

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ SPICE-ЭМУЛЯЦИИ И ОТЛАДКИ СИГНАЛЬНЫХ АУДИОМОДУЛЕЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-8-27-34

Левченко Никита Романович,МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Россия, levchenko_n@mirea.ru**Костин Михаил Сергеевич,**МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Россия, kostin_m@mirea.ru**Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы,**МИРЭА – Российский технологический университет;
Федеральный исследовательский центр Институт
общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Москва, Россия, ngus@mail.ru

Manuscript received 30 April 2026;

Accepted 12 July 2026

Ключевые слова: киберфизическая SPICE-эмуляция, интерфейс-плагин, системные перенастройки, аудиомодуль, аудиointерфейс, динамический диапазон, нелинейные искажения, отношение сигнал-шум, частота дискретизации, размер буфера, протокол ASIO, разрядность квантования

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения достоверности киберфизической эмуляции и гибкой отладки аналоговых аудиоустройств, функционирующих в режиме реального времени. Цель исследования - анализ программно-аппаратных ресурсов (системных преднастроек) вычислительной среды и параметров аудиointерфейса на характеристики киберфизической SPICE-эмуляции сигнальных аудиомодулей. Исследование предложенного в работе метода киберфизической SPICE-эмуляции и режимов достижения наилучших параметров его функционирования при минимальных задержках показано на примере типовых схем аудиомодулей: трехполосного эквалайзера и микрофонного предусилителя. Проведен параметрический анализ влияния настроек программного блока (частоты дискретизации, размера буфера, протокола ввода-вывода и разрядности квантования) и характеристик аппаратной платформы киберфизической SPICE-эмуляции на результирующие параметры: динамический диапазон, отношение сигнал-шум, нелинейные искажения. Предложенный режим киберфизической SPICE-эмуляции, реализованный на базе специально разработанного интерфейс-плагина в среде Simulink, может быть рекомендован для отладки сигнальных аудиомодулей. В результате исследования показано, что при выборе частоты дискретизации не ниже 44,1 кГц, протокола ASIO, обеспечивающего задержку на входе и выходе аудиointерфейса не более 100 мс, размера буфера не менее 512 отсчетов, разрядности квантования - не менее 16 бит в киберфизических аудиотрактах возможно достижение динамического диапазона свыше 83 дБ, коэффициента гармонических искажений менее 0,003% и отношения сигнала-шума не менее 73 дБ.

Информация об авторах:

Левченко Никита Романович, ассистент, кафедра радиоволновых процессов и технологий, Институт радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия. ORCID 0009-0002-1749-1451

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиоволновых процессов и технологий, Институт радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия. ORCID 0000-0002-5232-5478

Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы, д.м.-ф.н., профессор, заведующий базовой кафедрой № 343 – моделирования радиофизических процессов, Институт радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет; Федеральный исследовательский центр Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия. ORCID 0000-0001-8000-1107

Для цитирования:

Левченко Н.Р., Костин М.С., Гусейн-заде Н.Г. Функциональные режимы киберфизической SPICE-эмуляции и отладки сигнальных аудиомодулей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №8. С. 27-34.

For citation:

N.R. Levchenko, M.S. Kostin, N.G. Gusein-zade, "Functional Modes of Cyber-Physical SPICE Emulation and Debugging of Signal Audio Modules", T-Comm, 2026, vol. 20, no.8, pp. 27-34. (in Russian)

Введение

Киберфизическая SPICE-эмуляция сигнальных аудиомодулей представляет собой перспективное направление развития методов аналогового проектирования и тестирования радиоэлектронных устройств, позволяющее объединить достоинства математического моделирования с возможностью аппаратной обработки реальных аудиосигналов в режиме, приближенном к реальному времени. Так, известные производители электронной компонентной базы, как Texas Instruments, Linear Technology, STMicroelectronics, Analog Devices и др. предоставляют разработчикам аналоговых устройств библиотеки SPICE-моделей радиокомпонентов, верифицированные воспроизводимостью не менее 0,97% по отношению к их оригиналу [1].

В отличие от компьютерного SPICE-моделирования, ограниченного получением собственно виртуально-численных результатов, параметров и характеристик радиоэлектронных цепей без какой-либо возможности их трансляции к внешним физическим устройствам, метод киберфизической SPICE-эмуляции, направленный на создание программно-аппаратных двойников сигнальных аудиомодулей при помощи интерфейс-плагины, реализуемого в среде визуально-графической эмуляции (ВГЭ), и аппаратного интерфейса, накладывает дополнительные требования к производительности вычислительной системы и программной среды ВГЭ, аппаратных решений и протоколов передачи аудиосигналов [1,2,3].

Таким образом, для сигнальных аудиотехнических решений реализация гибкой аналоговой отладки в режиме реального времени становится такой же возможной, как в случае с цифровыми цепями и HDL-алгоритмами, реализуемыми на программируемых логических интегральных схемах. При этом предложенный киберфизический режим отладки аналоговых аудиомодулей позволяет использовать библиотеки SPICE-моделей верифицированных радиокомпонентов, производить быстрый интегро-дифференциальный расчет, гибкую параметризацию цепей и осуществлять многоканальную трансляцию сигналов аналоговых схем через физические аудиоинтерфейсы, что не представляется возможным при работе с архитектурами, построенными на базе программируемых аналоговых интегральных схем.

Практическая реализация киберфизической эмуляции сопряжена с рядом ограничений, обусловленных как аппаратными характеристиками – производительность центрального процессора, задержки аналого-цифровых (АЦП) и цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), так и программными настройками (частота дискретизации, размер буфера, протокол передачи данных) [4-8]. Указанные параметры программно-аппаратных двойников оказывают непосредственное влияние на результирующие характеристики аудиотракта: динамический диапазон, отношение сигнал-шум (ОСШ) и нелинейные искажения, что определяет актуальность настоящего исследования.

1 Характеристики киберфизического аудиотракта

Обратимся к аналитическому и библиотечному описанию анализируемых характеристик программно-аппаратных двойников сигнальных аудиомодулей, исследуемых в работе.

1.1 Частота дискретизации киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей

Для аудиоинтерфейсов, используемых при построении киберфизических аудиотрактов, используются следующие номинальные частоты дискретизации, установленные ISO 266: 44,1 кГц – стандарт CD-аудио; 48 кГц – стандарт для цифрового видео и некоторых профессиональных аудиозаписей; 96 и 192 кГц – стандарт для более точного воспроизведения звука и при сведении аудио.

Кроме того, важным параметром для исследования и работы с программно-аппаратными двойниками является разрядность квантования. Применяемые значения разрядности квантования в ЦАП/АЦП аудиоинтерфейсов следующие: 8 бит – предоставляет 256 возможных значений квантования; 16 бит – предоставляет 65,536 возможных уровней квантования; 24 бит – предоставляет 16 777 216 возможных уровней квантования; 32 бит – предоставляет 4 294 967 296 возможных уровней квантования [9,10].

1.2 Динамический диапазон киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей

Для оценки реального динамического диапазона, формируемого цепями стэнда и цифрового двойника аудиомодуля, учитывается влияние паразитных и гармонических составляющих спектра, используется параметр SFDR – динамический диапазон без паразитных составляющих. Динамический диапазон определяется отношением мощности полезного сигнала к мощности наибольшей паразитной составляющей спектра, которой может быть, как гармоника, обусловленная нелинейными искажениями, так и другие паразитные компоненты. Для измерения динамического диапазона использовалась система ВГЭ Simulink с библиотекой Audio ToolBox.

В системе ВГЭ Simulink SFDR рассчитывается с помощью встроенного инструмента Spectrum Analyzer по следующей формуле:

$$SFDR = 10 \log \left(\frac{P_{\text{СИГНАЛ}}}{P_{\text{НГ}}} \right), \quad (1)$$

где $P_{\text{сигнал}}$ – мощность сигнала на выходном канале аудиотракта, $P_{\text{нг}}$ – мощность наиболее нежелательной гармоники на выходном канале аудиотракта [9, 10].

1.3 Шумы, возникающие при киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей

Шумы в киберфизической эмуляции имеют двойственную природу – программную, заложенную SPICE-моделью радиокомпонентов, и аппаратную: шумы, обусловленные моделями компонентов (тепловые шумы резисторов, дробовые шумы полупроводниковых приборов); численные шумы, возникающие из-за конечной точности вычислений и дискретизации времени; аппаратные шумы радиодеталей в аудиоинтерфейсах.

Главный параметр, который показывает сравнение мощности аудиосигнала с уровнем шума в аудиотракте является ОСШ.

В системе ВГЭ Simulink ОСШ (или SNR) рассчитывается при помощи инструмента Spectrum Analyzer по следующей формуле:

$$SNR = \frac{P_{СИГНАЛ}}{P_{ШУМ}}, \quad (2)$$

где $P_{СИГНАЛ}$ – мощность полезного сигнала на выходном канале аудиотракта. $P_{ШУМ} = P_1 + P_2 + \dots + P_n$ – мощность шума на выходном канале аудиотракта.

Допустимым ОСШ при работе с киберфизическими моделями аудиомодулей является диапазон ≤ 75 дБ [9,10].

1.4 Нелинейные искажения, возникающие при киберфизической эмуляции

Коэффициент гармонических искажений (КГИ или THD) в системе ВГЭ Simulink считается по следующей формуле:

$$THD = \sqrt{\frac{P_2^2 + P_3^2 + \dots + P_n^2}{P_1^2}},$$

где P_1 – мощность основной гармоники, P_n – мощность побочной гармоники. Измерение КГИ производится с помощью Spectrum Analyzer системы ВГЭ Simulink.

Допустимым уровнем гармонических искажением для сигнальных аудиомодулей является $\leq 0,05 \dots 0,5\%$ [9,10].

2 Исследование киберфизической SPICE-эмуляции аналоговых аудиоустройств

При исследовании моделей киберфизической SPICE-эмуляции аудиоустройств [3] за основу взяты киберфизические модели (программно-аппаратные двойники) трёхполосного параметрического эквалайзера и микрофонного предусилителя (рис. 1 и 2). Реперные схемы являются типовыми решениями аудиомикшерных трактов и выбраны в качестве базовой основы для исследования предложенного в работе метода киберфизической SPICE-эмуляции и режимов достижения наилучших параметров его функционирования при минимальных задержках работы сигнальных аудиомодулей не более 100 мс.

Схема трёхполосного параметрического эквалайзера, построена на трёх полосовых фильтрах, после которых преобразованный сигнал суммируется операционным усилителем. Входной сигнал распределяется на три частотных канала: низких частот – 20...200 Гц, средних частот – 0,2...4 кГц и высоких частот – 4...20 кГц.

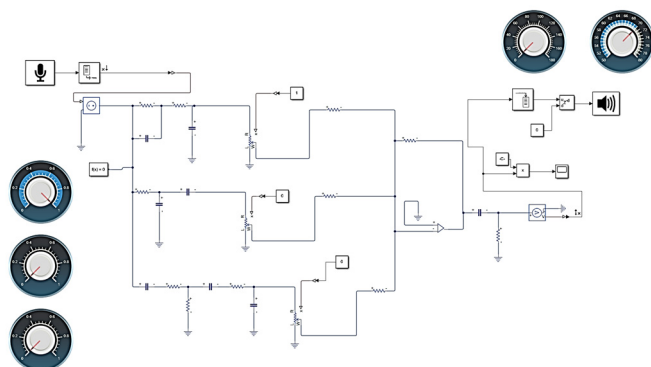


Рис. 1. Киберфизическая SPICE-модель трёхполосного параметрического эквалайзера в системе ВГЭ Simulink.

Схема микрофонного предусилителя построена на модели операционного усилителя с обвязкой резистора и потенциометра для регулирования коэффициента усиления в реальном времени.

Киберфизическая SPICE-модели типовых аудиоустройств разработаны с помощью библиотеки Simscape системы ВГЭ Simulink. Электрические принципиальные схемы с указанными номиналами радиокомпонентов представленных моделей аудиоустройств показаны на рисунках 3 и 4, соответственно.

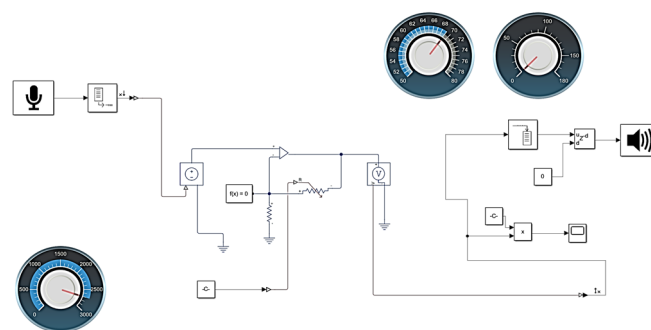


Рис. 2. Киберфизическая SPICE-модель микрофонного предусилителя в системе ВГЭ Simulink

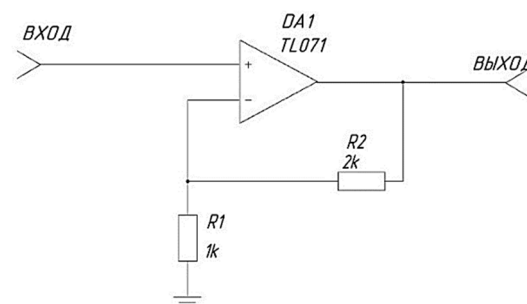


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема киберфизической модели микрофонного предусилителя

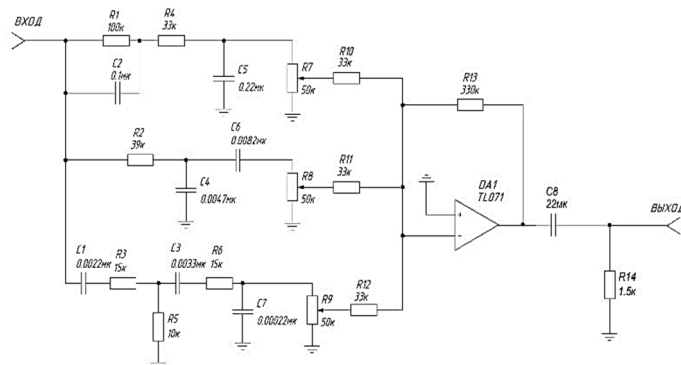


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема киберфизической модели трёхполосного параметрического эквалайзера, используемый для исследования

Экспериментальное исследование проводилось при помощи системы ВГЭ Simulink и стенда киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей (рис. 5). Параметры (частота дискретизации, размер буфера и разрядность квантования), влияющие на динамический диапазон, ОСШ и КГИ, для исследования изменялись в системе ВГЭ Simulink

Стенд киберфизической SPICE-эмуляции аудиомодулей состоит из следующих приборов: осциллограф RTB2002, многоканального аудиоинтерфейс UMC1820, персонального

компьютера и генератора сигнала HMF2550 [11-14]. Взаимодействие со стендом и компьютером реализовано с помощью системы ВГЭ Simulink через специально разработанный интерфейс-плагин киберфизической эмуляции с помощью блоков библиотеки Audio Toolbox [11-14].

Функциональная схема интерфейс-плагина, разработанного для исследования киберфизической SPICE-эмуляции аудиомодулей и действующего на базе проткала ASIO (Audio Stream Input/Output), показана на рисунке 6.

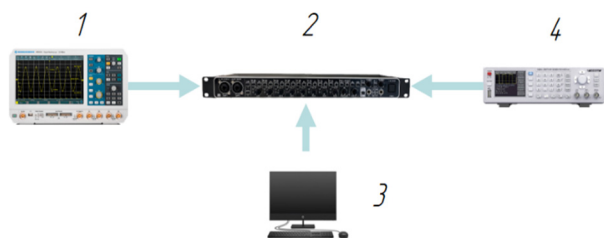


Рис. 5. Схема экспериментального стенда киберфизической SPICE-эмуляции сигнальных аудиомодулей: 1 – осциллограф RTB2002, 2 – аудиоинтерфейс UMC1820, 3 – персональный компьютер, 4 – генератор сигнала HMF2550

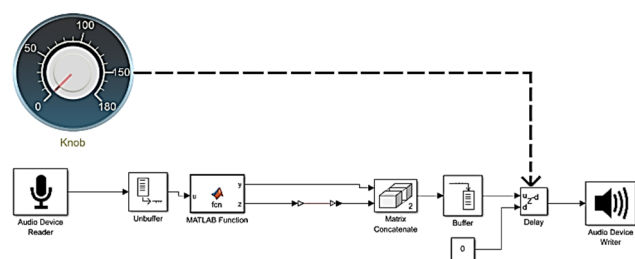


Рис. 6. Функциональная схема плагина киберфизической SPICE-эмуляции сигнальных аудиомодулей в среде ВГЭ Simulink

Интерфейс-плагин разработан с помощью штатных библиотек Simulink и состоит из следующих блоков: Audio Device Reader, Unbuffer, MATLAB function и Matrix Concatenate (для обеспечения многоканального взаимодействия с аудиоинтерфейсом), Buffer, Delay и Audio Device Writer [3]. При отладке интерфейс-плагина в работе использовался персональный компьютер со следующими характеристиками: частота процессора – 2,1 ГГц с возможностью разгона до 5,4 ГГц, количество ядер – 20 ядер; объем оперативного запоминающего устройства – 32 Гб.

Обратимся к стендовой методике экспериментального исследования влияния системных параметров (преднастроек) частоты дискретизации, размера буфера и разрядности квантования на динамический диапазон, ОСШ и КГИ программно-аппаратных двойников (рисунок 5).

Измерения проводились для трех случаев: прямая передача сигнала через интерфейс-плагин (режим 1); передача сигнала через схему параметрического эквалайзера, включенного в интерфейс-плагин (режим 2); передача сигнала через схему микрофонного предусилителя, включенного в интерфейс-плагин (режим 3). К аудиоинтерфейсу по USB подключен ПК с предустановленной системой ВГЭ Simulink и интерфейс-платином.

При проведении эксперимента к входному каналу аудиоинтерфейса через переходник BNC-RCA-JACK подключается

генератор сигнала HMF2550 со следующими настройками: частота референсного сигнала 1 кГц с амплитудой 0,8 В, выбранная в пределах линейной характеристики динамического диапазона преампов многоканального аудиоинтерфейса UMC1820. Сигнал выходного аппаратного канала аудиоинтерфейса регистрируется осциллографом RTB2002, а сигнал виртуального выходного канала – инструментом Spectrum Analyzer системы ВГЭ Simulink. При этом в режиме 1 при установленных референсных значениях входного сигнала на каждом канале осуществляется балансировка (согласование) импедансов и выравнивание референсных значений реальных и виртуальных входных/выходных динамических уровней сигналов.

Так, на рисунке 7 представлен спектр выходного сигнала, зарегистрированный с помощью виртуального инструмента Spectrum Analyzer системы ВГЭ Simulink. С помощью данного инструмента также получены значения ОСШ, динамического диапазона и КГИ, расчетно верифицированные данными измерений, полученными осциллографом RTB2002, с предельным отклонением 1,5%.

Изменение преднастроек параметров (частота дискретизации, размер буфера и разрядность квантования) производилось в системе ВГЭ Simulink в блоке Audio Device Reader в режиме реального времени.



Рис. 7. Спектр выходного канала цифрового двойника аудиомодуля трехполосного параметрического эквалайзера, зарегистрированный с помощью инструмента Spectrum Analyzer системы ВГЭ Simulink.

На основании предложенной методики исследований двух схем типовых устройств – параметрического эквалайзера и микрофонного предусилителя, получены результаты аппаратных измерений, интерпретируемые расчетными параметрами согласно формулам (1) и (2) – динамическим диапазоном, ОСШ, КГИ, сведенными в таблицы 1-9.

Так, в таблицах 1-3 представлены результаты измерений параметров системы (динамический диапазон, ОСШ и КГИ), влияющих на программно-аппаратные характеристики стенда киберфизической SPICE-эмуляции аналоговых аудиоустройств для случая, когда интерфейс-плагин работает в режиме прямой передачи сигнала с входа аудиоинтерфейса на его выход без каких-либо преобразований (режим 1). Это необходимо для оценки вносимого влияния, интерфейс-плагина на работу киберфизической системы, а также при ее калибровке.

Таблица 1

Результаты измерений программно-аппаратных параметров киберфизического аудиомодуля (режим 1) при изменении разрядности квантования с фиксированной частотой дискретизации и размером буфера

Разрядность квантования, бит	Динамический диапазон, дБ	Отношение сигнал/шум (SNR), дБ	Коэффициент гармонических искажений (THD), %
8	-	-	-
16	81	73	0,0027
24	82	74	0,0028

Таблица 2

Результаты измерений программно-аппаратных параметров киберфизического аудиомодуля (режим 1) при изменении частоты дискретизации с фиксированной разрядностью квантования и размером буфера

Частота дискретизации, кГц	Динамический диапазон, дБ	Отношение сигнал/шум (SNR), дБ	Коэффициент гармонических искажений (THD), %
44,1	79	73	0,003
48	81	74	0,0031
88,2	82	73	0,0033
96	81	74	0,0027

Таблица 3

Результаты измерений программно-аппаратных параметров киберфизического аудиомодуля (режим 1) при изменении размера буфера с фиксированной частотой и разрядностью квантования

Размер буфера	Динамический диапазон, дБ	Отношение сигнал/шум (SNR), дБ	Коэффициент гармонических искажений (THD), %
8	82,3	73	0,0032
16	81,1	74	0,0031
32	80,2	73	0,0027
64	79	74	0,0028
128	81	73	0,0026
256	80	74	0,0029
512	79	73	0,003
1024	81	74	0,0027
2048	80	73	0,0029

В таблицах 4-6 представлены результаты измерений параметров, влияющих на программно-аппаратные параметры при киберфизической эмуляции модели трехполосного параметрического эквалайзера (режим 2).

Таблица 4

Результаты измерений программно-аппаратных параметров киберфизического аудиомодуля (режим 2) при изменении разрядности квантования с фиксированной частотой дискретизации и размером буфера

Разрядность квантования, бит	Динамический диапазон, дБ	Отношение сигнал/шум (SNR), дБ	Коэффициент гармонических искажений (THD), %
8	-	-	-
16	79,4	73	0,0033
24	81	74	0,0034

Таблица 5

Результаты измерений программно-аппаратных параметров киберфизического аудиомодуля (режим 2) при изменении частоты дискретизации с фиксированной разрядностью квантования и размером буфера

Частота дискретизации, кГц	Динамический диапазон, дБ	Отношение сигнал/шум (SNR), дБ	Коэффициент гармонических искажений (THD), %
44,1	82	73	0,0026
48	81	74	0,0027
88,2	80,1	73	0,003
96	79,9	74	0,0033

Таблица 6

Результаты измерений программно-аппаратных параметров киберфизического аудиомодуля (режим 2) при изменении размера буфера с фиксированной частотой и разрядностью квантования

Размер буфера	Динамический диапазон, дБ	Отношение сигнал/шум (SNR), дБ	Коэффициент гармонических искажений (THD), %
8	79	73	0,0024
16	80	74	0,0031
32	81	73	0,0024
64	82,3	74	0,0021
128	80,2	73	0,0028
256	81,2	74	0,0032
512	80,1	73	0,0033
1024	80,2	74	0,003
2048	81,2	73	0,0032

В таблицах 7-9 представлены результаты измерений параметров, влияющих на программно-аппаратные параметры при киберфизической эмуляции модели микрофонного предусилителя (режим 3).

Таблица 7

Результаты измерений программно-аппаратных параметров киберфизического аудиомодуля (режим 3) при изменении разрядности квантования с фиксированной частотой дискретизации и размером буфера

Разрядность квантования, бит	Динамический диапазон, дБ	Отношение сигнал/шум (SNR), дБ	Коэффициент гармонических искажений (THD), %
8	-	-	-
16	79	73	0,0031
24	81	74	0,0036

Таблица 8

Результаты измерений программно-аппаратных параметров аудиомодуля (режим 3) при изменении частоты дискретизации с фиксированной разрядностью квантования и размером буфера

Частота дискретизации, кГц	Динамический диапазон, дБ	Отношение сигнал/шум (SNR), дБ	Коэффициент гармонических искажений (THD), %
44,1	83,2	73	0,0031
48	81,5	74	0,0032
88,2	80,8	73	0,0034
96	82,3	74	0,0035

Таблица 9

Результаты измерений программно-аппаратных параметров киберфизического аудиомодуля (режим 3) при изменении размера буфера с фиксированной частотой и разрядностью квантования

Размер буфера	Динамический диапазон, дБ	Отношение сигнал/шум (SNR), дБ	Коэффициент гармонических искажений (THD), %
8	84,2	73	0,0031
16	81,2	74	0,0032
32	83,2	73	0,0034
64	82,1	74	0,0036
128	81	73	0,0027
256	81,2	74	0,0029
512	79,1	73	0,0028
1024	80,3	74	0,0026
2048	79,1	73	0,0028

На основе интерпретируемых расчетных данных – динамическим диапазоном, ОСШ, КГИ, при варьировании системными параметрами (преднастройками), для трех режимов исследования экспериментально установлено следующее: при разрядности квантования 8 бит и/или частоте 44,1 кГц эмуляция киберфизического аудиомодуля не возможна ввиду отсутствия аппаратной поддержки АЦП/ЦАП аудиointерфейса (минимальное значение разрядности квантования 16 бит) и виртуальной совместимости с протоколом передачи ASIO (минимальное значение разрядности квантования 16 бит) (таблицы 3,6 и 9); минимально допустимая разрядность квантования для работы стенда – 16 бит (таблицы 1,4 и 7); необходимый размер буфера, обеспечивающий задержку в аудиотракте не более 100 мкс, – 8 отсчетов (таблицы 2,5 и 8) [3]; увеличение частоты дискретизации при фиксированной референсной частоте 1 кГц не влияло на динамический диапазон, ОСШ и КГИ, что указывает на отсутствие флуктуаций в верхней частотной области, вызванных нелинейными искажениями и интермодуляциями тракта киберфизического аудиомодуля; достижение минимально задержки 100 мкс в киберфизическом аудиотракте представится возможной при частоте дискретизации не ниже 44,1 кГц, размере буфера не менее 512 отсчетов и применении протокола ASIO, являющегося мостом, обеспечивающим трансляцию аудиопотока между многоканальным аудиointерфейсом и интерфейс-драйвером среды ВГЭ с фиксированным значением буфера, минуя штатную систему передачи данных (ресемплер) операционной системы [3].

3 Выводы

Для анализа влияния системных настроек среды ВГЭ и параметров многоканального аудиointерфейса на характеристики киберфизической SPICE-эмуляции программно-аппаратных двойников аудиотрактов в среде Simulink разработан интерфейс-плагин, обеспечивающий трансляцию киберфизической SPICE-эмуляции типовых аудиомодулей, протестированных тремя режимами отладки: прямая передача сигнала через интерфейс-плагин (режим 1); передача сигнала через схему параметрического эквалайзера, включенного в интерфейс-плагин (режим 2); передача сигнала через схему микрофонного предусилителя, включенного в интерфейс-плагин (режим 3). Предложена стендовая методика эксперименталь-

ного исследования влияния настроек частоты дискретизации, размера буфера и разрядности квантования на динамический диапазон, ОСШ и КГИ программно-аппаратных двойников – киберфизических аудиомодулей.

Установлено, что получение динамического диапазона свыше 83 дБ, КГИ менее 0,003% и ОСШ не менее 73 дБ возможно при: частоте дискретизации не ниже 44,1 кГц; применении протокола ASIO, обеспечивающего сквозную задержку на входе и выходе аудиointерфейса не более 100 мс; размере буфера не менее 512 отсчетов; разрядности квантования не менее 16 бит. Проведение отладки киберфизической системы требует предварительной калибровки интерфейс-плагина с аппаратной частью многоканального аудиointерфейса, заключающейся в выставлении линейных режимов входных/выходных преампов аудиointерфейса, балансировки импедансов и выравнивания референсных значений реальных и виртуальных входных/выходных динамических уровней сигналов. Так, среди прочих, в качестве рекомендованных системных настроек при практической реализации режима киберфизической эмуляции и отладки SPICE-моделей аудиоустройств для экспериментального стенда (рис. 5) являются частота дискретизации 44,1 кГц, размер буфера от 512 до 1024 семплов и выбор протокола «ввода-вывода» данных ASIO.

Литература

1. Cilingiroglu U. Analog Integrated Circuit Design by Simulation: Techniques, Tools, and Methods. New York: McGraw-Hill. 2019. 576 p.
2. Nichols K.G., Kazmierski T.J., Zwolinski M., Brown A.D. Overview of SPICE-like circuit simulation algorithms // IEE Proceedings: Circuits, Devices and Systems. 1994, no. 141(4), pp. 242-250.
3. Левченко Н.Р., Костин М.С. Анализ временных программно-аппаратных задержек в схемах аудиомодулей с киберфизической SPICE-эмуляцией. Russian Technological Journal. 2025, no. 13(4), pp. 45-58. DOI: 10.32362/2500-316X-2025-13-4-45-58.
4. Intusoft Newsletter. SPICE Numerical Methods, Part 1: Convergence Methods. 2003.
5. UA's Art and Science of Modeling UAD Plug-Ins, Part 2. Universal Audio. 2012.
6. Hueso González F., Ginestar D., Hueso J.L., Riera J. Comments on "SPICE Model of Photomultiplier Tube Under Different Bias Conditions // IEEE Sensors Journal. 2021, no. 21(15), pp. 17395-17402.
7. Pershin Y.V., Nguyen D.C. Accurate Modeling of Continuous-time SAT Solvers in SPICE. Radioengineering. 2025, no. 34(3), pp. 526-540.
8. The Method of Elementary Solvers in SPICE // Electronics. 2024, no. 13(13), p. 2480.
9. ГОСТ IEC 61606-1-2014 Аудио- и аудиовизуальное оборудование. Компоненты цифровой аудиоаппаратуры. Основные методы измерений звуковых характеристик.
10. AES17-2020: AES standard method for digital audio engineering – Measurement of digital audio equipment.
11. Левченко Н.Р. Плагин для киберфизического прототипирования сигнальных аудиомодулей // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: Сборник трудов III Национальной научно-практической конференции, Москва, 27-28 мая 2024 года. 2024. С. 344-350. EDN OMGGFZ.
12. Левченко Н.Р. Программные интерфейсы передачи аудиоданных для киберфизического SPICE-сигнального прототипирования аудиомодулей // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: Сборник трудов Национальной научно-практической конференции, Москва, 07-08 декабря 2023 года. 2023. С. 394-398. EDN PBTJGD.

13. Левченко Н.Р., Костин М.С. Киберфизическое прототипирование сигнальных аудиомодулей // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2023»): Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции, Москва, 20-4 ноября 2023 года. Москва: МИРЭА – Российский технологический университет, 2023. С. 347-350. EDN OYKUED.
14. Левченко Н.Р., Костин М.С. Стенд киберфизического прототипирования сигнальных аудиомодулей // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2024»): Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 18-22 ноября 2024 года. Москва: МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. С. 507-511.
15. Alla G. Kravets, Alexander A. Bolshakov, Maxim Shcherbakov/ Cyber-Physical Systems: Intelligent Models and Algorithms. Springer, 2022, 288 p.
16. Pedro H. J. Nardelli, Cyber-physical Systems: Theory, Methodology, and Applications – Wiley-IEEE Press; 1st edition, 2022, 288 p.
17. Chinemelu J. Anumba, Abiola Akanmu, Xiao Yuan, Congwen Kan. Cyber-physical systems development for construction applications // Front. Eng., 2021, no. 8(1), pp. 72-87 <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0130-4>
18. Bob Cordell. Designing Audio Power Amplifiers. Routledge, 2019, 792 p.
19. Self D. Small Signal Audio Design (4th ed.). Focal Press, 2023. 846 p.
20. Bennett C.L. Digital Audio Theory: A Practical Guide (1st ed.). Focal Press. 2020. 254 p.
21. Steiglitz K. A Digital Signal Processing Primer: with Applications to Digital Audio and Computer Music. NY, USA: Dover Publications Inc. 2020. 320 p.
22. Collins K. Studying Sound: A Theory and Practice of Sound Design Hardcover. London, England: The MIT Press. 2020. 248 p.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024685518 Российская Федерация. Программа коммутирования аудиointерфейса с SPICE-технологией, заявл. 18.10.2024, опубл. 30.10.2024 / Н.Р. Левченко, М.С. Костин, С.В. Филатов, С.М. Печенкин.
24. Walter Oney. Programming the Microsoft® Windows® Driver Model. 2nd Edition. Microsoft Press, 2002. 880 p.
25. Pavel Yosifovich. Windows Kernel Programming. Independently published, 2021. 461 p..
26. Геворский А.В., Костин М.С., Бойков К.А. Программно-архитектурная конфигурация многофункционального ADSP-модуля сигнального медиатестирования аудиоустройств // Russian Technological Journal. 2024, no. 12(1), pp. 30-58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-30-58>
27. Kamenov A. Digital Signal Processing for Audio Applications. 2nd ed. Amazon. Kindle edition. RecordingBlogs; 2014. 348 p.
28. Cipriani A., Giri M. Electronic Music and Sound Design: Theory and Practice with Max 8. V. 2. 3rd ed. Rome, Italy: ConTempoNet; 2020. 748 p.
29. Ковалгин Ю.А., Вахитов Ш.Я. Акустика. М.: Горячая линия – Телеком; 2022. 660 с.
30. Pirkle W.C. Designing Audio Effect Plugins in C++: for AAX, AU, and VST3 with DSP Theory. 2nd ed. NY, USA: Routledge; 2019. 704 p.
31. Ковалгин Ю.А., Вологдин Э.И. Аудиотехника: учебник. М.: Горячая линия-Телеком, 2017. 742 с. ISBN 978-5-9912-0241-1. URL: <https://e.lanbook.com/book/111065> (дата обращения: 04.05.2026).

A METHOD FOR AUTOMATICALLY CONSTRUCTING A TRAINING DATASET OF NETWORK TRAFFIC TIME SERIES IN A SYSTEM STATE CLASSIFICATION PROBLEM

Nikita R. Levchenko, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, Levchenko_n@mirea.ru

Mikhail S. Kostin, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, kostin_m@mirea.ru

Namik G. Gusein-zade, MIREA – Russian Technological University;

A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences (Federal Research Center) Moscow, Russia, ngus@mail.ru

Abstract

The relevance of this work comes from the need to ensure the accuracy of cyber-physical emulation and flexible debugging of analog audio devices operating in real time. The goal of the study is to analyze the software and hardware resources (system presets) of the computing environment and audio interface parameters on the characteristics of cyber-physical SPICE emulation of signal audio modules. The study of the proposed cyber-physical SPICE emulation method and the modes for achieving the best performance with minimal delays is demonstrated using typical audio module circuits: a three-band equalizer and a microphone preamplifier. A parametric analysis was carried out on how software settings (sample rate, buffer size, input-output protocol, and quantization bit depth) and the characteristics of the hardware platform for cyber-physical SPICE emulation affect the resulting parameters: dynamic range, signal-to-noise ratio, and nonlinear distortion. The proposed cyber-physical SPICE emulation mode, implemented through a custom interface plugin in Simulink, can be recommended for debugging audio signal modules. The study showed that by choosing a sampling rate of at least 44.1 kHz, using the ASIO protocol for input and output audio interface latency of no more than 100 ms, setting a buffer size of at least 512 samples, and a bit depth of at least 16 bits, it's possible to achieve a dynamic range of over 83 dB, harmonic distortion under 0.003%, and a signal-to-noise ratio of at least 73 dB in cyber-physical audio chains.

Keywords: Cyber-Physical SPICE Emulation, Interface Plugin, System Reconfiguration, Audio Module, Audio Interface, Dynamic Range, Nonlinear Distortion, Signal-to-Noise Ratio (SNR), Sampling Rate, Buffer Size, ASIO Protocol, quantization resolution.

References

- [1] U. Cilingiroglu, Analog Integrated Circuit Design by Simulation: Techniques, Tools, and Methods. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2019, p. 576.
- [2] K. G. Nichols, T. J. Kazmierski, M. Zvolinski, and A. D. Brown, "Overview of SPICE-like circuit simulation algorithms," *IEEE Proceedings: Circuits, Devices and Systems*, vol. 141, no. 4, pp. 242-250, 1994.
- [3] N. R. Levchenko and M. S. Kostin, "Analysis of temporal software-hardware delays in audio module circuits with cyber-physical SPICE emulation," *Russian Technological Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 45-58, 2025. doi: 10.32362/2500-316X-2025-13-4-45-58.
- [4] Intusoft, "SPICE numerical methods, part 1: Convergence methods," *Intusoft Newsletter*, 2003.
- [5] Universal Audio, "UA's art and science of modeling UAD plug-ins, part 2," 2012.
- [6] F. Hueso Gonzalez, D. Ginestar, J. L. Hueso, and J. Riera, "Comments on 'SPICE model of photomultiplier tube under different bias conditions'," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 15, pp. 17395-17402, 2021.
- [7] Y. V. Pershin and D. C. Nguyen, "Accurate modeling of continuous-time SAT solvers in SPICE," *Radioengineering*, vol. 34, no. 3, pp. 526-540, 2025.
- [8] "The method of elementary solvers in SPICE," *Electronics*, vol. 13, no. 13, p. 2480, 2024.
- [9] GOST IEC 61606-1-2014, "Audio and audiovisual equipment - Digital audio apparatus components - Basic methods of measurement of audio characteristics," 2014.
- [10] AES17-2020, "AES standard method for digital audio engineering - Measurement of digital audio equipment," Audio Engineering Society, 2020.
- [11] N. R. Levchenko, "Plugin for cyber-physical prototyping of signal audio modules," in *Proc. III National Scientific-Practical Conference Fundamental, Exploratory, Applied Research and Innovative Projects*, Moscow, Russia, May 27-28, 2024, pp. 344-350.
- [12] N. R. Levchenko, "Software interfaces for audio data transmission for cyber-physical SPICE signal prototyping of audio modules," in *Proc. National Scientific-Practical Conference Fundamental, Exploratory, Applied Research and Innovative Projects*, Moscow, Russia, Dec. 7-8, 2023, pp. 394-398.
- [13] N. R. Levchenko and M. S. Kostin, "Cyber-physical prototyping of signal audio modules," in *Proc. VII Int. Sci.-Pract. Conf. Radioinfocom-2023*, Moscow, Russia, Nov. 20-24, 2023, pp. 347-350.
- [14] N. R. Levchenko and M. S. Kostin, "Cyber-physical prototyping bench for signal audio modules," in *Proc. VIII Int. Sci.-Pract. Conf. Radioinfocom-2024*, Moscow, Russia, Nov. 18-22, 2024, pp. 507-511.
- [15] A. G. Kravets, A. A. Bolshakov, and M. Shcherbakov, *Cyber-Physical Systems: Intelligent Models and Algorithms*. Springer, 2022, 288 p.
- [16] P. H. J. Nardelli, *Cyber-Physical Systems: Theory, Methodology, and Applications*, 1st ed. Wiley-IEEE Press, 2022, 288 p.
- [17] C. J. Anumba, A. Akanmu, X. Yuan, and C. Kan, "Cyber-physical systems development for construction applications," *Front. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 72-87, 2021. doi: 10.1007/s42524-020-0130-4.
- [18] B. Cordell, *Designing Audio Power Amplifiers*. Routledge, 2019, 792 p.
- [19] D. Self, *Small Signal Audio Design*, 4th ed. Focal Press, 2023, 846 p.
- [20] C. L. Bennett, *Digital Audio Theory: A Practical Guide*, 1st ed. Focal Press, 2020, 254 p.
- [21] K. Steiglitz, *A Digital Signal Processing Primer: With Applications to Digital Audio and Computer Music*. NY, USA: Dover Publications Inc., 2020, 320 p.
- [22] K. Collins, *Studying Sound: A Theory and Practice of Sound Design*. London, England: The MIT Press, 2020, 248 p.
- [23] N. R. Levchenko, M. S. Kostin, S. V. Filatov, and S. M. Pechenkin, "Program for switching audio interface with SPICE technology," Russian Federation Patent for Computer Program 2024685518, Oct. 30, 2024.
- [24] W. Oney, *Programming the Microsoft Windows Driver Model*, 2nd ed. Microsoft Press, 2002, p. 880.
- [25] P. Yosifovich, *Windows Kernel Programming*. Independently published, 2021, p. 461.
- [26] A. V. Gevorsky, M. S. Kostin, and K. A. Boikov, "Software-architectural configuration of a multifunctional ADSP module for signal media testing of audio devices," *Russian Technological Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 30-58, 2024. doi: 10.32362/2500-316X-2024-12-1-30-58.
- [27] A. Kamenov, *Digital Signal Processing for Audio Applications*, 2nd ed. Kindle Edition: RecordingBlogs, 2014, p. 348.
- [28] A. Cipriani and M. Giri, *Electronic Music and Sound Design: Theory and Practice with Max 8*, 3rd ed., vol. 2. Rome, Italy: ConTempoNet, 2020, 748 p.
- [29] Y. A. Kovalgin and S. Y. Vakhitov, *Akustika [Acoustics]*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2022, 660 p.
- [30] W. C. Pirkle, **Designing Audio Effect Plugins in C++: For AAX, AU, and VST3 with DSP Theory**, 2nd ed. NY, USA: Routledge, 2019, 704 p.
- [31] Y. A. Kovargin and E. I. Vologdin, *Audiotekhnika [Audio Engineering]*. Moscow: Goryachaya Liniya-Telekom, 2017, p. 742. [Online]. Available: <https://e.lanbook.com/book/111065> (Accessed: May 4, 2026)

Information about authors:

Nikita R. Levchenko, Assistant, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radioelectronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia. ORCID 0009-0002-1749-1451

Mikhail S. Kostin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radioelectronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia. ORCID 0000-0002-5232-5478

Namik G. Gusein-zade, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Basic Department No. 343 – Modeling of Radiophysical Processes, Institute of Radioelectronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University; A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences (Federal Research Center), Moscow, Russia. ORCID 0000-0001-8000-1107