

Научная статья
УДК 534.2
ББК 22.32
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 1.3.7.
PACS 43.20.+g
OCIS 160.1050
MSC 74J30

Исследование физических процессов распространения звуковых волн в микшерных системах

А. Ш. Джаббарова ¹

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 27 января 2026 года

После переработки 29 января 2026 года

Опубликована 31 марта 2026 года

Аннотация. Рассмотрены физические особенности описания звуковых процессов в аудиосистемах. Целью исследования является анализ физических процессов распространения звуковых волн в микшерных системах для оптимизации их акустических характеристик. Мотивация обусловлена необходимостью улучшения качества звучания в профессиональных аудиосистемах. Методы исследования включают математическое моделирование, экспериментальные измерения и численные симуляции. Гипотеза исследования заключается в том, что оптимизация геометрии микшерных систем позволяет минимизировать искажения звуковых волн. Результаты исследования демонстрируют зависимость акустических характеристик от параметров системы, что подтверждает теоретическую значимость работы. Практическая значимость заключается в возможности применения полученных данных для проектирования акустических систем нового поколения. Представлены результаты численных расчётов характеристик акустических элементов микшера.

Ключевые слова: акустика, акустическая система, аудиосистема, акустические параметры звуковая волна, звуковой процесс, микшер, микшерная система, численные расчёты

Введение

Акустика — это область физики и техники, изучающая упругие (звуковые) колебания и волны в различных средах, их возбуждение и восприятие, распространение, взаимодействие со средой, а также разнообразное применение. В узком смысле слова акустика представляет собой учение о звуке, то есть о волнах плотности в газах, жидкостях и в твёрдых телах, слышимых человеческим ухом (диапазон от 16 Гц до 20 кГц). В широком смысле акустика является областью физики, изучающей физические свойства

¹E-mail: dzhabbarova.2005@mail.ru

упругих колебаний и волн от низких частот (условно от 0 Гц) до предельно высоких частот около 10 ТГц, их взаимодействия с веществом и применение полученных знаний для решения широкого круга инженерных проблем. Актуальность исследования определяется необходимостью улучшения качества звучания в современных аудиосистемах.

Целью работы является исследование физических процессов, влияющих на качество звука в аудиосистемах и акустических устройствах. Задачи исследования включают в себя написание обзора литературы по распространению звуковых волн, численное исследование физических особенностей распространения звуковых волн в аудиосистемах.

Объектом исследования является звуковая система в составе микшера. Предметом исследования является набор физических свойств звуковых процессов в микшере.

Гипотеза исследования заключается в том, что если использовать результаты исследования аудиосистем и акустических устройств, то можно расширить теоретическую базу знаний по разделу акустики в курсе физики.

Научная новизна исследования заключается в выявлении новых закономерностей и связей между физическими процессами и качеством звука в аудиосистемах, а также в разработке новых подходов, методов и технологий для улучшения физических характеристик аудиосистем с целью улучшения качества звука.

Для проведения исследования используются следующие методы: анализ научной литературы по физическим процессам в аудиосистемах, теоретические методы анализа и синтеза информации о физических процессах распространения звука в звуковых системах, численные методы исследования характеристик аудиосистем и акустических устройств. Материалы исследования включают в себя научные статьи и публикации по существующим и перспективным аудиосистемам и акустическим устройствам, данные о характеристиках материалов, используемых в аудиотехнике, для улучшения характеристик аудиосистем, данные анализа влияния формы и размеров аудиосистем и акустических устройств на физические характеристики звука, такие как амплитуда, частота и фаза звуковой волны.

Теоретическая значимость исследования заключается в систематизации теоретических знаний о физических процессах в звуковых системах, влияющих на качество звука, и разработке новых подходов к анализу и компьютерному моделированию аудиосистем для понимания физической природы звука и его взаимодействия с окружающей средой.

Практическая значимость исследования состоит в возможности использования полученных результатов для разработки и оптимизации звуковых систем, а также для повышения их эффективности и качества работы в различных условиях эксплуатации.

Обзор

Звуковые волны в современных аудиосистемах представляют собой механические продольные волны, для распространения которых требуется среда, например воздух, характеризующаяся колебаниями частиц в направлении распространения волны [1]. Звуковые волны в аудиосистемах возникают, когда компоненты, такие как динамики, вибрируют, создавая сжатие и разрежение воздуха. Эти продольные волны распространяются по воздуху, позволяя звуку перемещаться, а их скорость зависит от температуры, что влияет на частоту и качество звука. Звуковые волны генерируются различными источниками, включая динамики и музыкальные инструменты, которые создают колебания давления, распространяющиеся через среду [2]. Звуковые волны в аудиосистемах — это колебания давления, которые распространяются через упругую среду, обычно воздух. Звуковые волны генерируются вибрирующими поверхностями, такими как диафрагмы динамиков, а также могут возникать из-за турбулентных потоков жидкости, облегчая распространение звука [2]. Звуковая волна — это любое возмущение, которое распространяется в упругой среде, которая может быть газом, жидкостью

или твёрдым телом, и может быть вызвано вибрирующей поверхностью (например, диафрагмой динамика) или турбулентным потоком жидкости [2]. Скорость звука в воздухе составляет приблизительно 344 м/с при 21°C, и скорость звука увеличивается с температурой, влияя на частоту производимого звука [1]. В аудиосистемах пьезоэлектрические материалы играют решающую роль в генерации акустических волн, поскольку они преобразуют электрическую энергию в механические колебания, позволяя создавать звук [3]. Кроме того, акустические волны могут использоваться для цифровой передачи информации, предоставляя альтернативы электромагнитным системам в определённых условиях [4]. В статье [4] рассматриваются цифровые системы передачи информации с использованием акустических волн в слышимом диапазоне частот. В статье [4] проведён анализ различных видов модуляции акустических волн, выделены условия, при которых эти системы выступают в качестве альтернативы связи на основе электромагнитных волн. В статье [4] приведены примеры условий обоснованного использования акустических систем передачи информации по воздушному каналу, проанализированы различные виды и особенности используемых видов модуляции акустических волн в слышимом диапазоне. В работе [5] разработана система передачи звуковых волн на основе оборудования динамика и микрофона в мобильных устройствах, где цифровые данные кодируются в аналоговую звуковую волну, передаются динамиком, принимаются микрофоном и декодируются мобильным устройством для получения исходных данных с использованием динамиков и микрофонов в мобильных устройствах, где цифровые данные кодируются в аналоговые звуковые волны, передаются и декодируются, достигая пропускной способности 72 бит/с и точности 90 %.

Модель

Уравнение волны в акустике описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p, \quad (1)$$

где p – звуковое давление, c – скорость звука, t – время.

Для микшерных систем граничные условия могут быть заданы следующим образом:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad \text{на жестких стенках,} \quad (2)$$

$$p = 0 \quad \text{на открытых поверхностях.} \quad (3)$$

Распространение звуковых волн в волноводе описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4)$$

Общее решение уравнения волны имеет вид:

$$p(x, t) = A \cos(kx - \omega t) + B \sin(kx - \omega t), \quad (5)$$

где $k = \frac{\omega}{c}$ – волновое число, ω – циклическая частота.

При интерференции двух волн звуковых получаем выражение:

$$p_g = p_1 + p_2 = A_1 \cos(kx - \omega t) + A_2 \cos(kx - \omega t + \phi). \quad (6)$$

Уравнение дифракции Кирхгофа имеет вид:

$$p(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(p \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial p}{\partial n} \right) dS, \quad (7)$$

где G – функция Грина.

Закон поглощения звука имеет вид:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (8)$$

где α – коэффициент поглощения, x – расстояние.

Коэффициент отражения звука определяется выражением:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (9)$$

где Z_1, Z_2 – акустические импедансы сред. Условие резонанса в акустических системах принимает вид:

$$f_n = \frac{nc}{2L}, \quad (10)$$

где n – номер гармоники, L – длина резонатора. Волновое сопротивление среды определяется выражением:

$$Z = \rho c, \quad (11)$$

где ρ – плотность среды.

Плотность энергии звуковой волны находится по формуле:

$$E = \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{p^2}{2\rho c^2}. \quad (12)$$

Интенсивность звуковой волны находится по формуле:

$$I = \frac{p^2}{2\rho c}. \quad (13)$$

Уровень звукового давления в децибелах можно найти по формуле:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right), \quad (14)$$

где пороговое давление $p_0 = 20$ мкПа.

Акустический импеданс определяется по формуле:

$$Z = \frac{p}{v}, \quad (15)$$

где v – скорость частиц.

Коэффициент затухания имеет вид:

$$\alpha = \frac{\omega^2 \eta}{2\rho c^3}, \quad (16)$$

где η – динамическая вязкость.

Волновое уравнение в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (17)$$

Волновое уравнение в сферических координатах имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 p}{\partial \phi^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (18)$$

Волновое уравнение для неоднородной среды принимает вид:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla p \right) - \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 . \quad (19)$$

Волновое уравнение для анизотропной среды принимает вид:

$$\nabla \cdot (\mathbf{C} \nabla p) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 , \quad (20)$$

где \mathbf{C} – тензор упругости.

Волновое уравнение для вязкой среды имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\eta}{\rho c^2} \nabla^2 \frac{\partial p}{\partial t} = 0 . \quad (21)$$

Волновое уравнение для среды с дисперсией принимает вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\tau}{\rho c^2} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} = 0 , \quad (22)$$

где τ – время релаксации.

Волновое уравнение для среды с нелинейностью принимает вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\beta}{\rho c^4} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} = 0 , \quad (23)$$

где β – коэффициент нелинейности.

Волновое уравнение для среды с поглощением имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 . \quad (24)$$

Волновое уравнение для среды с диссипацией имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\gamma}{\rho c^2} \nabla^2 \frac{\partial p}{\partial t} = 0 , \quad (25)$$

где γ – коэффициент диссипации.

Волновое уравнение для среды с диффузией имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{D}{\rho c^2} \nabla^2 \frac{\partial p}{\partial t} = 0 , \quad (26)$$

где D – коэффициент диффузии.

Волновое уравнение для среды с релаксацией имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\tau}{\rho c^2} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} = 0 . \quad (27)$$

Волновое уравнение для среды с гистерезисом имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\eta}{\rho c^2} \nabla^2 \frac{\partial p}{\partial t} = 0 . \quad (28)$$

Волновое уравнение для среды с вязкоупругостью имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\mu}{\rho c^2} \nabla^2 \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (29)$$

где μ – коэффициент вязкоупругости.

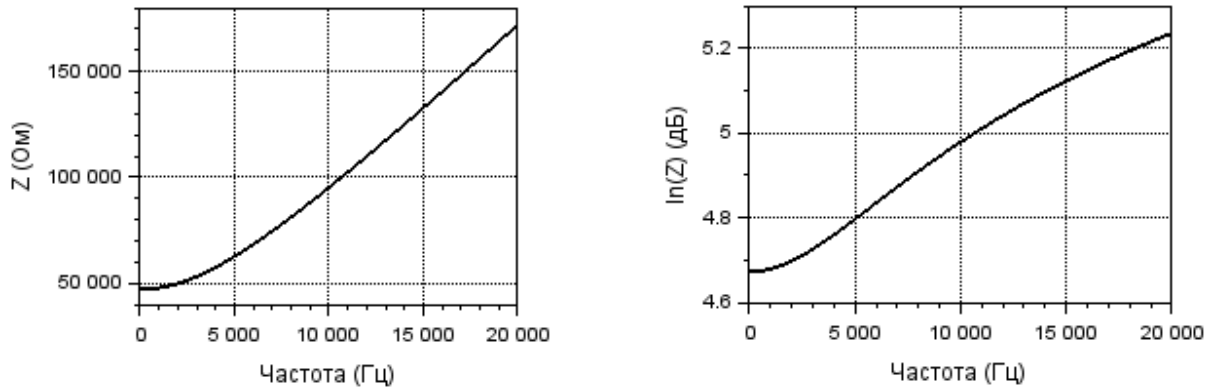


Рис. 1. Частотная характеристика импеданса элемента микшера в обычном и полулогарифмическом масштабах. Диаметр диффузора динамика в аудиосистеме равен 20.32 см. Эквивалентный объём динамиков равен примерно 60 литров. Добротность акустической системы равна 0.6. Порог компрессии звуковых сигналов в микшере равен 24 дБ. Коэффициент компрессии в микшере равен 2:1. Частота дискретизации равна 44.1 кГц.

Результаты

В настоящей работе проведены численные расчёты физических параметров микшера.

На рис. 1 приведено изображение частотной характеристики импеданса элемента микшера в обычном и полулогарифмическом масштабах. Диаметр диффузора динамика в аудиосистеме равен 20.32 см. Эквивалентный объём динамиков равен примерно 60 литров. Добротность акустической системы равна 0.6. Порог компрессии звуковых сигналов в микшере равен 24 дБ. Коэффициент компрессии в микшере равен 2:1. Частота дискретизации равна 44.1 кГц.

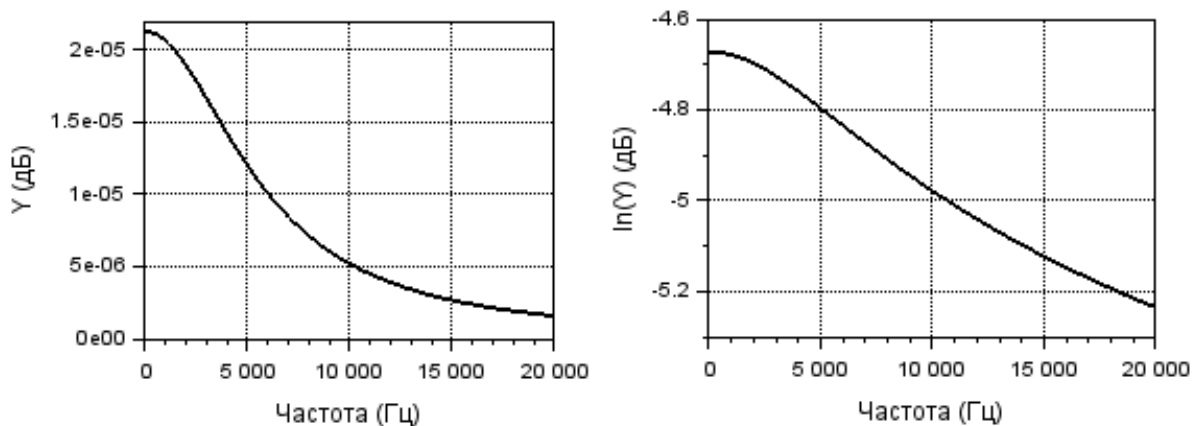


Рис. 2. Частотная характеристика адмиттанса $Y(\nu) = 1/Z(\nu)$ элемента микшера в обычном и полулогарифмическом масштабах.

На рис. 1 изображена частотная характеристика импеданса элемента микшера в обычном и полулогарифмическом масштабах. На рис. 2 изображена частотная характеристика адмиттанса элемента микшера в обычном и полулогарифмическом масштабах. На рис. 3 изображён график уровня звукового давления элемента микшера как функция частоты. На рис. 4 изображена амплитудно-частотная характеристика микшера в полулогарифмическом масштабе.

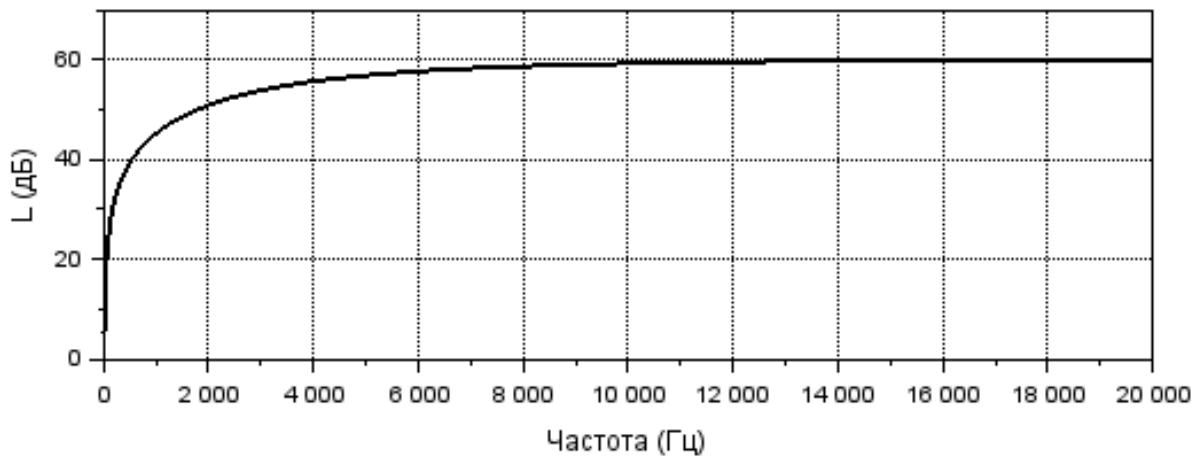


Рис. 3. Уровень звукового давления $L_p = 20 \lg(p/p_0)$ элемента микшера как функция частоты.

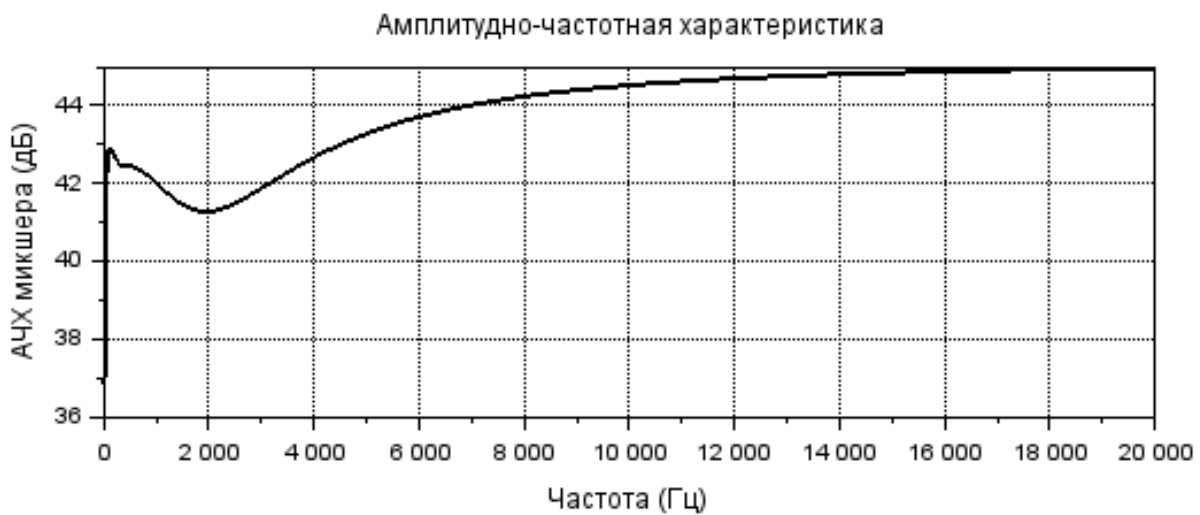


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика микшера в полулогарифмическом масштабе.

Заключение

В работе получены новые данные о распространении звуковых волн в микшерных системах. Исследование физических процессов распространения звуковых волн в аудиосистемах помогает развивать теорию акустики, которая может быть применена в различных областях науки и техники, таких как медицина, акустика помещений, автомобильная акустика. Новые открытия в области акустики позволяют глубже понять механизмы распространения и взаимодействия звуковых волн с различными материалами и средами, что может привести к созданию более эффективных аудиосистем и акустических устройств. Понимание физических свойств процесса распространения звуковых волн в аудиосистемах имеет важное значение для оптимизации аудиотехнологий и позволяет создавать более качественные аудиосистемы и акустические устройства, которые могут быть использованы в процессе разработки новых технологий и улучшения качества звука аудиосистем, применяемых в различных сферах жизни, таких как музыка, кино, телевидение, образование и здравоохранение.


Список использованных источников

1. Gilbert P.U.P.A. Sound waves // Physics in the arts. — Elsevier, 2022. — P. 187–201. — ISBN: 9780128243473. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-824347-3.00010-8>.
2. Sengupta Tapan K., Bhumkar Yogesh G. Acoustic wave equation // Computational aerodynamics and aeroacoustics. — Springer Singapore, 2020. — P. 357–377. — ISBN: 9789811542848. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-4284-8_6.
3. Acoustic wave technology / Nilanjan Dey [et al.] // Acoustic sensors for biomedical applications. — Springer International Publishing, 2018. — jul. — P. 21–31. — ISBN: 9783319922256. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-92225-6_3.
4. Bessonov K. D., Tomchuk K. K. Acoustic systems for information transfer in audible range // 2020 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF). — IEEE, 2020. — jun. — P. 1–5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131531>.
5. Chang Ching-Lung, Cai Meng-Lun, Shiao Yu-Shiang. Sound-wave transmission system in mobile device // IoT as a service. — Springer International Publishing, 2018. — P. 333–339. — ISBN: 9783030004101. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-00410-1_38.

Сведения об авторах:

Алсу Шамилевна Джаббарова — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: dzhabbarova.2005@mail.ru

ORCID iD  0009-0007-0382-5656

Web of Science ResearcherID  LGZ-5000-2024

Original article
PACS 43.20.+g
OCIS 160.1050
MSC 74J30

Investigation of physical processes of sound wave propagation in mixing systems

A. Sh. Dzhabbarova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted January 27, 2026
Resubmitted January 29, 2026
Published March 31, 2026

Abstract. This article examines the physical characteristics of sound processes in audio systems. The aim of the study is to analyze the physical processes of sound wave propagation in mixing systems to optimize their acoustic performance. The motivation for this research lies in the need to improve sound quality in professional audio systems. The research methods include mathematical modeling, experimental measurements, and numerical simulations. The hypothesis is that optimizing the geometry of mixing systems minimizes sound wave distortion. The results demonstrate the dependence of acoustic performance on system parameters, confirming the theoretical significance of the work. The practical significance lies in the potential application of the obtained data to the design of next-generation acoustic systems. The results of numerical calculations of the characteristics of the mixer's acoustic elements are presented.

Keywords: acoustics, acoustic system, audio system, acoustic parameters, sound wave, sound process, mixer, mixing system, numerical calculations

References

1. Gilbert P.U.P.A. Sound waves // Physics in the arts. — Elsevier, 2022. — P. 187–201. — ISBN: 9780128243473. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-824347-3.00010-8>.
2. Sengupta Tapan K., Bhumkar Yogesh G. Acoustic wave equation // Computational aerodynamics and aeroacoustics. — Springer Singapore, 2020. — P. 357–377. — ISBN: 9789811542848. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-4284-8_6.
3. Acoustic wave technology / Nilanjan Dey [et al.] // Acoustic sensors for biomedical applications. — Springer International Publishing, 2018. — jul. — P. 21–31. — ISBN: 9783319922256. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-92225-6_3.
4. Bessonov K. D., Tomchuk K. K. Acoustic systems for information transfer in audible range // 2020 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF). — IEEE, 2020. — jun. — P. 1–5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131531>.

5. Chang Ching-Lung, Cai Meng-Lun, Shiau Yu-Shiang. Sound-wave transmission system in mobile device // IoT as a service.— Springer International Publishing, 2018.— P. 333–339.— ISBN: 9783030004101.— URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-00410-1_38.

Information about authors:

Alsu Shamilevna Dzhabbarova — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: dzhabbarova.2005@mail.ru

ORCID iD  0009-0007-0382-5656

Web of Science ResearcherID  LGZ-5000-2024