

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.3>

УДК: 621.396.65

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ АУДИОМОНИТОРИНГА

Н.Р. Левченко, М.С. Костин

РТУ МИРЭА, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78

Статья поступила в редакцию 5 июня 2023 г.

Аннотация. Цель статьи – анализ программно-аппаратных методов подавления электроакустической обратной связи в радиоэлектронных системах аудиомониторинга и телепроизводства. В работе приведен численный анализ сигнальных методов компенсации положительной обратной связи средств радиоакустики, а также архитектурное DSP-решение построения режекторной эквалазационной линейки с автоследящим многотональным звукоподавлением на базе аудиопроцессора ADAU1701. Методы: алгоритмы цифровой обработки сигналов, теория устойчивости звукоусилительных и звукоснимающих радиосистем, методы сигнальной радиоакустики, теория и методы анализа автоколебательных цепей, векторная теория звукового поля. Результаты: выявлены причины возникновения электроакустической обратной связи; предложен и исследован адаптивный алгоритм подавления электроакустической обратной связи; проведен анализ эксперимента с применением субмодуля автоподавления электроакустической обратной связи.

Ключевые слова: сигнальная радиоакустика, электроакустическая обратная связь, подавитель обратной связи, радиоэлектронная система аудиомониторинга.

Автор для переписки: Левченко Никита Романович, levchenko_n@mirea.ru

Введение

Электроакустическая обратная связь (ЭОС), также известная как эффект Ларсена, – вид положительной обратной связи, возникающая в радиоэлектронных системах аудиомониторинга [1]. На рис. 1а представлен пример такой системы.

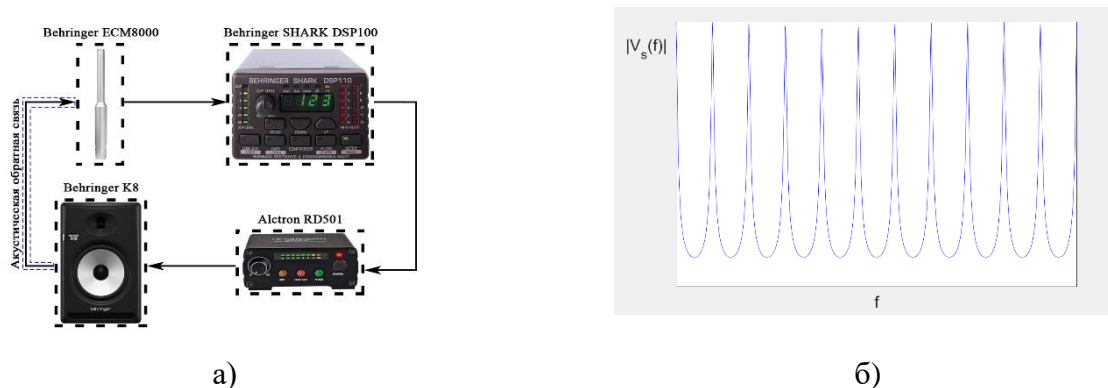


Рис. 1. Типовая система аудиомониторинга с электроакустической обратной связью: а) – схема радиоэлектронной системы аудиомониторинга; б) – векторная характеристика петли обратной связи гребенчатого вида.

Принцип формирования акустической обратной связи состоит в следующем: звуковой сигнал, принимаемый направленным микрофоном, усиливается и транслируется из аудиомониторинговой системы. Затем звуковой сигнал способен быть принят микрофоном, усилен и снова пропущен через аудиомониторинговую систему. При таком режиме возникает электроакустическая обратная связь между аудиомониторинговой системой и микрофоном, расположенных друг от друга в диффузном пространстве на расстоянии $r = \lambda(n + \varphi/2\pi)$, где λ – длина волны звукового тона; n – const; φ – фазовый угол. Таким образом, в радиоэлектронных системах, обратная связь возникает на частотах $F_n = n \frac{v}{r}$, где v – скорость звуковой волны. Векторная характеристика петли обратной связи приобретает гребенчатый вид $V_s^2 = \frac{\omega_\Gamma}{\omega_M}$, где ω_Γ и ω_M – плотности звуковой энергии в локализации нахождения аудиомониторинговой системы и в месте установки направленного микрофона. На рис.1б представлен пример такой характеристики [1].

Положительная электроакустическая обратная связь с точки зрения теории автоколебаний предполагает выполнения условий баланса фаз и амплитуд и

образуется из энергии собственных шумов аудиосигнального тракта, собственных шумов аудиомониторов, микрофонов, а также спектра полезного транслируемого аудиосигнала. Так, из числа известных причин возникновения электроакустической обратной связи в аудиотехнических системах основными являются: архитектурная акустика помещения, фазово-динамический баланс радиоакустической системы, диаграммы направленности и резонансные частоты аудиомонитора и микрофона, амплитудно-частотная характеристика аудиосигнального тракта.

Проблема подавления электроакустической обратной связи является актуальной в настоящее время. В данный момент существуют различные варианты решения данной проблемы.

Первый вариант: применение различных алгоритмов подавления электроакустической обратной связи.

Второй вариант: применение подавителей обратной связи.

Третий вариант: применение плагинов в различных звуковых редакторах.

1. Адаптивный алгоритм подавления электроакустической обратной связи

Аппаратным методом решения проблемы электроакустической обратной связи является применение различных алгоритмов компенсации помех.

Алгоритм состоит из нескольких этапов:

- 1) Задается количество отсчетов для записи идеального сигнала на интервале $[0; T_1]$ по формуле:

$$T_1 = \left(\frac{r}{s} \cdot f \right),$$

где: r – расстояние от микрофона до аудиомониторинговой системы, s – скорость звука, для воздушной среды, f – частота дискретизации, T_1 – время приема аудиосигнала на канале прямого прохождения.

- 2) Вычисляется взаимно-корреляционная функция (ВКФ) двух полученных сигналов и их максимумов по формуле:

$$R(t) = \int_0^{T_1} s(t)u(t + \tau)dt,$$

где: $s(t)$ – сигнал на интервале $[0;T_1]$, $u(t)$ – сигнал на интервале $[T_1;T_2]$.

- 3) Вычисляется M максимумов ВКФ, которые показывают относительную мощность эхо-сигналов обратного акустического тракта. Значения по оси абсцисс считается равными τ_m , затем значения максимумов ВКФ заносим в массив a_m .
- 4) Полученный массив максимумов нормируется к интервалу $[1;0]$, исходя из того, что первый максимум равен 1, а все последующие располагаются на интервале.
- 5) Моделируется сигнал обратного канала с учетом найденных массивов по формуле:

$$x(t) = \sum_{m=0}^M a_m y(k - \tau_m),$$

где: k – коэффициент, с помощью которого, регулировались значения весовых коэффициентов, M – максимумы ВКФ.

- б) Вычитаем данный сигнал из общего сигнала, поступающего на микрофон.

В результате исследования данного алгоритма, были выявлены результаты значений добавочных коэффициентов и процент фильтрации сигнала, данные представлены в таблице 1

Таблица 1. Результаты моделирования

№ интервала	Мощность фильтруемого сигнала на интервале	k	Итоговый процент фильтрации		
			$M= 10$	$M = 20$	$M = 30$
1	0,0722	0,05	66,66%	82,75%	85,82%
2	0,2927	0,20	57,77%	79,91%	92,89%
3	0,1619	0,14	75,54%	79,87%	85,99%
4	0,0931	0,06	39,65%	57,49%	72,48%
5	0,0854	0,05	42,58%	57,97%	68,93%
6	0,1093	0,09	46,78%	63,15%	70,55%
7	0,0625	0,05	34,78%	47,17%	59,74%

Из данных результатов следует отметить, что после обработки сигнала рассматриваемым алгоритмом, электроакустическая обратная связь была практически полностью подавлена, в результате качество сигнала существенно возросло. Кроме того, из результатов видно, что наблюдалась зависимость

добавочного коэффициента, рассчитанного цифрового режекторного фильтра, от номинальной мощности, что позволило сделать фильтр адаптивным под уровень мощности входящего сигнала, достаточное количество пауз в речи оратора позволяет адаптироваться под переходную характеристику акустического тракта.

Преимуществом данного алгоритма является, то что коэффициенты максимумов вычисляются в первые мгновения подачи аудиосигнала на микрофон, это позволяет отфильтровать все последующие входящие отсчеты.

Недостатками являются:

- работа алгоритма только в тех системах, в которых известно время, когда в тракте микрофон-источник сигнала проходит только аудиосигнал прямого акустического тракта,
- не обеспечение полного подавления (процент компенсации сигнала обратного акустического тракта достиг почти 93%),
- необходимость пауз в речи для адаптации фильтра.

2. Программно-аппаратные средства подавления

Альтернативой алгоритмам борьбы с электроакустической обратной связью является применение программно-аппаратных средств подавления.

Программно-аппаратные средства подавления подразделяются на две группы: подавители обратной связи и плагины для звуковых редакторов.

Подавитель обратной связи – устройство для обработки аудиосигнала, которое используется в тракте передачи для подавления электроакустической обратной связи. В его состав входит DSP – процессор. На рис. 2а представлен подавитель обратной связи фирмы Behringer DSP110. [3]

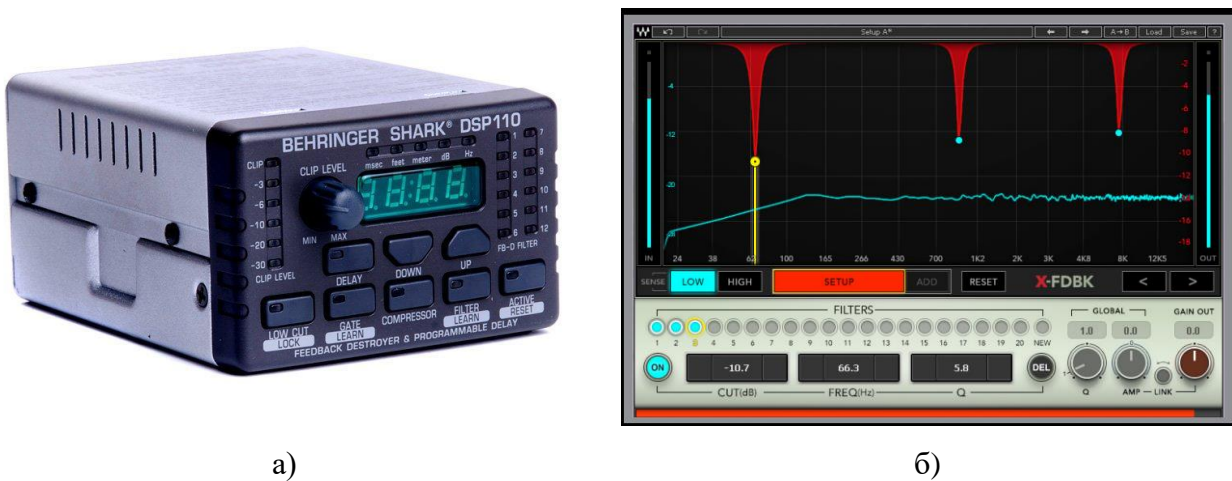


Рис. 2. Программно-аппаратные средства подавления ЭОС: а) подавитель обратной связи, б) плагин X-FDBK.

Данный подавитель распознает обратную связь, разделяя весь спектр частот (от 20 Гц до 20 кГц) на части (1/60 октавы) и вычисляя уровень в каждой из этих полос. Затем полученные значения сравниваются с общим уровнем сигнала. Разница уровней аудиосигнала, полученная в результате, определяет необходимость устанавливать фильтр или нет.

Другим вариантом борьбы с электроакустической обратной связью является применение различных плагинов в звуковых редакторах. Одним из таких плагинов является X-FDBK, разработанный фирмой Waves. Данный плагин упрощает настройку радиоэлектронных систем аудиомониторинга. На рис. 2б представлен интерфейс плагина X-FDBK.

Плагин работает следующим образом, при нажатии кнопки “Setup”, плагин автоматически определяет частоты, на которых возникает акустическая обратная связь и отсекает данные частоты при помощи цифровых режекторных фильтров. Данный плагин разработан для обеспечения дополнительного запаса в 6 дБ [4].

Преимуществами данного плагина по сравнению с рассмотренным выше алгоритмом и подавителями обратной связи является:

- отсутствие привязки ко времени, когда в тракте проходит прямой акустический сигнал,
- отсутствие необходимости в применении подавителей обратной связи, так как выполняют схожие функции.

3. Субмодуль автоподавления электроакустической обратной связи

Рассмотрим применение аудиопроцессора ADAU1701 для подавления ЭОС. Подавление электроакустической обратной связи реализуется путем создания узкополосной режекторной фильтрации [6,7].

Экспериментальная схема лабораторного исследования аудиопроцессора в режиме автоподавления представлена на рис. 4.

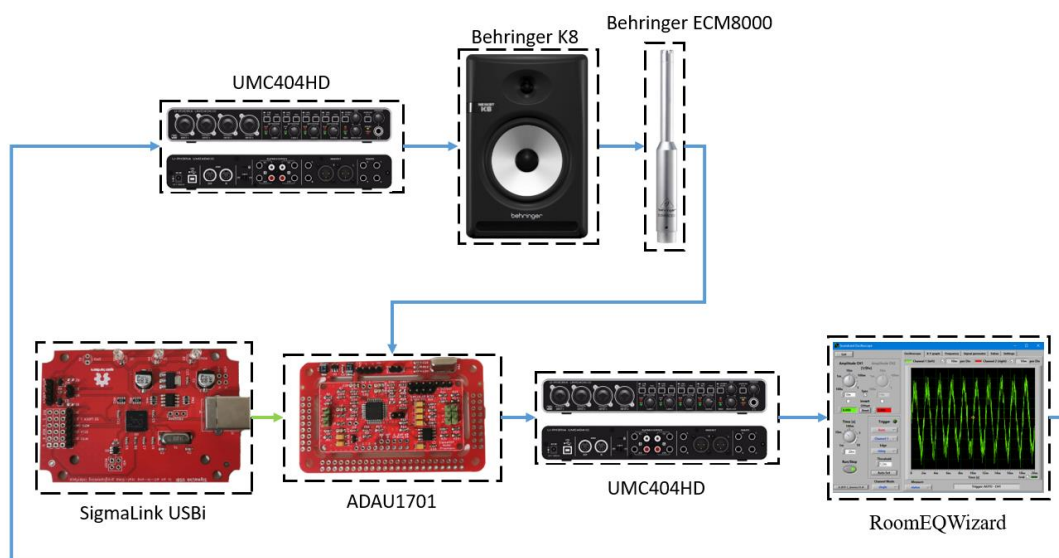


Рис. 4. Схема экспериментального исследования аудиопроцессора ADAU1701 в режиме субмодуля автоподавления электроакустической обратной связи.

Схема состоит из:

- 1) Измерительного микрофона Behringer ECM8000,
- 2) Акустической системы Behringer K8,
- 3) Программатора для ADAU1701 SigmaLink USBi,
- 4) Аудиопроцессора ADAU1701,
- 5) Аудиоинтерфейсов UMC404HD,
- 6) Измерительного программного обеспечения RoomEQWizard.

При проведении эксперимента на входе аудиоинтерфейса установлено значение 10 дБ для улавливания микрофоном собственных шумов электроакустического канала.

Конфигурация схемы субмодуля автоподавления ЭОС в программе SigmaStudio представлена на рис. 5.

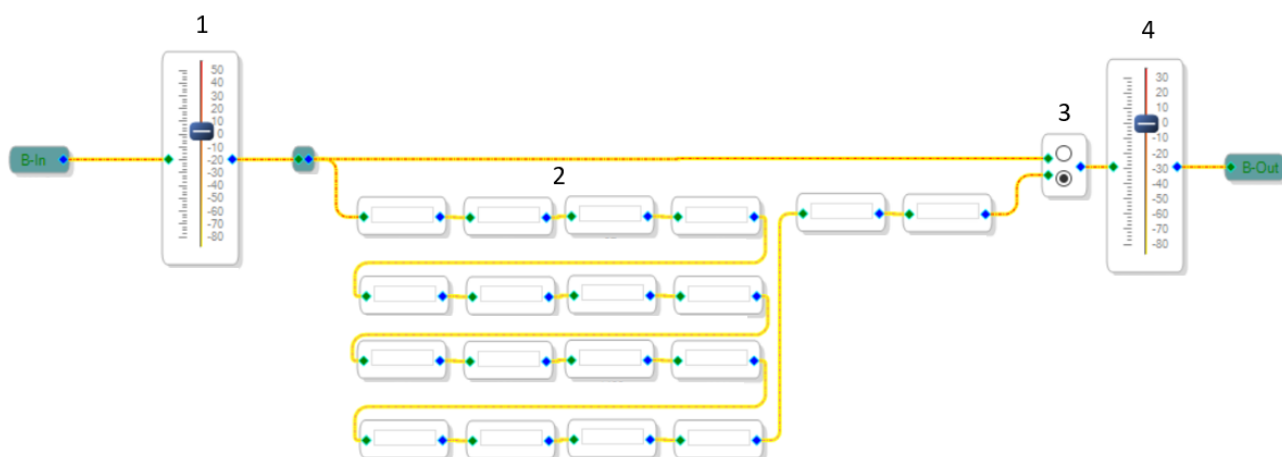


Рис. 5. Конфигурация схемы субмодуля автоподавления ЭОС.

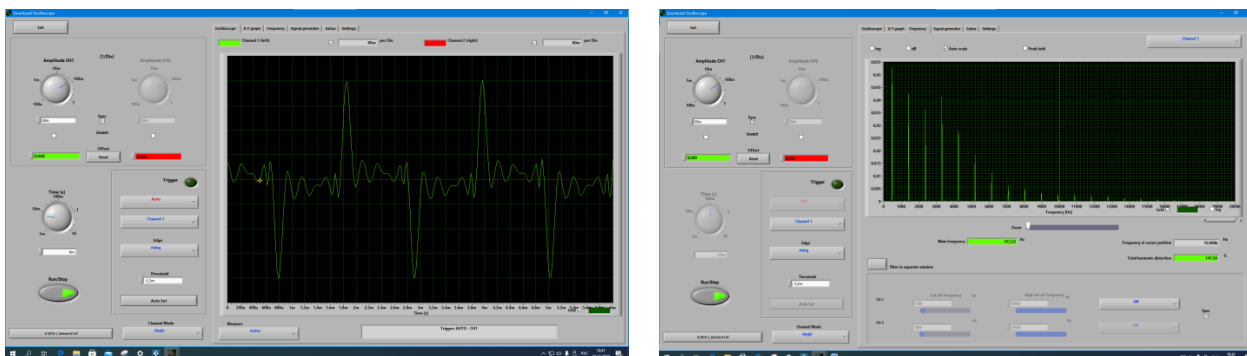
Субмодуль состоит из:

- 1) Фейдера входной громкости,
- 2) Цепи режекторных фильтров,
- 3) Цифрового коммутатора,
- 4) Фейдера выходной громкости.

В реализованной конфигурации схемы субмодуля режекторные фильтры срабатывают только при возникновении резонанса и установленное пользователем время (от 0 до 10 секунд), после чего происходит сброс. Применение данной конфигурации позволяет системе не оказывать значительного влияния на амплитудно-частотную характеристику. Используемые фильтры обеспечивают перекрытие рабочего диапазона от 0,02 до 20 кГц при входном диапазоне от -50 до 80 дБ.

Для проведения эксперимента на вход схемы подается тестовый сигнал в виде шумов с уровнем от -40 до -50 дБ. На рис. 6 приведены экспериментальные спектрально-временные характеристики, иллюстрирующие режим подавления резонансных всплесков до уровня 2,75 мВ (ниже уровня шумов аудиотракта). При этом микрофон продолжает улавливать полезный сигнал на других частотах. Если резонанс не возникает в течение 10 секунд, фильтр отключается, что позволяет избежать искажений АЧХ, вызванных резонансами.

Рис. 6а и 6б демонстрируют наличие периодического сигнала с амплитудой 240 мВ, состоящего из 7 гармонического составляющих уровнем выше 10 мВ.

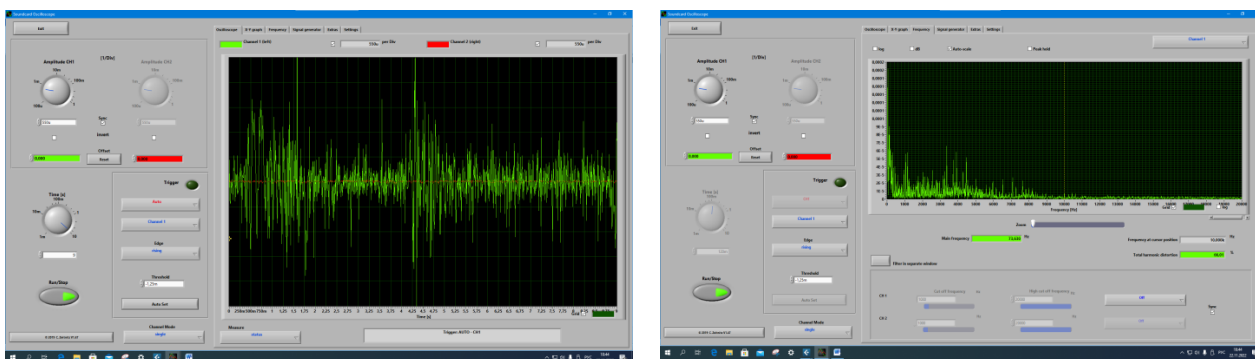


а)

б)

Рис. 6. Экспериментальные спектрально-временные характеристики в режиме формирования ЭОС: а) осциллограмма устойчивого режима формирования ЭОС (без автоподавления), б) амплитудный спектр, соответствующий осциллограмме.

Рисунок 7а и 7б демонстрируют наличие шумов амплитудой 2,75 мВ без ярко выраженных частотных составляющих.



а)

б)

Рис. 7. Экспериментальные спектрально-временные характеристики в устойчивом режиме подавления ЭОС: а) осциллограмма устойчивого режима автоподавления ЭОС, б) амплитудный спектр, соответствующий осциллограмме.

Описанный submodule автоподавления акустической обратной связи обеспечивает автоподавление до -100 дБ при входном диапазоне от -50 до 80 дБ, не оказывая при этом влияния на амплитудно-частотную характеристику, так как каждый фильтр системы работает независимо.

Заключение

Методами решения проблемы электроакустической обратной связи является применение адаптивного алгоритма подавления электроакустической обратной связи и программно-аппаратных средств подавления.

Адаптивный алгоритм имеет нестабильный процент компенсации (при 30 моментах максимумов средний процент компенсации 75%, при 20 моментах максимумов средний процент 66% и при 10 – 51%). По сравнению с другими методами борьбы с электроакустической обратной связью – адаптивный алгоритм неэффективен.

Аудиопроцессор ADAU1701 в режиме субмодуля автоподавления обеспечивает подавление до -100 дБ при входном диапазоне от -50 до 80 дБ. Данный модуль рассмотрен при использовании 18 фильтров. Плагин X-FDBK имеет 20 адаптивных настраиваемых фильтров, позволяя покрыть аналогичные частоты что и субмодуль. Применение плагинов в звуковых редакторах избавляет от необходимости использования подавителей обратной связи для цифровой обработки сигналов.

Литература

1. Акустика: Учебник для вузов / Ш.Я. Вахитов, Ю.А. Ковалгин, А.А. Фадеев, Ю.П. Щевьев; Под ред. профессора Ю.А. Ковалгина. – М.:Горячая линия – Телеком, 2009. – 660 с.: ил.
2. Кондратьев К.В., Углев В.А., Непомнящий О.В., Сергеевич В.Н. Адаптивный алгоритм определения параметров рекурсивного цифрового фильтра для компенсации акустической обратной связи. Журнал “Цифровая обработка сигналов”. №4/2013. С.72-76.
3. Руководство по эксплуатации Behringer Shark DSP110 – 23 стр.
4. X-FDBK Feedback Eliminator, User guide – 11 p.
5. Will C. Pirkle. *Designing audio effect plugins in C++: for AAX, AU, and VST3 with DSP theory*. Second edition. – New York, NY: Routledge, 2019 – 654 p.

6. Афанасьев А.А. *Цифровая обработка сигналов* / А.А. Афанасьев, А.А. Рыболовлев, А.П. Рыжков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 356 с.
7. Ковалгин Ю.А. *Аудиотехника* / Ю.А. Ковалгин, Э.И. Вологдин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2013. – 742 с.
8. Д.Б. Петленко, А.Д. Ярлыков, К.А. Бойков. *Цифровые методы секвенсорной эквализации аудиосигналов радиоакустических систем* / Д.Б. Петленко, А.Д. Ярлыков, К.А. Бойков – М.: Реглет, 2023. – 109 с.

Для цитирования:

Левченко Н.Р., Костин М.С. Программно-аппаратные методы подавления электроакустической обратной связи в радиоэлектронных системах аудиомониторинга. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.3>