

УДК 621.396.65

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-51-62>

EDN NOGIBI



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ временных программно-аппаратных задержек в схемах аудиомодулей с киберфизической SPICE-эмуляцией

Н.Р. Левченко[@], М.С. Костин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: Levchenko_n@mirea.ru

• Поступила: 04.03.2025 • Доработана: 05.05.2025 • Принята к опубликованию: 26.07.2025

Резюме

Цели. Цель статьи – параметрический анализ влияния временных задержек в схемах киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей, вносимых аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями программно-аппаратного интерфейса, центральным процессором и программной средой визуально-графической эмуляции (ВГЭ) в зависимости от выбранного протокола «ввода-вывода» данных и установленных параметров программного блока ВГЭ, таких как частота дискретизации, размер и время буфера, число каналов.

Методы. Применяются методы архитектурного SPICE¹-моделирования электрических схем на программных платформах ВГЭ *Simulink*, в т.ч. с использованием ресурсов библиотеки *Simscape*, и *LiveSPICE*; методы интегрирования дифференциальных уравнений при численном анализе SPICE-моделей аналоговых схем; методы обработки экспериментальных данных киберфизической эмуляции с помощью встроенных средств среды *Simulink* и лабораторного радиоизмерительного оборудования.

Результаты. Предложен метод киберфизической SPICE-эмуляции аналоговых аудиоустройств. Получены результаты анализа формирования временных задержек в схемах сигнальных аудиомодулей с киберфизической эмуляцией при вариации преднастраиваемых параметров, влияющих на задержки сигналов, с применением двойников. Разработаны технические рекомендации выбора корректирующих параметров временных задержек от 20 до 120 мс для обеспечения постобработки аудиосигнала.

Выводы. Показано, что для часто используемого в аудиоинтерфейсной технике протокола «ввода-вывода» данных ASIO² при тождественно установленных параметрах программного блока ВГЭ (частота дискретизации 44.1 кГц, размер буфера 8) типовые функциональные узлы схем аудиомодулей с киберфизической эмуляцией, построенные в среде ВГЭ *LiveSPICE*, имеют наименьшие временные задержки 5 мс – для схемы прямого прохождения сигнала и 7 мс – в случае с киберфизической эмуляцией SPICE-схемы в отношении

¹ SPICE (англ. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) – программа-симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом. [SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) is an open source simulator of general-purpose electronic circuits.]

² Audio Stream Input/Output, «ввод-вывод потоковых аудиоданных» – протокол передачи данных с малой задержкой, предоставляющий приложениям унифицированный интерфейс к аппаратным ресурсам. [Audio Stream Input/Output is a low-latency data transmission technology providing applications with a uniform interface to hardware resources.]

к их реализации в среде ВГЭ *Simulink*. Установлено, что обоснованно выбранными настройками при практической реализации метода киберфизической эмуляции SPICE-моделей являются: частота дискретизации 44.1 кГц, размер буфера от 512 до 1024 семплов и протокол «ввода-вывода» данных ASIO.

Ключевые слова: временные задержки, киберфизическая SPICE-эмуляция, *Simulink*, *LiveSPICE*, *Simscape*, аудиointерфейс, ASIO, сигнальный аудиомодуль

Для цитирования: Левченко Н.Р., Костин М.С. Анализ временных программно-аппаратных задержек в схемах аудиомодулей с киберфизической SPICE-эмуляцией. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):51–62. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-51-62>, <https://www.elibrary.ru/NOGIBI>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Analysis of time software and hardware delays in audio module circuits with cyber-physical SPICE emulation

Nikita R. Levchenko[@], Mihail S. Kostin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: Levchenko_n@mirea.ru

• Submitted: 04.03.2025 • Revised: 05.05.2025 • Accepted: 26.07.2025

Abstract

Objectives. The study sets out to parametrically investigate the impact of time delays within cyber-physical emulation circuits for signal audio modules. Specifically, it examines how delays introduced by analog-to-digital and digital-to-analog converters of the hardware/software interface, the central processor, and the visual graphical emulation (VGE) software environment are influenced by factors like the selected data input-output protocol and the VGE block preset configurations such as sampling rate, buffer size and time, and the number of channels.

Methods. Used methods of architectural SPICE³ modeling of electrical circuits on the VGE *Simulink* software platforms leverage the resources of the *Simscape* library and *LiveSPICE*. Additional methods include those for incorporating differential equations in the numerical analysis of SPICE models designed for analog circuits and techniques for processing experimental data generated from cyber-physical emulation using the built-in *Simulink* environment and associated laboratory radio measurement tools.

Results. The study introduces a novel approach to emulate analog audio devices using cyber-physical SPICE modeling. Through the use of digital twins, the study investigates the impact of modifiable parameters on signal delays within audio module circuits during cyber-physical emulation. Based on these findings, technical guidelines are provided for selecting appropriate delay correction settings between 20 and 120 ms to ensure efficient high-speed audio signal post-processing.

Conclusions. By configuring the VGE software block's settings identically to the ASIO⁴ data input/output protocol prevalent in audio interface technology (44.1 kHz sampling frequency, 8 buffer size) substantially decreased

³ SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) is an open-source simulator for general-purpose electronic circuits.

⁴ Audio Stream Input/Output is a low-latency data transmission technology providing applications with a uniform interface to hardware resources.

latency in typical audio module circuit nodes is achieved with cyber-physical emulation built into the VGE *LiveSPICE* environment. The achieved time delays of 5 ms direct transmission circuit contrast with the 7 ms latency observed in the cyber-physical emulation of the SPICE circuit when both are benchmarked within the VGE *Simulink* environment. The successful implementation of cyber-physical emulation for SPICE models is achieved through the use of particular settings, such as a 44.1 kHz sampling frequency, buffer sizes ranging from 512 to 1024 samples, and the use of the ASIO data input/output protocol.

Keywords: time delay, correction, cyber-physical SPICE emulation, Simulink, LiveSPICE, Simscape, audio interface, ASIO, signal audio module

For citation: Levchenko N.R., Kostin M.S. Analysis of time software and hardware delays in audio module circuits with cyber-physical SPICE emulation. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):51–62. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-51-62>, <https://www.elibrary.ru/NOGIBI>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, при автоматизированной разработке и программно-численном анализе схемно-архитектурных решений функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры применима следующая классификация цифрового описания электрических схем: кодовое, визуально-графическое и смешанное [1]. Так, например, интерпретация аппаратной архитектуры функциональных схем сигнальных радиомодулей при помощи программного кода предполагает использование специализированных языков описания SPICE⁵, VHDL⁶ или языков объектно-ориентированного программирования C/C++, Java, Python, Ruby и т.д. Визуально-графическое описание является реализацией кодовой интерпретации схемотехнической и функциональной архитектуры с помощью функциональных блоков, соединенных в ориентированный граф. При этом смешанная эмуляция предполагает вариативную комбинацию кодового, блочного и специального языкового аппаратного описания элементов схем, а также их электрических и логических связей.

Типичным примером интерпретации аналоговых схемотехнических решений является SPICE-эмулятор [2], построенный на численных методах интегрирования дифференциальных систем уравнений для нахождения токов и напряжений в заданной электрической цепи.

Как известно, компании по производству электронной компонентной базы (ЭКБ), такие

как Texas Instruments⁷, Linear Technology⁸, KYOCERA AVX⁹, STMicroelectronics¹⁰ и др., предоставляют инженерам-разработчикам параметрические SPICE-модели, а также векторные S-модели библиотек ЭКБ с эмпирически выверенными характеристиками. При этом использование оригинальных библиотек ЭКБ с полной параметризацией, ориентированной под конкретные эквивалентные модели, построенные на базе широко применяемого движка SPICE-эмулятора для различных групп радиокомпонентов и аналоговых интегральных схем, позволяет в сжатые временные сроки добиться надежной воспроизводимости радиотехнических характеристик электронного печатного узла по отношению к результатам его схемотехнической эмуляции.

Примерами визуально-графического описания являются среды визуального проектирования *SigmaStudio*¹¹, *LTSPICE*¹², *QSPICE*¹³, *Tina-TI*¹⁴, *NI Multisim*¹⁵ и др. С помощью таких

⁷ Сайт производителя Texas Instruments. <https://www.ti.com/>. Дата обращения 20.02.2025. [Texas Instruments official website. <https://www.ti.com/>. Accessed February 20, 2025.]

⁸ <https://lineartech.com/>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

⁹ <https://www.kyocera-avx.com/>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹⁰ <https://www.st.com/>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹¹ <https://wiki.analog.com/resources/tools-software/sigmastudio>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹² <https://www.quadcept.com/en/service/simulation/ltpspice/>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹³ <https://www.qorvo.com/design-hub/design-tools/interactive/qs spice>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹⁴ <https://designsoftware.com/home/English/>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹⁵ https://www.ni.com/en/support/downloads/software-products/download.multisim.html?srsId=AfmBOopwVYxFcVbXG5r0bM3lm203f24w4RwAIItsF3NAp9On-4a8eb_F#452133. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

⁵ SPICE (англ. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) – программа-симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом. [SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) is an open source simulator of general-purpose electronic circuits.]

⁶ VHDL (англ. VHSIC (Very High Speed Integrated Circuits) Hardware Description Language) – язык описания аппаратуры интегральных схем. [VHDL is a Very High Speed Integrated Circuit (VHSIC) Hardware Description Language.]

автоматизированных платформ визуального проектирования со скрытым кодом представляется возможным разработать схмотехническую архитектуру электронного изделия любой конфигурации с помощью библиотечных блоков и модулей. Недостаток таких автоматизированных платформ – отсутствие возможности внесения в реальном времени изменений в описания блоков при помощи пользовательского программного кода. Данного недостатка лишены среды визуально-графической эмуляции (ВГЭ), такие как *LabView*¹⁶, *Simulink Proteus Design Suite*¹⁷ и др. Платформы ВГЭ относятся к классу смешанного описания, т.е. имеют возможность изменения блоков с помощью кода высокоуровневого или командного языка программирования.

Киберфизическим решением в области специальной SPICE-эмуляции аудиомодулей является программная среда ВГЭ *LiveSPICE*¹⁸, созданная зарубежным инженером-изобретателем Д. Шарлетом для персональных разработок, анализа и сигнальной отладки электрических аудиосхем на базе протокола ASIO¹⁹ путем трансляции сигналов в SPICE-модель схемы через аудиоинтерфейс в режиме реального времени.

Предложенный Д. Шарлетом метод киберфизической SPICE-эмуляции сигнальных аудиомодулей, нашедший первое практическое воплощение в среде ВГЭ *LiveSPICE*, является весьма актуальным для исследования, поскольку его внедрение позволит разрабатывать, проводить сигнальную отладку и анализ аналоговых низкочастотных SPICE-схем с физически реальными сигналами от внешних схемно-аппаратных решений в реальном времени. При этом научно-практическая адаптация и внедрение метода киберфизической SPICE-эмуляции в инженерную среду разработчиков требуют перехода на глобальные мультифункциональные платформы ВГЭ со смешанным описанием схем, а также более широким спектром доступных библиотек и возможностью открытого пользовательского программного доступа, как, например, *Simulink*.

Метод состоит в замене для анализа и сигнальной отладки аппаратного модуля или функционального

узла, составляющего схемно-архитектурную часть реального радиоэлектронного устройства, киберсхемой, построенной на программной платформе ВГЭ.

1. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК В СХЕМАХ АУДИОСИГНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ ЭМУЛЯЦИЕЙ

Функциональная схема реализации метода киберфизической SPICE-эмуляции (рис. 1), иллюстрирующая приемопередачу сигнала по протоколу «ввода-вывода» между программно-аппаратным интерфейсом (аудиоинтерфейсом) и предустановленной средой ВГЭ, работает следующим образом. Аудиосигнал подается на входные каналы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) программно-аппаратного интерфейса; программно-аппаратный интерфейс, подключенный через порт USB к компьютеру, по протоколу передачи аудиосигнала через драйвер передает в систему ВГЭ информацию о сигнале; система ВГЭ передает обработанный сигнал программно-аппаратному интерфейсу; программно-аппаратный интерфейс выводит обработанный сигнал на выходные каналы цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Основными параметрами программного блока ВГЭ, влияющими на временные задержки, возникающие при прохождении входного сигнала через программно-аппаратный интерфейс, драйвер и систему ВГЭ, помимо быстродействия АЦП/ЦАП и задержек протокола «ввода-вывода» данных, являются частота дискретизации, размер и время буферизации, число задействованных аппаратных каналов и т.д. Общая формула для накопленных временных задержек $T_{ВЗ \text{ накопл}}$ выглядит следующим образом:

$$T_{ВЗ \text{ накопл}} = T_{АВЗ} + T_{ВЗ \text{ ВГЭ}}, \quad (1)$$

где $T_{АВЗ}$ – аппаратные временные задержки; $T_{ВЗ \text{ ВГЭ}}$ – временные задержки, вносимые блоком ВГЭ.

Аппаратные временные задержки при обработке аудиоинтерфейсом $T_{\text{инт}}$ описываются следующей формулой:

$$T_{\text{инт}} = T_{\text{ЦАП}} + T_{\text{АЦП}} + T_{\text{буф}} + T_{\text{разр}} + T_{\text{чд}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{ЦАП}}$ – временные задержки, вносимые ЦАП выходного канала программно-аппаратного интерфейса; $T_{\text{АЦП}}$ – временные задержки, вносимые АЦП входного канала программно-аппаратного интерфейса; $T_{\text{буф}}$ – временные задержки, вносимые буфером программно-аппаратного интерфейса; $T_{\text{разр}}$ – временные задержки, определяемые разрядностью АЦП/ЦАП входного/выходного канала программно-аппаратного интерфейса; $T_{\text{чд}}$ – временные задержки, определяемые частотой дискретизации.

¹⁶ <https://www.ni.com/en/shop/labview.html?srsId=AfmBOoowwWPAjm-J6TthCp-LDLqR2ikpuO0W5eJHВp2ukB0E3Хe00cfO>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹⁷ <https://proteus.no/proteus.html>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹⁸ Сайт разработчика *LiveSPICE*. <https://www.livespice.org/>. Дата обращения 20.02.2025. [The LiveSPICE developer official website. <https://www.livespice.org/>. Accessed February 20, 2025.]

¹⁹ Audio Stream Input/Output, «ввод-вывод потоковых аудиоданных» – протокол передачи данных с малой задержкой, предоставляющий приложениям унифицированный интерфейс к аппаратным ресурсам. [Audio Stream Input/Output is a low-latency data transmission technology providing applications with a uniform interface to hardware resources.]

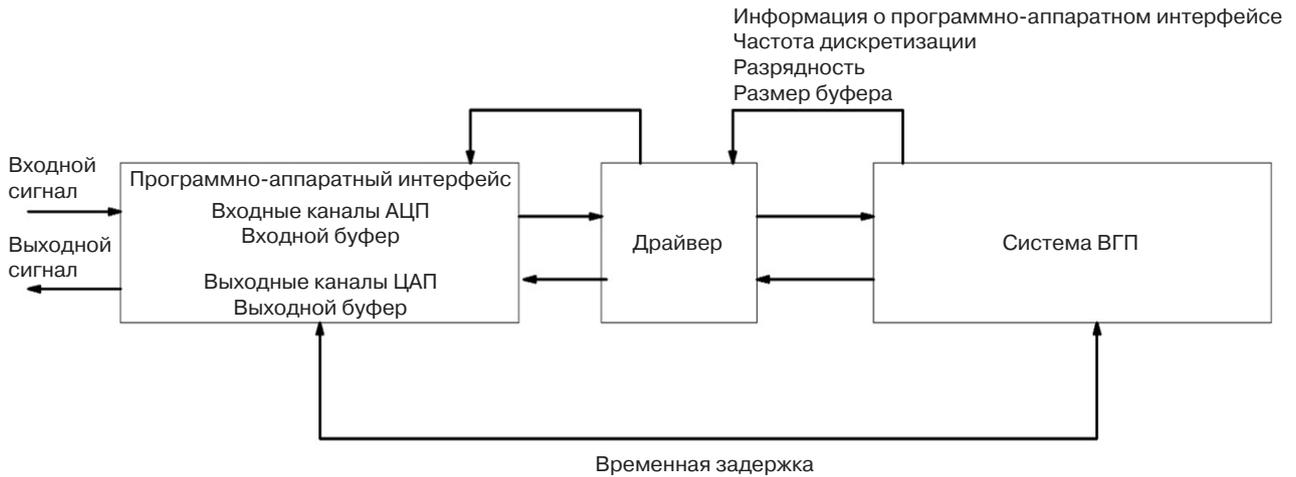


Рис. 1. Функциональная схема реализации метода киберфизической SPICE-эмуляции. Система ВГП – система визуального графического проектирования

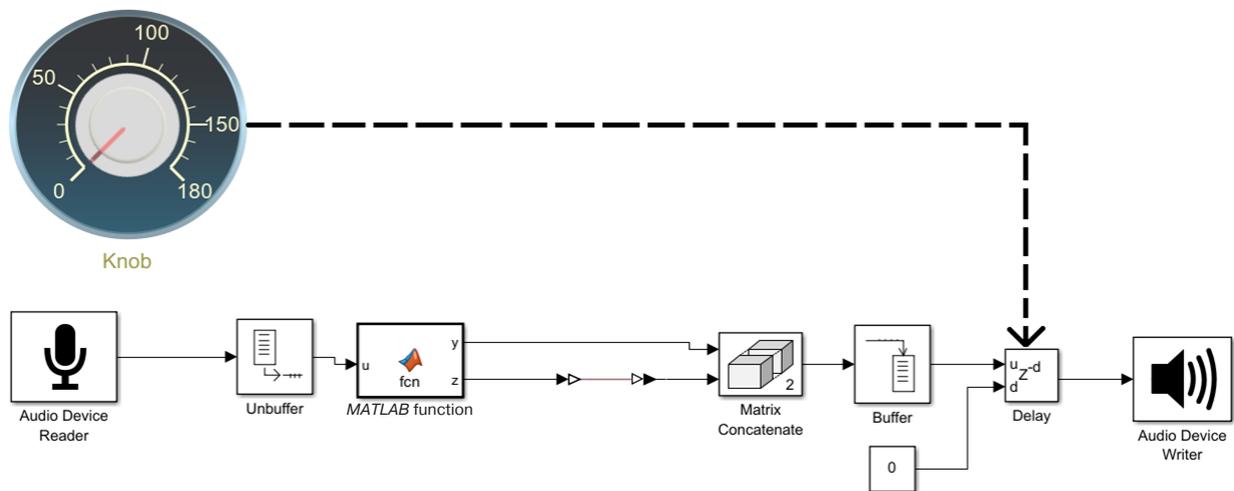


Рис. 2. Функциональная схема плагина киберфизической многоканальной эмуляции сигнальных аудиомодулей в среде ВГЭ Simulink

Для аудиотехники критической накопленной временной задержкой является задержка выше 20 мс, меньшую задержку трудно воспринять на слух. При анализе схем допустима задержка до 130 мс²⁰.

Для проведения исследования временных задержек при киберфизической эмуляции схемы разработан плагин киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей в среде ВГЭ Simulink. При использовании библиотеки Simscape для Simulink данный плагин позволяет разрабатывать и проводить отладку аудиомодулей в реальном времени, замещая реальный модуль его цифровым SPICE-двойником. Этот подход также применен для исследования характеристик, перечисленных во введении, а именно частоты дискретизации,

размера буфера²¹ [3, 4]. Функциональная схема плагина представлена на рис. 2.

Плагин включает следующие функциональные блоки:

1. «Audio Device Reader» – блок инициализации входных каналов программно-аппаратного интерфейса с определенным протоколом;
2. «Unbuffer» – блок, необходимый для преобразования получаемых кадров с программно-аппаратного интерфейса в линейную последовательность семплов;

²⁰ Что такое задержка при записи звука? <https://taplic.com/audio-tips/latency-in-audio/>. Дата обращения 20.02.2025. [What is the latency in audio recording? <https://taplic.com/audio-tips/latency-in-audio/>. Accessed February 20, 2025.]

²¹ Левченко Н.Р., Костин М.С., Филатов С.В., Печенкин С.М. Программа коммутирования аудиointерфейса с SPICE-технологией: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024685518 РФ. Заявка № 2024684363; заявл. 18.10.2024; опубл. 30.10.2024. Бюл. № 11. [Levchenko N.R., Kostin M.S., Filatov S.V., Pechenkin S.M. *Audio Interface Switching Program with SPICE Technology*: Certificate of State Registration of Computer Program 2024685518 RF. Publ. 30.10.2024 (in Russ.)]

3. «MATLAB function» – блок-функция, необходимая для разделения каналов программно-аппаратного интерфейса;
4. «Matrix Concatenate» – блок, необходимый для формирования матрицы формата $M \times N$, где M – количество семплов, N – количество задействованных каналов;
5. «Buffer» – блок, необходимый для преобразования полученной матрицы в кадры для последующей отправки в программно-аппаратный интерфейс;
6. «Delay» – блок, необходимый для компенсации фазового сдвига перед отправкой на выходные каналы программно-аппаратного интерфейса;
7. «Audio Device Writer» – блок, необходимый для записи полученных кадров в выходные каналы программно-аппаратного интерфейса;
8. «Кноп» – цифровой потенциометр для корректировки фазового сдвига блоком «Delay».

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК В СХЕМАХ АУДИОМОДУЛЕЙ С КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ SPICE-ЭМУЛЯЦИЕЙ

В рамках проведенного исследования оценено при приеме-передаче сигнала влияние на временные задержки таких параметров программно-аппаратного интерфейса как частота дискретизации, разрядность, размер буфера и протокол передачи аудиоданных. Исследования проведены для двух платформ ВГЭ: *Simulink* – при помощи специального плагина киберфизической SPICE-эмуляции сигнальных аудиомодулей и *LiveSPICE*. В качестве программно-аппаратного интерфейса использовался аудиоинтерфейс UMC1820 (Behringer, Германия) с возможностью выбора следующих настроек: размер буфера – 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 и 2048 семплов; частота дискретизации – 44.1, 48, 88.2 и 96 кГц; протоколы передачи данных – ASIO, WASAPI²² и DirectSound [5–7].

На рис. 3 представлена схема киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей.

В табл. 1 представлены результаты измерений временных задержек $\tau_{\text{зад}}$, полученные с помощью схемы киберфизической эмуляции при изменении частоты дискретизации $F_{\text{д}}$ с фиксированным размером буфера $N = 2048$ для одноканальной схемы прямой трансляции со входа на выход аудиоинтерфейса.

²² Windows Audio Session API, «ввод-вывод потоковых аудиоданных» – протокол передачи данных с малой задержкой, предоставляющий приложениям унифицированный интерфейс к аппаратным ресурсам, разработанный компанией Microsoft. [Windows Audio Session API is a low-latency data transfer protocol providing applications with a unified interface to hardware resources, developed by Microsoft.]



Рис. 3. Схема киберфизической эмуляции, используемая для исследования временных задержек:

- 1 – осциллограф RTB2002 (Rohde & Schwarz, Германия),
2 – аудиоинтерфейс UMC1820, 3 – персональный компьютер, 4 – генератор сигнала HMF2550 (Rohde & Schwarz, Германия)

Таблица 1. Результаты измерений временных задержек при изменении частоты дискретизации с фиксированным размером буфера

Среда ВГЭ, протокол «ввода-вывода» данных							
<i>LiveSPICE</i> , ASIO		<i>Simulink</i> , ASIO		<i>Simulink</i> , DirectSound		<i>Simulink</i> , WASAPI	
$F_{\text{д}}$, кГц	$\tau_{\text{зад}}$, мс	$F_{\text{д}}$, кГц	$\tau_{\text{зад}}$, мс	$F_{\text{д}}$, кГц	$\tau_{\text{зад}}$, мс	$F_{\text{д}}$, кГц	$\tau_{\text{зад}}$, мс
44.1	81.8	44.1	128	44.1	174	44.1	135
48	78.6	48	121	48	162	48	130
88.2	71	88.2	104	88.2	110	88.2	108
96	70	96	98.8	96	108	96	100

Результаты исследований для среды ВГЭ *LiveSPICE* с протоколами DirectSound и WASAPI не представлены, поскольку среда ВГЭ *LiveSPICE* системно настроена исключительно на работу с протоколом ASIO.

В табл. 2 представлены результаты измерений временных задержек при изменении размера буфера N с фиксированной частотой дискретизации $F_{\text{д}} = 44.1$ кГц для одноканальной схемы прямой трансляции со входа на выход аудиоинтерфейса и протоколов ASIO, DirectSound и WASAPI.

Как видно из табл. 1 и 2, при изменении размера буфера программно-аппаратного интерфейса для схемы прямой трансляции сигнала и протокола DirectSound передачи аудиосигнала временные задержки увеличиваются. Так, максимальные временные задержки (174 мс) показала схема прямого прохождения сигнала для среды *Simulink* с плагином киберфизической эмуляции и протоколом приема-передачи DirectSound. Минимальные задержки (5 мс) продемонстрировала схема прямой трансляции сигнала для среды *LiveSPICE*. При повышении частоты дискретизации наблюдается уменьшение временных задержек, обусловленное переполнением буфера [8–10].

Таблица 2. Результаты измерений временных задержек при изменении размера буфера с фиксированной частотой дискретизации

Среда ВГЭ, протокол «ввода-вывода» данных							
LiveSPICE, ASIO		Simulink, ASIO		Simulink, DirectSound		Simulink, WASAPI	
N	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	N	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	N	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	N	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$
8	5	8	81.8	8	–	8	90
16	5	16	82.4	16	–	16	92
32	6	32	82.4	32	–	32	92
64	6.6	64	82.4	64	–	64	92
128	8.6	128	85.4	128	–	128	95
256	13.8	256	88.4	256	103	256	99
512	23.2	512	93.8	512	109	512	100
1024	42.8	1024	105.8	1024	111	1024	107
2048	82	2048	129	2048	164	2048	135

Для измерения временных задержек с применением цифрового SPICE-двойника в системах ВГЭ использована типовая схема усилителя низкой частоты (УНЧ). На рис. 4 и 5 представлены электрические принципиальные схемы УНЧ, построенные на платформах ВГЭ *Simulink* с помощью библиотеки *Simscape* и *LiveSPICE*. Выбор типовой схемы УНЧ для тестирования и коррекции характеристик временных задержек аналоговых схем с киберфизической

SPICE-эмуляцией обоснован типовыми схемными решениями микшерных аудиоконсолей (активных эквалайзерных линеек, преампов, сумматоров, панорамных делителей и т.д.), построенными на базе операционных усилителей (ОУ) [11–13].

В табл. 3 представлены результаты измерения временных задержек с применением цифрового двойника аудиомодуля УНЧ при изменении частоты дискретизации F_d с фиксированным размером буфера $N = 2048$.

Таблица 3. Результаты измерений временных задержек с применением цифрового двойника аудиомодуля УНЧ при изменении частоты дискретизации с фиксированным размером буфера

Среда ВГЭ, протокол «ввода-вывода» данных							
LiveSPICE, ASIO		Simulink, ASIO		Simulink, DirectSound		Simulink, WASAPI	
$F_d, \text{кГц}$	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	$F_d, \text{кГц}$	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	$F_d, \text{кГц}$	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	$F_d, \text{кГц}$	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$
44.1	100	44.1	194	44.1	398	44.1	220
48	96	48	182	48	384	48	205
88.2	95	88.2	146	88.2	362	88.2	182
96	95	96	137	96	351	96	157

В табл. 4 представлены результаты измерения временных задержек с применением цифрового двойника аудиомодуля УНЧ при изменении размера буфера N с фиксированной частоте дискретизации $F_d = 44.1 \text{ кГц}$.

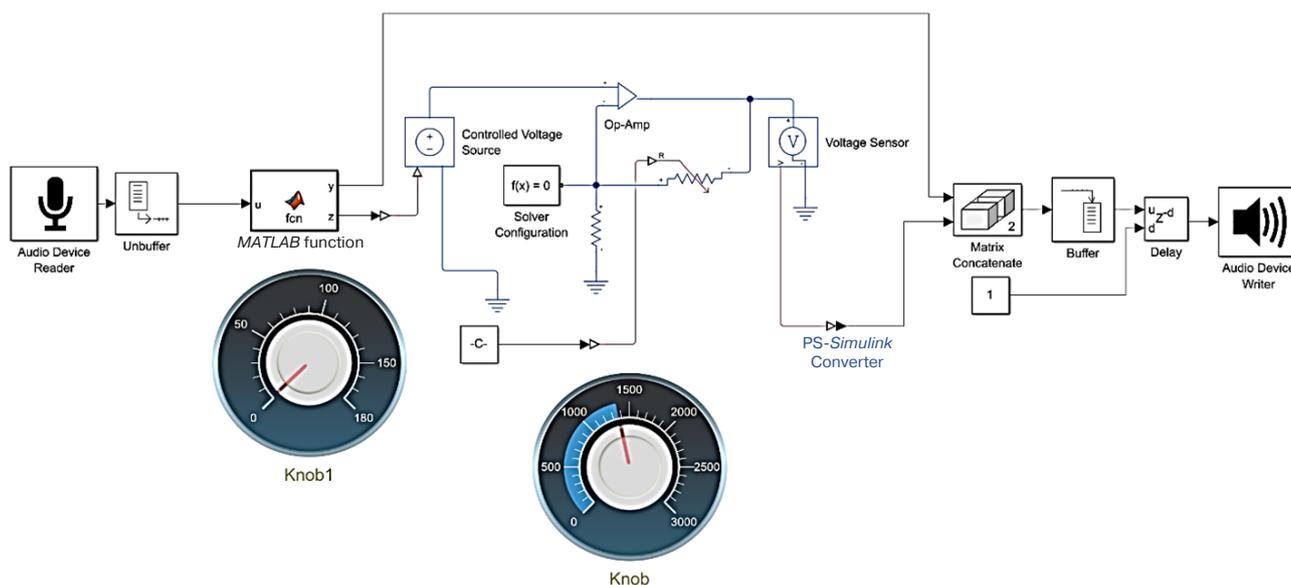


Рис. 4. Схема УНЧ в среде ВГЭ *Simulink* для исследования временных задержек

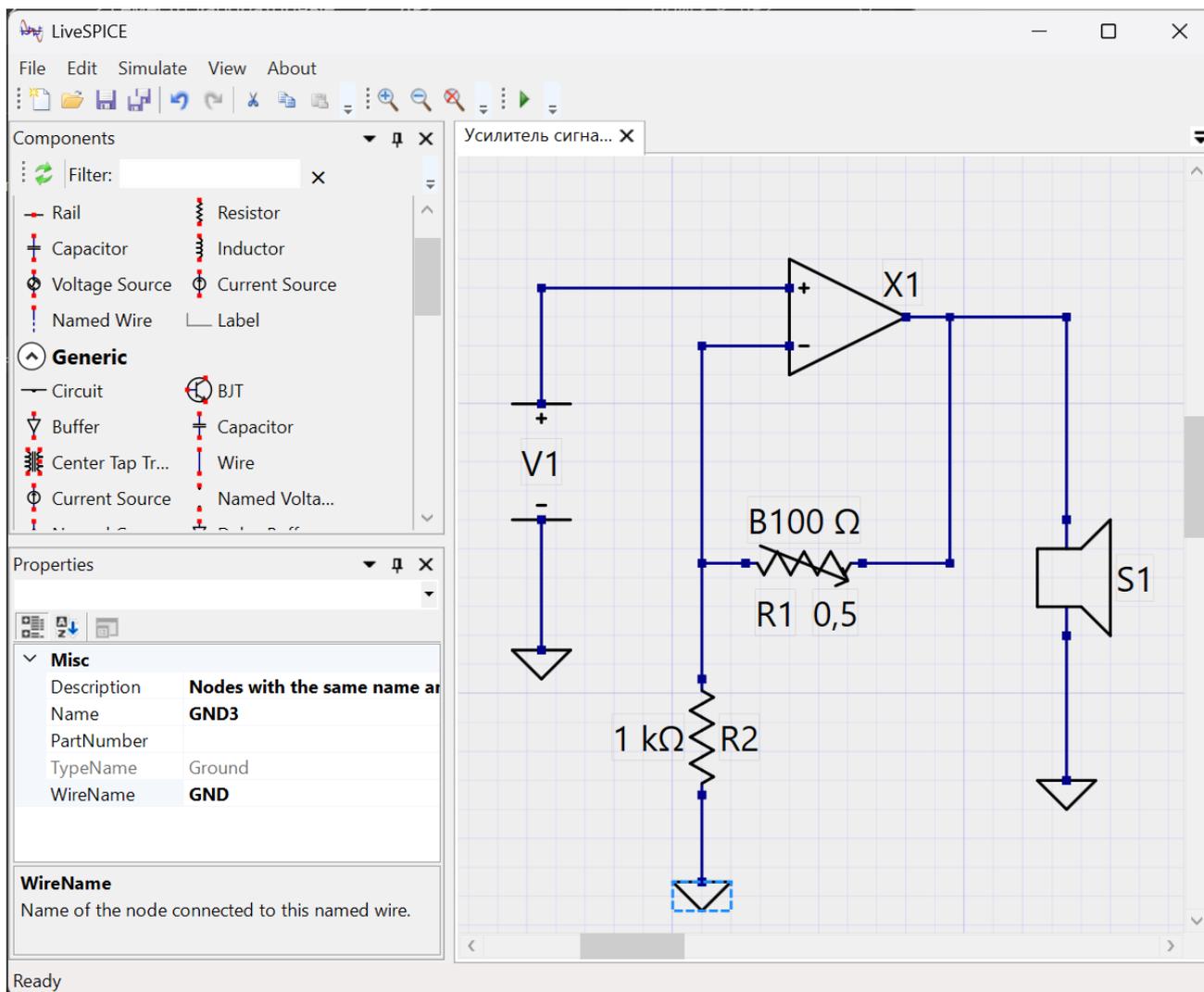


Рис. 5. Схема модели УНЧ в среде ВГЭ LiveSPICE для исследования временных задержек. Обозначения элементов схемы соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-811²³

Таблица 4. Результаты измерений временных задержек с применением цифрового двойника аудиомодуля УНЧ при изменении размера буфера с фиксированной частотой дискретизации

Среда ВГЭ, протокол «ввода-вывода» данных							
LiveSPICE, ASIO		Simulink, ASIO		Simulink, DirectSound		Simulink, WASAPI	
N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс
8	7	8	100	8	–	8	110
16	7.2	16	100.4	16	–	16	110.2
32	7.4	32	101.2	32	–	32	111.5
64	8	64	102.8	64	–	64	113.3
128	11.6	128	105.2	128	–	128	116.5

Среда ВГЭ, протокол «ввода-вывода» данных							
LiveSPICE, ASIO		Simulink, ASIO		Simulink, DirectSound		Simulink, WASAPI	
N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс
256	17.8	256	111.2	256	262	256	118.6
512	29.4	512	124	512	297	512	130
1024	53.2	1024	147	1024	310	1024	150
2048	100	2048	194	2048	398	2048	210

²³ ГОСТ 2.710-81. Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Interstate Standard. Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams. Moscow: Izd. Standartov; 1985 (in Russ..)]

Path	Time Plot (Dark Band = Self Time)	Total Time (s)	Self Time (s)	Number of Calls
> ...ulate(disserOPAMP)		1.130	0.000	1

Рис. 6. Окно работы встроенного инструмента *Simulink Profiler* с плагином киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей

По сравнению с результатами измерений для схемы с прямым прохождением – без SPICE-схемы УНЧ, временные задержки увеличились в 2 раза. Связано это с введением дополнительных задержек на обработку SPICE-схемы программным блоком – средой ВГЭ [10, 14, 15]. Система ВГЭ *LiveSPICE* показала наименьшую временную задержку, благодаря встроенному алгоритму просчета дифференциальных уравнений SPICE-модели единойжды. Безусловно, встроенный алгоритм упрощает интегро-дифференциальные расчеты для SPICE-схемы, однако является не гибким и не позволяет использовать готовые SPICE-библиотеки ЭКБ, поставляемые компаниями-производителями по сравнению с библиотекой *Simscape*. В этом случае формула (2) для аппаратных задержек примет следующий вид:

$$T_{\text{инт}} = T_{\text{ЦАП}} + T_{\text{АЦП}} + T_{\text{буф}} + T_{\text{разр}} + T_{\text{чд}} - T_{\text{СВГЭ}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{СВГЭ}}$ – временная задержка, вносимая программным блоком среды ВГЭ.

Так как в среде ВГЭ *LiveSPICE* отсутствуют внутренние инструменты по измерению времени, затрачиваемого самой платформой ВГЭ на эмуляцию, дальнейшие исследования проводились в среде ВГЭ *Simulink* со специально разработанным плагином киберфизической эмуляции под работу с библиотекой *Simscape*. Протокол ASIO показал наименьшие временные задержки, поэтому дальнейшие исследования проводились только с ним, как наиболее распространенным в аудиотехнике [16–18].

3. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК, ВНОСИМЫХ ПРОГРАММНЫМ БЛОКОМ SPICE-ЭМУЛЯЦИИ В СРЕДЕ SIMULINK

Для измерения временных задержек, вносимых программным блоком SPICE-эмуляции в среде ВГЭ, используется встроенный инструмент *Simulink Profiler*²⁴. Данный инструмент запускает моделирование и создает отчет, на основе которого

²⁴ Техническая документация *Simulink Profiler*. <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/simulinkprofiler.html>. Дата обращения 20.02.2025. [Technical documentation of *Simulink Profiler*. <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/simulinkprofiler.html>. Accessed February 20, 2025.]

проводился анализ временных задержек, вносимых программным блоком ВГЭ, на базе которого построена схема аудиомодуля. Окно данного инструмента представлено на рис. 6.

Оценить временные задержки, вносимые программным блоком SPICE-эмуляции, возможно через полученные параметры следующим образом:

$$T_{\text{СВГЭ}} = \frac{\text{Self Time}}{\text{Number of calls}}, \quad (4)$$

где Self Time – время работы *Simulink*-модели с учетом формирования отчета *Simulink Profiler*, Number of Calls – количество вызовов модели за время Self Time [19, 20].

Результаты оценки временных задержек, вносимых программной SPICE-эмуляцией *Simulink* представлены в табл. 5 – для схемы прямой трансляции сигнала и в табл. 6 – для схемы УНЧ на ОУ.

Таблица 5. Результаты оценки временных задержек, вносимых программной SPICE-эмуляцией *Simulink*, для схемы прямой трансляции сигнала

Время работы <i>Simulink Profiler</i> , с	Время SPICE-эмуляции ВГЭ, мкс	Время SPICE-эмуляции ВГЭ с симуляцией электрической принципиальной схемы, мкс
1	1.2	1.8
2	1.2	1.8
3	1.2	1.8
4	1.2	1.8
5	1.3	1.95

По результатам, представленным в табл. 5, видно, что с учетом киберфизической SPICE-эмуляции сигнального аудиомодуля временные задержки, вносимые программным блоком эмуляции, увеличились в 1.5 раза.

Результаты исследований быстродействия не представлены, поскольку среда ВГЭ *Simulink* не имеет встроенных тестов для измерения числа затрачиваемых тактов центрального процессора. Используемый центральный процессор в работе – 64-разрядный Intel®Core™ i5-10500T (Intel, США) с тактовой частотой 2.3 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод киберфизической SPICE-эмуляции аналоговых аудиоустройств. Предложена «интерфейс-схема» на базе программно-аппаратного аудиоинтерфейса UMC1820. Исследован характер формирования временных задержек, вносимых программно-аппаратным интерфейсом аппаратно и программно системой ВГЭ. Исследование показало, что наименьшие временные задержки (7 мс) продемонстрировала система ВГЭ *LiveSPICE*. Это связано с применением встроенного алгоритма просчета дифференциальных уравнений SPICE-модели единойжды. Но данный алгоритм не является гибким и не позволяет использовать разработанные SPICE-библиотеки.

Система ВГЭ *Simulink* с разработанным плагином киберфизической эмуляцией схем, напротив, позволяет внедрять кодовое описание готовых моделей ЭКБ ценой повышенных временных задержек (более 100 мс). Проведена расчетная оценка временных задержек, вносимых системой ВГЭ, с помощью инструмента *Simulink Profiler*.

Рекомендация: перед применением метода киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей

необходимо проводить калибровку программно-аппаратного интерфейса аппаратно с помощью аналоговых потенциометров, встроенных в АЦП, и программно в системе ВГЭ – с помощью блока «Delay» для корректировки временных задержек. Так, в качестве обоснованно выбранных настроек при практической реализации метода киберфизической эмуляции SPICE-моделей являются частота дискретизации 44.1 кГц, размер буфера от 512 до 1024 семплов и протокол «ввода-вывода» данных ASIO.

Вклад авторов

Н.Р. Левченко – разработка плагина для киберфизической эмуляции, проведение эксперимента, обработка полученных результатов.

М.С. Костин – идея киберфизического исследования сигнальных аудиомодулей, консультация по вопросам проведения и обработки результатов эксперимента.

Authors' contributions

N.R. Levchenko developed a plugin for cyber-physical simulation, conducted experiments, and processed findings.

M.S. Kostin suggested a cyber-physical approach to analyzing audio signal modules, offering guidance on conducting and interpreting experimental findings.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Çilingiroğlu Uğur. *Analog Integrated Circuit Design by Simulation: Techniques, Tools, and Methods*. 1st ed. New York: McGraw-Hill; 2019. 576 p.
2. Anumba C.J., Akanmu A., Yuan X., Kan C. Cyber—physical systems development for construction applications. *Front. Eng. Manag.* 2021;8(1):72–87. <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0130-4>
3. Левченко Н.Р., Костин М.С. Стенд киберфизического прототипирования сигнальных аудиомодулей. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2024»): Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2024. С. 507–511.
4. Левченко Н.Р. Плагин для киберфизического прототипирования сигнальных аудиомодулей. В сб.: *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: Сборник трудов III Национальной научно-практической конференции*. Москва. 2024. С. 344–350. <https://elibrary.ru/omggfz>
5. Левченко Н.Р. Программные интерфейсы передачи аудиоданных для киберфизического SPICE-сигнального прототипирования аудиомодулей. В сб.: *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: Сборник трудов Национальной научно-практической конференции*. Москва. 2023. С. 394–398. <https://elibrary.ru/pbtjgd>
6. Левченко Н.Р., Костин М.С. Киберфизическое прототипирование сигнальных аудиомодулей. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2023»): Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2023. С. 347–350. <https://www.elibrary.ru/oykued>
7. Cordell B. *Designing Audio Power Amplifiers*. Routledge; 2019. 792 p.
8. Петленко Д.Б., Ярлыков А.Д., Бойков К.А. *Аналого-цифровые преобразователи сигнальных аудиоинтерфейсов*. М.: Реглет; 2023. 65 с.
9. Self D. *Small Signal Audio Design*: 4th ed. Focal Press; 2023. 846 p. <https://doi.org/10.4324/9781003332985>
10. Bennett C.L. *Digital Audio Theory: A Practical Guide*: 1st ed. Focal Press; 2020. 254 p. <https://doi.org/10.4324/9780429297144>
11. Steiglitz K. *A Digital Signal Processing Primer: with Applications to Digital Audio and Computer Music*. New York, USA: Dover Publications Inc.; 2020. 320 p.
12. Петленко Д.Б., Ярлыков А.Д., Бойков К.А. *Цифровые методы секвенсорной эквализации аудиосигналов радиоакустических систем*. М.: Реглет; 2023. 109 с.
13. Collins K. *Studying Sound: A Theory and Practice of Sound Design*. London, England: The MIT Press; 2020. 248 p.

14. Kamenov A. *Digital Signal Processing for Audio Applications*: 2nd ed. RecordingBlogs; 2014. 348 p.
15. Cipriani A., Giri M. *Electronic Music and Sound Design: Theory and Practice with Max 8. V. 2*. 3rd ed. ConTempoNet; 2020. 748 p.
16. Ковалгин Ю.А., Вахитов Ш.Я. *Акустика*. М.: Горячая линия – Телеком; 2022. 660 с.
17. Pirkle W.C. *Designing Audio Effect Plugins in C++: for AAX, AU, and VST3 with DSP Theory*: 2nd ed. New York, USA: Routledge; 2019. 704 p.
18. Геворский А.В., Костин М.С., Бойков К.А. Программно-архитектурная конфигурация многофункционального ADSP-модуля сигнального медиатестирования аудиоустройств. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):30–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-30-58>
19. Oney W. *Programming the Microsoft® Windows® Driver Model*: 2nd ed. Microsoft Press; 2002. 880 p.
20. Yosifovich P. *Windows Kernel Programming*. Independently published; 2021. 461 p.

REFERENCES

1. Çilingiroğlu Uğur. *Analog Integrated Circuit Design by Simulation: Techniques, Tools, and Methods*. 1st ed. New York: McGraw-Hill Education. 2019. 576 p.
2. Anumba C.J., Akanmu A., Yuan X., Kan C. Cyber-physical systems development for construction applications. *Front. Eng. Manag.* 2021;8(1):72–87. <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0130-4>
3. Levchenko N.R., Kostin M.S. Stand for cyberphysical prototyping of signal audio modules. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems (RADIOINFOCOM-2024): Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2024. P. 507–511 (in Russ.).
4. Levchenko N.R. Plugin for cyberphysical prototyping of signal audio modules. In: *Fundamental, Exploratory, Applied Research and Innovative Projects: Proceedings of the 3rd National Scientific and Practical Conference*. Moscow. 2024. P. 344–350 (in Russ.). <https://elibrary.ru/omggfz>
5. Levchenko N.R. Software interfaces for audio data transmission for cyber-physical SPICE-signal prototyping of audio modules. In: *Fundamental, Exploratory, Applied Research and Innovative Projects: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference*. Moscow. 2023. P. 394–398 (in Russ.). <https://elibrary.ru/pbtjgd>
6. Levchenko N.R., Kostin M.S. Cyberphysical prototyping of signal audio modules. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems (RADIOINFOCOM-2023): Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2023. P. 347–350 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/oykued>
7. Cordell B. *Designing Audio Power Amplifiers*. Routledge; 2019. 792 p.
8. Petlenko D.B., Yarlykov A.D., Boikov K.A. *Anologo-tsifrovyye preobrazovateli signal'nykh audiointerfeisov (Analog-to-Digital Converters of Signal Audio Interfaces)*. Moscow: Reglet; 2023. 65 p. (in Russ.).
9. Self D. *Small Signal Audio Design*: 4th ed. Focal Press; 2023. 846 p. <https://doi.org/10.4324/9781003332985>
10. Bennett C.L. *Digital Audio Theory: A Practical Guide*: 1st ed. Focal Press; 2020. 254 p. <https://doi.org/10.4324/9780429297144>
11. Steiglitz K. *A Digital Signal Processing Primer: with Applications to Digital Audio and Computer Music*. New York, USA: Dover Publications Inc.; 2020. 320 p.
12. Petlenko D.B., Yarlykov A.D., Boikov K.A. *Tsifrovyye metody sekvensornoi ekvalizatsii audiosignalov radioakusticheskikh system (Digital Methods of Sequencer Equalization of Audio Signals of Radioacoustic Systems)*. Moscow: Reglet; 2023. 109 p. (in Russ.).
13. Collins K. *Studying Sound: A Theory and Practice of Sound Design*. London, England: The MIT Press; 2020. 248 p.
14. Kamenov A. *Digital Signal Processing for Audio Applications*: 2nd ed. RecordingBlogs; 2014. 348 p.
15. Cipriani A., Giri M. *Electronic Music and Sound Design: Theory and Practice with Max 8. V. 2*. 3rd ed. ConTempoNet; 2020. 748 p.
16. Kovalgin Yu.A., Vakhitov Sh.Ya. *Акустика (Acoustics)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2022. 660 p. (in Russ.).
17. Pirkle W.C. *Designing Audio Effect Plugins in C++: for AAX, AU, and VST3 with DSP Theory*: 2nd ed. New York, USA: Routledge; 2019. 704 p.
18. Gevorsky A.V., Kostin M.S., Boikov K.A. Software-architectural configuration of the multifunctional audio digital signal processor module for signal mediatesting of audio devices. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):30–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-30-58>
19. Oney W. *Programming the Microsoft® Windows® Driver Model*: 2nd ed. Microsoft Press; 2002. 880 p.
20. Yosifovich P. *Windows Kernel Programming*. Independently published; 2021. 461 p.

Об авторах

Левченко Никита Романович, ассистент, кафедра радиоволновых процессов и технологий, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: Levchenko_n@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 5126-8830, <https://orcid.org/0009-0002-1749-1451>

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой радиоволновых процессов и технологий, заместитель директора Института радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, SPIN-код РИНЦ 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

About the Authors

Nikita R. Levchenko, Assistant, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: Levchenko_n@mirea.ru. RSCI SPIN-code 5126-8830, <https://orcid.org/0009-0002-1749-1451>

Mihail S. Kostin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Deputy Director, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, RSCI SPIN-code 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>