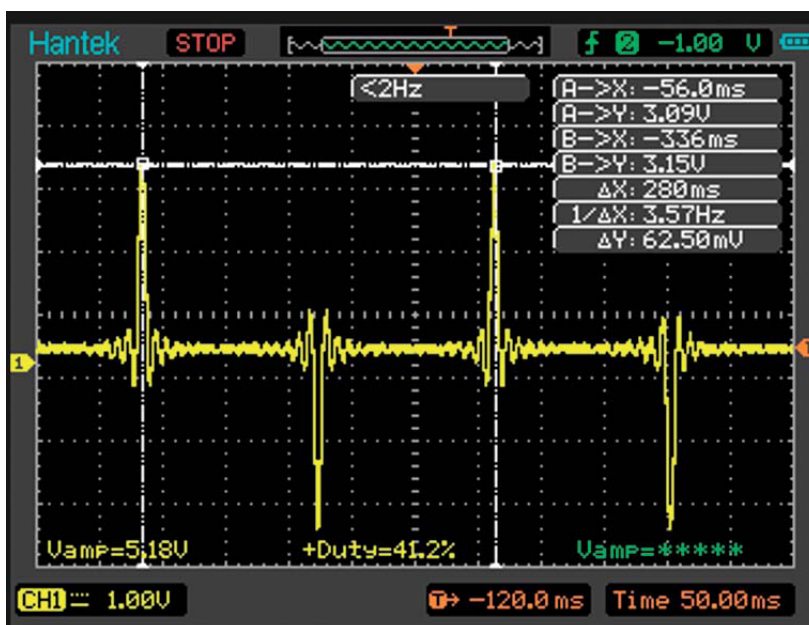


Рисунок 6. Сформированный равноамплитудный ряд косинусов с периодом 280 мс
Источник: разработано автором А. А. Лукьянчиковым

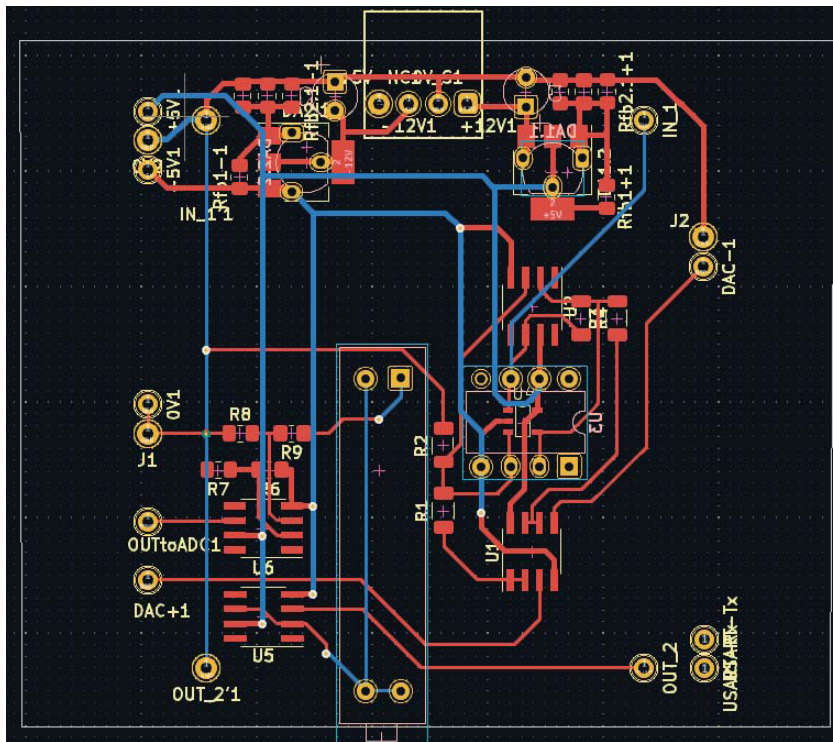


Рисунок 7. Разработанная печатная плата
Источник: разработано автором А. А. Лукьянчиковым

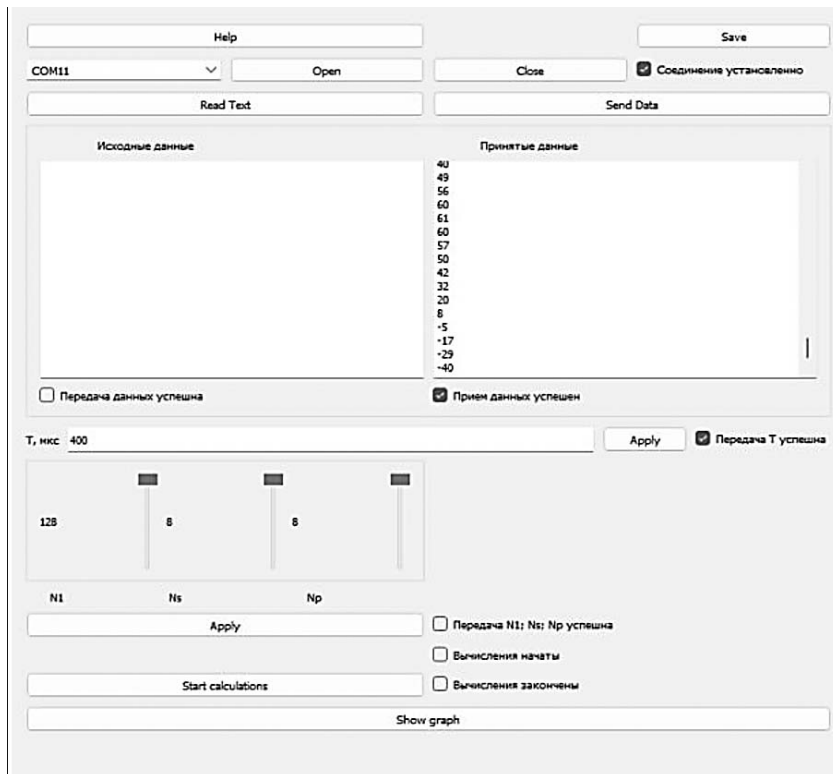


Рисунок 8. Интерфейс управления стендом
Источник: разработано автором М. А. Третьяковым

На рисунке 8 виден интерфейс, разработанный для управления системой с помощью компьютера.

В работе предлагается пользовательский интерфейс, написанный на языке программирования Python, с подключением библиотеки PyQt5. Средства и возможности языка, а также встраиваемых библиотек позволят реализовать обмен данными между ПК и МК, дадут пользователю возможность отправлять/сохранять данные прямо из файла, помогут реализовать ввод данных напрямую, а также визуализировать полученный результат в виде графика.

На текущей стадии проекта был реализован пер-

вичный интерфейс для взаимодействия со стендом через ПК по протоколу UART. Была реализована плата согласованного генератора РРК. В программе отлажено генерирование сигнала, регулирование периода повторений при помощи таймера и отработан первоначальный алгоритм ДПФ.

По окончании испытаний стенда при обучении студентов и его совершенствования эту систему можно внедрить в производство и эксплуатировать в радиоэлектронных [5], измерительных [4], инфо- и телекоммуникационных системах [2].

Литература

1. Павлов П. А., Фролов С. С. Программно-аппаратный лабораторный формирователь равноамплитудного комплексного ряда // Шаг в науку. – 2024. – № 1. – С. 66–72.
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 измерения амплитудно-частотных характеристик : пат. 2 054 684 Рос. Федерация. № 5055759/09; заявл. 22.07.1992; опубл. 20.02.1996 – 8 с.
4. Способ контроля амплитудно-частотной характеристики фильтра: пат. 2 721 018 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. 2 025 899 Рос. Федерация. № 4676485/09; заявл. 11.04.1989; опубл. 30.12.1994 – 15 с.
6. Фролов С. С. Разработка методов повышения точности информационно-измерительных систем параметров амплитудно-фазочастотных характеристик: дис... канд. техн. наук. – Самара, 2008. – 191 с.
7. Фролов С. С., Шевеленко В. Д., Гусаров А. А. Метод аппроксимации синусоидального равноамплитудного полинома // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – № 9 (59). – С. 317–325.

Статья поступила в редакцию: 06.05.2024; принята в печать: 03.09.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.