

УДК 614.89

РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ СЛУХА С АКТИВНЫМ ШУМОПОДАВЛЕНИЕМ

Сытников В.С., студент гр. ГБмэ-241, 2 курс, Клейков Д.В., студент гр. ГБмэ-241, 2 курс

Научный руководитель: Игнатова А.Ю., к.б.н., доцент

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Производственный шум остаётся одним из основных вредных факторов, вызывающих необратимое поражение слуха и высокую долю профессиональной нейросенсорной тугоухости в РФ, особенно в горнодобывающей и угольной промышленности. В Кемеровской области ПНСТ диагностируется у значительной части работников шумных профессий, что подчёркивает необходимость эффективных средств защиты органов слуха. Цель работы — разработка наушников с активным шумоподавлением, обеспечивающих снижение шума до нормативных значений при сохранении разборчивости речи и соответствии действующим стандартам. [1].

Цель работы — разработка инновационных противושумных наушников с активным шумоподавлением, обеспечивающих снижение производственного шума до нормативно допустимого уровня при одновременном сохранении разборчивости речи, совместимых с иными СИЗ и соответствующих требованиям действующей нормативной базы.

Допустимые уровни шума на постоянных рабочих местах в производственных помещениях — 80 дБА — установлены ГОСТ 12.1.003-2014 [5] «Шум. Общие требования безопасности». Уровни шума на рабочих местах горнодобывающей отрасли нередко составляют 95–110 дБА, что превышает допустимые значения по интенсивности воздействия. Это означает, что применяемые СИЗ должны обеспечивать снижение не менее чем на 15–20 дБА [8].

Обязательная сертификация СИЗ в странах ЕАЭС регулируется Техническим регламентом ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты». Регламент подразделяет СИЗ на два класса по степени риска: первый класс (незначительный риск) подлежит декларированию соответствия, второй класс (защита от необратимого вреда здоровью) — обязательной сертификации. Наушники с интегрированной электроникой активного шумоподавления относятся ко второму классу. По завершении испытаний для легального обращения на рынке ЕАЭС необходимы: сертификат соответствия ТР ТС 019/2011, декларация соответствия ГОСТ Р, санитарно-

эпидемиологическое заключение Роспотребнадзора и обязательная маркировка знаком ЕАС [4].

Требования к испытаниям наушников установлены ГОСТ 12.4.292-2023 «ССБТ. Средства индивидуальной защиты органа слуха. Общие технические требования. Методы испытаний» [7]. Стандарт регламентирует методику измерения коэффициента ослабления шума в диапазоне 63–8000 Гц, требования к механической прочности, стойкости к климатическим воздействиям и гигиенические характеристики изделия.

Ключевой технической идеей разработки является синтез пассивной акустической защиты и активного шумоподавления (Active Noise Cancellation, ANC) в едином изделии. Исходным пунктом послужил анализ частотного спектра промышленного оборудования и голоса человека на рабочих местах целевых отраслей (Горная промышленность). В результате анализа были выявлены частотные диапазоны, в которых речевые сигналы минимально перекрываются с производственным шумом, и на их основе сформулированы требования к акустическим характеристикам мембран [7].

Физическая основа метода активного шумоподавления — принцип деструктивной интерференции звуковых волн. Внешние MEMS-микрофоны непрерывно захватывают акустическую картину окружающей среды и передают сигнал на цифровой сигнальный процессор, который в реальном времени формирует противофазную копию входного шума. При совмещении оригинальной шумовой волны и сгенерированной антифазы происходит их взаимная компенсация — амплитуда результирующего сигнала стремится к нулю. Данный механизм наиболее эффективен в диапазоне низких и средних частот (как правило, до 1–2 кГц), поскольку длина волны на низких частотах значительно превышает расстояние от микрофона до уха.

Пассивная составляющая защиты реализована через многослойные композитные мембраны, герметичные акустические камеры с закрытым задним объёмом и лабиринтные вентиляционные каналы. Высокочастотные компоненты шума эффективнее гасятся именно пассивными элементами конструкции, что и определяет целесообразность комбинированного подхода (рис. 1). Конструкция также предусматривает режим избирательного усиления речевых частот (300–3000 Гц): работники могут воспринимать команды и переговоры, не снимая средства защиты [7].



Рис. 1

Конструкция предусматривает три варианта реализации акустической мембраны по степени технологической сложности [7]:

- базовый вариант — натянутая ПЭТ-плёнка с фетровым акустическим демпфером и герметичным задним объёмом; обеспечивает выраженное подавление низких и высоких частот;
- продвинутый вариант — композитная мембрана из полиимидной плёнки со слоем вязкого акрилового клея; обеспечивает более контролируемый и ровный результат в речевом диапазоне;
- готовое решение — использование драйверов от профессиональных гарнитур (Peltor, David Clark, 3M) в качестве технологической базы.

В качестве аналога для ориентира приняты наушники серии 3M PELTOR Optime III, обеспечивающие показатель снижения шума $SNR = 35$ дБ ($H=40$ дБ, $M=32$ дБ, $L=23$ дБ) согласно официальной технической документации производителя. Данный уровень защиты достигается исключительно пассивными методами; разрабатываемое изделие нацелено на превышение этих показателей за счёт слаженной сцепки активного и пассивного компонента [5].

Разрабатываемое изделие обеспечивает снижение уровня производственного шума с исходных 95–110 дБА до нормативно допустимого значения 80 дБА, установленного ГОСТ 12.1.003-2014. Рабочий диапазон частот составляет 63–8000 Гц; коэффициент звукопоглощения акустических демпферов достигает 0,95 на частоте 1000 Гц. Масса изделия не превышает 250 г, время непрерывной работы в режиме АНС — до 10 часов. Корпус выполнен по стандарту пылевлагозащиты IP54, рабочий температурный диапазон — от -40°C до $+120^{\circ}\text{C}$ [8].

Корпус изделия изготовлен из поликарбоната Lexan 943A (ударопрочность 65 кДж/м², температурная стойкость от -40 до $+120^{\circ}\text{C}$), обеспечивающего жёсткость и виброустойчивость внешней оболочки, и АБС-пластика Polylac PA-756 (жёсткость 2,3 ГПа, устойчивость к химическим реагентам) для внутренних несущих элементов. Амбюшюры выполнены из термопластичного эластомера (TPE) с коэффициентом трения 0,35, обеспечивающего герметичное прилегание,

и медицинского силикона Silastic в зонах контакта с кожей.

Акустическая мембрана представляет собой многослойный композит. Основным конструктивным слоем служит полиимидная плёнка Kapton HN толщиной 25–125 мкм с пределом прочности при разрыве 231 МПа и рабочим диапазоном температур от -269°C до $+400^{\circ}\text{C}$ согласно техническому листу данных DuPont [6]. Демпфирующий слой 3M VHB (вязкоэластичный акриловый клей, коэффициент демпфирования 0,8) гасит резонансы в низко- и высокочастотном диапазонах. Несущим элементом выступает алюминиевая фольга толщиной 50 мкм с пределом прочности 250 МПа.

Электронный модуль построен на микроконтроллере STM32F407VG (ARM Cortex-M4, 168 МГц, аппаратный блок FPU и DSP-инструкции, 1 МБ Flash, 192 КБ SRAM), аудиокодеке CS47L15 (динамический диапазон 110 дБ, частота дискретизации 192 кГц) и MEMS-микрофонах с чувствительностью -26 дБ и SNR 64 дБ. Наличие FPU и аппаратных DSP-инструкций позволяет реализовать алгоритмы адаптивной фильтрации ANC в реальном времени при частоте дискретизации 96 кГц. MEMS-микрофоны превосходят традиционные

ЕСМ-аналоги по устойчивости к вибрационным нагрузкам, габаритам и повторяемости параметров в серийном производстве.



Рис. 2

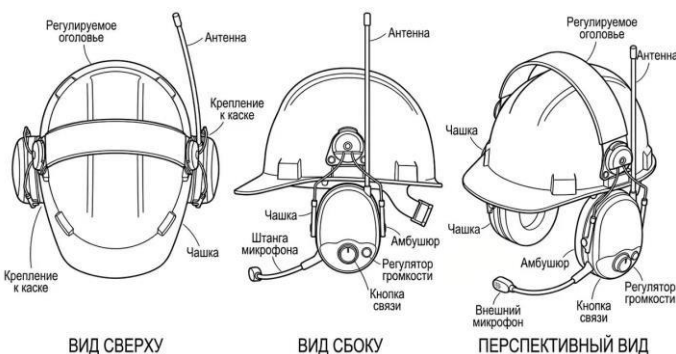


Рис. 3

Производственный цикл разработки охватывает три последовательных этапа общей продолжительностью 135 дней.

Этап 1 — Проектирование и моделирование (45 дней). Работа ведётся параллельно по двум направлениям. Акустическое моделирование в среде COMSOL Multiphysics и ANSYS Acoustics включает анализ спектра шумов промышленного оборудования, математическое моделирование частотных характеристик мембран при различном составе слоёв и оптимизацию геометрии акустических камер. Конструкторское проектирование в SolidWorks и Fusion 360 предусматривает разработку 3D-модели корпуса, прочностные расчёты методом

конечных элементов (МКЭ) и эргономический анализ совместимости с каской, очками и респираторами.

Этап 2 — Изготовление прототипов (60 дней). Корпусные детали изготавливаются на специальном оборудовании с точностью 25 мкм и последующим вакуумным литьём силиконовых форм. Акустические мембраны производятся лазерной резкой полиимидной плёнки на гравировальном станке с точностью 10 мкм; слои соединяются методом центрифугирования с последующей ламинацией в вакуумном прессе при температуре 80°C.

Этап 3 — Сборка и тестирование (30 дней). Электронная сборка осуществляется методом поверхностного монтажа (SMT); после монтажа производятся программирование микроконтроллера и калибровка системы АНС путём настройки коэффициентов адаптивных фильтров. На финальном этапе устанавливаются электронные модули, монтируются акустические демпферы, проводятся балансировка и регулировка прижимного усилия амбушюров.

Реализация проекта сопровождается рядом потенциальных рисков. Технические риски: возможность нестабильной работы системы АНС при сильных вибрациях и сложности в обеспечении степени защиты IP54 при размещении электроники внутри корпуса. В качестве мер снижения риска предусматриваются виброиспытания в профильных научно-исследовательских организациях и использование герметизирующих компаундов. Временные риски: вероятность задержки прохождения сертификации и перебои в поставках электронных компонентов. Снижение этих рисков достигается за счёт предварительных договорённостей с аккредитованными испытательными центрами и формирования страхового запаса комплектующих на 6 месяцев. Рыночные риски: ограниченная платёжеспособность небольших предприятий, не готовых к единовременным затратам на закупку средств защиты. Для компенсации предлагаются лизинговые схемы и рассрочка платежей.

В настоящей работе представлены концепция, инженерное решение, технические характеристики и экономическое обоснование инновационных средств индивидуальной защиты органов слуха с комбинированной пассивно-активной системой шумоподавления. Предложенная архитектура позволяет решить ключевое противоречие существующих СИЗ — между эффективной шумоизоляцией и сохранением разборчивости речи — за счёт частотно-избирательного характера обеих систем защиты.

Применение микроконтроллера STM32F407VG с аппаратной поддержкой DSP-вычислений и аудиокодека CS47L15 обеспечивает реализацию алгоритмов адаптивной фильтрации в реальном времени, что позволяет достигнуть снижения производственного шума на 15-20 дБА, теоретически на 30 дБА, при исходных 95–110 дБА. Многослойные акустические мембраны на основе полиимидной плёнки Kapton HN в сочетании с демпфирующим слоем 3M VHB обеспечивают эффективную пассивную защиту в высокочастотном диапазоне, дополняя

активную систему подавления низких и средних частот [8].

Разработанное изделие соответствует требованиям ТР ТС 019/2011 и ГОСТ 12.4.292-2023 по основным параметрам; программа испытаний охватывает полный цикл акустических, механических, климатических и электротехнических проверок с последующим 30-дневным полевым этапом [9]. Техничко-экономическое обоснование подтверждает рентабельность проекта: расчётный срок окупаемости — 14–20 месяцев, точка безубыточности — 783 единицы, потенциальная ёмкость целевого рынка — 160 000 шт./год. Благоприятная рыночная конъюнктура (рост рынка СИЗ до 330 млрд руб., доля отечественной продукции 87%) формирует устойчивые перспективы коммерциализации разработки [7].

Основная конкурентоспособность наушников заключается в комбинированной пассивно-активной системе шумоподавления, настроенной на спектр реального шума горнодобывающих и металлургических предприятий при одновременном сохранении разборчивости речи в диапазоне 300–3000 Гц. Дополнительно их выделяют термостойкая и виброустойчивая конструкция с малой массой, совместимостью с другими СИЗ и выраженным экономическим эффектом для предприятия (снижение профзаболеваемости, страховых выплат и короткий срок окупаемости)

Список литературы

1. Панкова В.Б., Вильк М.Ф., Федина И.Н., Бухтияров И.В., Дайхес Н.А., Таварткиладзе Г.А., Волохов Л.Л. Новые критерии профотбора и профпригодности по слуху для работы в условиях воздействия производственных вредностей // Вестник оториноларингологии. — 2022. — Т. 87, № 3. — С. 57–63.
2. Косарев В.В., Бабанов С.А. Профессиональная нейросенсорная тугоухость // Медицинский совет. — 2014. — № 3. — С. 76–80. — URL: <https://www.med-sovet.pro/jour/article/view/1046> (дата обращения: 01.03.2026).
3. Сюрин С.А. Производственный шум и профессиональная тугоухость на предприятиях Арктической зоны России // Безопасность и охрана труда. — 2020. — № 1. — URL: <https://biota.ru/publishing/magazine/bezopasnost-i-oxrana-truda-№1,-2020/> (дата обращения: 03.03.2026).
4. Дьякович М.П., Семенихин В.А., Раудина С.Н. Качество жизни, связанное со здоровьем, у пациентов с сенсоневральной тугоухостью профессионального генеза // Медицина в Кузбассе. — 2017. — Т. 16, № 4. — С. 80–85. — URL: <https://mednauki.ru/index.php/MK/article/view/158> (дата обращения: 03.03.2026).
5. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. — Введ. 2015-11-01. — М. : Стандартинформ, 2015. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606> (дата обращения: 03.03.2026).

6. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты» : утв. решением Комиссии Таможенного союза от 9 дек. 2011 г. № 878 (с изм. на 28 мая 2019 г.). — URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320567> (дата обращения: 01.03.2026).
7. ГОСТ 12.4.292-2023. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органа слуха. Общие технические требования. Методы испытаний. — Введ. 2013-07-01. — М. : Стандартинформ, 2013. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008458> (дата обращения: 03.03.2026).
8. ANC — активное шумоподавление: как оно работает [Электронный ресурс] // edu.partnertele.com. — 2026. — URL: <https://edu.partnertele.com/ru/anc> (дата обращения: 03.03.2026).
9. Григорьев Д.И., Козырь А.В. МЭМС-микрофоны // Микроэлектроника. — 2020. — Т. 49, № 1. — С. 40–45. — URL: <https://sciencejournals.ru/viewarticle/?j=mikelek&y=2020&v=49&n=1&a=MikElek2001008Grigorev> (дата обращения: 01.03.2026).