



УДК 53.082.4

МРНТИ 59.39.29

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_38_3_3

Т.Д. Әбдіматова^{1*}, И.В. Васильев¹

¹Академия Гражданской Авиации,
Алматы, Казахстан

*E-mail: t.abdimatova@agakaz.kz

ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРИБОРА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ МЕХАНИЗМОВ

Аннотация. В статье представлены результаты анализа нормативных документов, регламентирующих применение ультразвуковых методов диагностики машин и механизмов, а также проведено сопоставление с действующими стандартами в области звуковых частот. Такой подход позволил выявить различия между областями применения и определить возможности практического использования существующих норм при разработке новых диагностических приборов.

Особое внимание уделено обзору измерительных приборов ультразвуковой частоты, которые в настоящий момент можно приобрести. Установлено, что большинство приборов обладают ограниченными функциональными возможностями и высоким уровнем стоимости. Так, отдельные устройства способны регистрировать ультразвуковые сигналы и указывать направление на их источник, однако визуализация сводится лишь к отображению локализованной точки, что не позволяет фиксировать физические параметры сигнала и динамику его распространения в среде. Эти ограничения существенно сужают возможности комплексной диагностики.

Основной целью статьи является формирование требований к характеристикам перспективного прибора для ультразвуковой диагностики механизмов, который должен объединять функции регистрации частотных параметров и пространственной визуализации ультразвукового поля.

Показано, что существующие приборы ориентированы лишь на поиск источника сигнала. Обоснована необходимость создания приборов нового поколения, которые позволят визуализировать ультразвуковое поле в пространстве и обеспечат более полное проведение диагностики машин и механизмов, включая раннее выявление скрытых дефектов и потенциальных отказов. Для авиационной отрасли выполнение данных требований имеет особую значимость, так как напрямую связано с обеспечением высокого уровня безопасности полётов.

Ключевые слова: ультразвуковая диагностика, неразрушающий контроль (NDT), авиационная безопасность, MEMS-микрофон, техническая диагностика, акустическая визуализация, требования к приборам, надежность механизмов.

Введение.

Техническая диагностика представляет собой ключевое направление в обеспечении надежности и долговечности функционирования современных инженерных и технологических систем. В условиях ускоренного развития техники, цифровизации и

автоматизации производственных процессов особую значимость приобретает своевременное выявление потенциальных неисправностей и отклонений от нормативных параметров. Диагностические процедуры позволяют решать широкий спектр задач, включающий идентификацию текущего состояния оборудования, прогнозирование остаточного ресурса, а также формирование научно обоснованных решений о целесообразности проведения регламентного или внепланового технического обслуживания. Применение методов диагностики осуществляется как в условиях производственных испытаний, так и в процессе эксплуатации сложных технических объектов.

Особое значение своевременная диагностика приобретает в авиационной отрасли, где надежность функционирования систем и агрегатов напрямую связана с безопасностью полетов. Авиационные происшествия и аварийные ситуации, как правило, имеют мультифакторный характер, однако одной из основных причин их возникновения выступает несвоевременное выявление и устранение технических дефектов. Современные методы диагностирования, включающие мониторинг эксплуатационных параметров, анализ вибрационных и акустических характеристик, а также использование систем прогнозирования на основе искусственного интеллекта, позволяют существенно снизить вероятность аварийных отказов. Таким образом, внедрение комплексных диагностических систем в практику технической эксплуатации воздушных судов является необходимым условием повышения уровня авиационной безопасности и минимизации связанных с ней техногенных рисков.

Материалы и методы исследования.

Мониторинг технического состояния машин и механизмов выступает неотъемлемым элементом системы технического обслуживания и ремонта. К ключевым его задачам относятся контроль эксплуатационных параметров, оценка уровня износа узлов и агрегатов, а также предупреждение аварийных ситуаций. Современные подходы к организации мониторинга регламентируются международными стандартами, которые нашли широкое применение и в отечественной практике. Исследования в области диагностики и прогнозирования неисправностей машин стремительно развиваются [19].

Авиастроительная отрасль служит образцом прецизионной инженерии и строгих стандартов безопасности. Самолёты, будь то коммерческие, военные или частные, представляют собой сложные технические системы, построенные по жёстким спецификациям. Обеспечение их структурной целостности, надёжности и безопасности имеет первостепенное значение, а методы неразрушающего контроля (Nondestructive Testing – NDT) выступают незаменимыми инструментами для достижения этих целей. В отличие от традиционных разрушающих испытаний, NDT сохраняет целостность объекта, обеспечивая возможность дальнейшей эксплуатации [13].

Сегодня существует широкий спектр методов диагностики авиационных машин и механизмов: капиллярный и магнитопорошковый контроль, вихретоковый анализ, ультразвуковое тестирование, радиографическая инспекция. Каждый из них играет важную роль в обнаружении скрытых дефектов, продлении ресурса агрегатов, снижении эксплуатационных затрат и повышении уровня лётной годности [16]. Появление современных измерительных приборов и технологий, которых ранее не существовало, расширяет возможности диагностики, позволяя проводить исследования с большей точностью и детализацией. Интеграция новых цифровых систем, датчиков и методов обработки сигналов, включая машинное обучение и компьютерное зрение, открывает перспективы для более глубокого анализа состояния конструкций и агрегатов [2,3]. Это обеспечивает авиационным специалистам возможность принимать более обоснованные решения, направленные на повышение надёжности и безопасности полётов.

Ультразвуковой контроль является широко признанным методом неразрушающего контроля компонентов воздушных судов. Он обеспечивает как локальный

высококчувствительный контроль вблизи датчика, так и оценку конструкции на большом расстоянии. Ультразвуковой контроль обычно используется в качестве основного инструмента для активного контроля компонентов самолета, таких как крышки двигателей, обшивка крыльев и фюзеляжей, с целью обнаружения, локализации и описания расслоений, пустот, обрывов волокон и волнистости слоев [15].

Ультразвук – упругие звуковые колебания высокой частоты. Человеческое ухо воспринимает распространяющиеся в среде упругие волны частотой приблизительно до 16 Гц-20 кГц, а колебания с более высокой частотой, представляющие собой ультразвук, обладают более короткими длинами волн, что позволяет детектировать дефекты меньшего размера.

Особый интерес представляет *пассивная ультразвуковая диагностика*, при которой прибор не излучает сигналы, а лишь регистрирует ультразвуковые волны. Такой подход позволяет не вмешиваться в работу оборудования, не создавать помех и не тратить энергию на генерацию сигнала. Пассивная ультразвуковая диагностика уже используется в медицине (например, пассивная ультразвуковая томография), в неразрушающем контроле конструкций [35], а также для выявления утечек газа, работы клапанов и локализации акустических источников в машиностроении и авиастроении [18]. На рисунке 1 приведён пример акустической визуализации работы двигателей самолёта в процессе полёта.

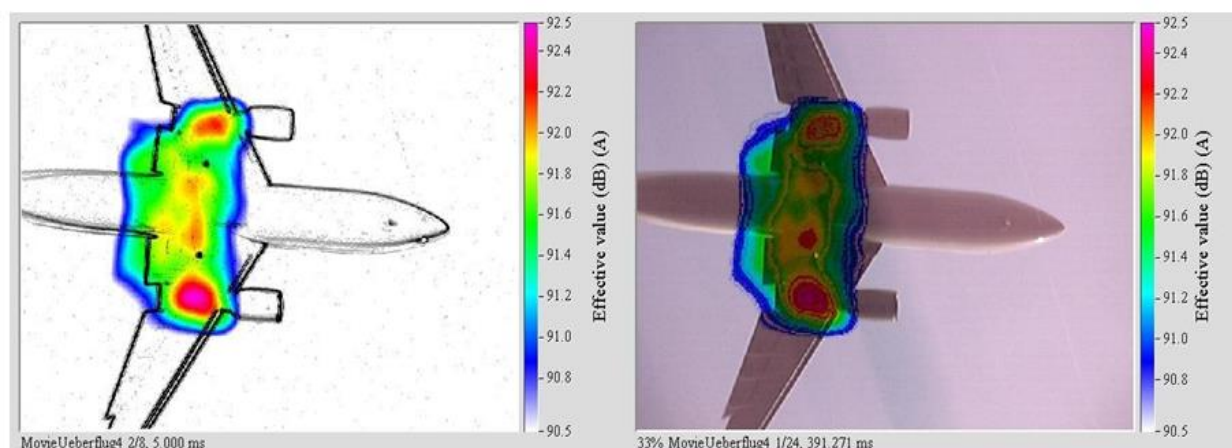


Рисунок 1 – Пример акустической визуализации источника звука

Показательным примером является ультразвуковая диагностика подшипников, где возникающие при износе или повреждении элементов характерные ультразвуковые колебания фиксируются на ранней стадии и служат надёжным критерием для прогнозирования их ресурса [4]. Ниже приведены некоторые ориентировочные критерии оценки, основанные на измерениях превышения уровня ультразвука заданного значения (базового уровня), для подшипников машин вращательного действия.

- предотказное состояние (превышение на 8 дБ). Такой уровень сигнала свидетельствует о зарождающихся неисправностях, например о волосных трещинах или микроскопических точечных дефектах в подшипнике, невидимых человеческим глазом. Достижение данного уровня может также служить сигналом о необходимости добавить смазки в подшипник;

- состояние отказа (превышение на 16 дБ). Такой уровень сигнала свидетельствует о наличии видимых дефектов, появление которых сопровождается заметным повышением акустической энергии и началом роста температуры подшипника. По достижении данного уровня может потребоваться замена подшипника или увеличение частоты контроля;

В области энергетики пассивная ультразвуковая диагностика применяется для мониторинга состояния арматуры, турбин и трансформаторов [12]. В транспортной

промышленности пассивный контроль используется для диагностики подвижного состава, элементов тормозной системы и подвески. Также технологии пассивной ультразвуковой диагностики находят применение в робототехнике, например, для определения состояний приводов и сервомеханизмов [10,11].

Одной из ключевых проблем практического применения ультразвуковых методов долгое время являлось отсутствие компактных и удобных в эксплуатации инструментов, обеспечивающих оперативное выявление источников ультразвуковых колебаний и их точную локализацию. Традиционные системы диагностики требовали значительных затрат времени и высокой квалификации персонала, что снижало эффективность их использования в условиях реальной эксплуатации авиационной техники и промышленных объектов. В последние годы ситуация начала меняться: появились специализированные приборы нового поколения, способные в режиме реального времени фиксировать ультразвуковые сигналы, определять координаты их источников и представлять результаты в наглядной форме. Однако следует отметить, что стоимость таких устройств остаётся высокой, что ограничивает их широкое распространение и применение в промышленности, особенно на предприятиях с ограниченными финансовыми ресурсами.

Ниже в таблице 1 представлены приборы, используемые для ультразвуковой диагностики.

Таблица 1 - Приборы для измерения ультразвука

Устройство	Частоты	Параметры измерений	Особенности	Цена (USD)	Использование
Ultraprobe 9000	20–100 кГц	Давление акустических сигналов	Модули сканера и стетоскопа, память	~5200–6500\$	Контроль утечек, состояния подшипников, клапанов
SONAPHONE Pocket	~40 кГц	Давление акустических сигналов	Компактный, сменные зонды, IP54	~2000–3000\$	Лёгкий контроль утечек, частичных разрядов
FLIR Si124 (рисунок 2)	2–65 кГц	Давление акустических сигналов	Захват изображения + ультразвук	~14000–16000\$	Полевая визуализация, диагностика на расстоянии



Рисунок 2 - Прибор FLIR Si124

В данной работе ставится задача разработки требований к техническим характеристикам недорогого прибора для ультразвуковой диагностики механизмов и оборудования воздушных судов и наземной инфраструктуры гражданской авиации. Создание такого устройства позволит проводить оперативную проверку авиационной техники и будет способствовать повышению уровня безопасности полётов. Для этой цели необходимо провести анализ методов измерения звуковых и ультразвуковых колебаний и анализ технических характеристик приборов аналогичного назначения.

Результаты и их обсуждение.

Поскольку звук и ультразвук представляют собой процессы механических колебаний и волн в упругих средах, многие акустические величины измеряются в соответствующих механических единицах: период и частота колебаний, длина звуковой волны, скорость ее распространения и т.д. Согласно ГОСТ 8.417-2024 рекомендуется употреблять единицы системы СИ указанные в таблице 2.

Таблица 2 – Единицы системы СИ согласно ГОСТ 8.417-2024

Наименование величины	Единицы измерения
Звуковое давление	Па
Объемная скорость	м ³ /с
Акустическое сопротивление	Н×с/м
Механическое сопротивление	Н×с/м ³
Интенсивность звука	Вт/м ²
Плотность звуковой энергии	Дж/м ³
Звуковая энергия	Дж
Звуковая мощность	Вт

Внесистемная единица «октава» выражает частотный интервал, в котором отношение большей частоты к меньшей равно 2. Чувствительность ультразвуковых электроакустических приёмников измеряется в вольтах на паскаль. Иногда употребляют и

другие комбинации электрических и акустических единиц для выражения чувствительности [7].

Уровнем звукового давления L_p (дБ) называют десятичный логарифм отношения квадрата звукового давления, измеренного в соответствии с требованиями ГОСТ 30683-2000, к опорному звуковому давлению p_0 ($p_0 = 20$ мкПа).

Измерения уровней звукового давления проводят в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 125 Гц до 8000 Гц; в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 100 Гц до 10000 Гц или в более узких полосах при необходимости. Допускаются измерения на более низких или более высоких частотах, если они проводятся на открытой площадке или в помещении, объём которого превышает 300 м³. В помещениях и камерах объёмом более 300 м³ допускается проводить измерения в октавной полосе частот 63 Гц или в третьоктавных полосах частот от 50 до 80 Гц.

Нормируемыми параметрами постоянного шума являются уровни звукового давления L , дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами: 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц. Для ориентировочной оценки допускается использовать уровни звука L_A , дБА. Нормируемыми параметрами непостоянного шума являются эквивалентные (по энергии) уровни звука $L_{Aэкв}$ (дБА) и максимальные уровни звука $L_{Aмакс}$ (дБА). Оценка непостоянного шума на соответствие допустимым уровням должна проводиться одновременно по эквивалентному и максимальному уровням звука. Превышение одного из показателей должно рассматриваться как несоответствие нормам.

Практическое применение ультразвука в диагностике машин и механизмов требует не только точных методов измерений, но и строгой регламентации, закреплённой в национальных и международных стандартах. Эти нормативные документы устанавливают единые правила проведения испытаний, обработки результатов и оценки технического состояния оборудования. В таблице 3 представлены основные стандарты, регламентирующие применение ультразвуковых методов диагностики в машиностроении и смежных отраслях.

Таблица 3 – Нормативные документы, регламентирующие применение ультразвука для диагностики механизмов и машин

№	Документ	Назначение	Особенности
1	ГОСТ Р ISO 29821-1-2015 «Контроль состояния и диагностирование машин с использованием воздушного и конструкционного ультразвука. Часть 1. Общие положения»	Устанавливает общие требования к методам пассивной ультразвуковой диагностики для машин и механизмов в диапазоне от 20 до 100 кГц.	Включает измерения SPL (Sound Pressure Level) (дБ, относительно 20 мкПа), 1/3-октавный анализ, требования к микрофонам и датчикам, условия калибровки [16].
2	ГОСТ 23829-85 «Контроль неразрушающий. Акустические методы»	Регламентирует методы акустического контроля изделий в диапазоне до 10 МГц для выявления дефектов.	Предусматривает импульсные и резонансные методы, требования к частоте и энергии сигнала.
4	ISO 29821-1:2011	Международный аналог ГОСТ Р ИСО 29821-1, определяет требования к диагностике машин по ультразвуковым сигналам.	Дополнительно содержит рекомендации по усреднению данных и фильтрации помех.

5	ISO 29821-2:2016	Устанавливает процедуры обработки и интерпретации ультразвуковых измерений.	Методы исключения ложных сигналов, алгоритмы подавления отражений [8].
7	ГОСТ 12.1.001-89 «Система стандартов безопасности труда. Ультразвук. Общие требования безопасности»	Регламентирует уровни ультразвукового давления в воздухе, воде и твердых телах.	Частоты от 12.5 кГц до 100 кГц, третьоктавный анализ.
8	ГОСТ 12.1.028-80 «Оборудование технологическое ультразвуковое. Требования безопасности»	Требования к безопасной эксплуатации промышленного УЗ-оборудования.	Рабочие частоты выбираются по ГОСТ 16165-80 и ГОСТ 13952-77.
9	ISO 20906:2009 «Acoustics — Unattended monitoring of aircraft sound»	Автоматический мониторинг авиационного шума вблизи аэропортов.	Системы постоянного контроля с пороговыми алгоритмами.
10	ISO 1996-1:2016 «Description, measurement and assessment of environmental noise»	Описание и оценка шума на местности.	Методы расчёта эквивалентных уровней и оценки тональности.
11	ISO 9612:2009 «Determination of occupational noise exposure»	Оценка шумового воздействия на рабочих местах.	Инженерные методы измерения и расчёта шумовой дозы.
12	IEC 61672-1:2013 «Electroacoustics — Sound level meters»	Классификация и требования к шумомерам.	Классы точности 1 и 2, частотные корректировки A, C, Z.
13	ГОСТ 31170-2003 «Шум. Методы измерения»	Методы измерений акустических параметров на местности.	Определение LAeq, LAFmax, спектральных составляющих.
14	ISO 18405:2017 «Underwater acoustics — Terminology»	Термины и определения подводной акустики.	В том числе ультразвук в водной среде [9].

В этих нормативных документах основное внимание уделяется обеспечению точности и достоверности (повторяемости) измерений. Нормы предусматривают возможность использования как переносных, так и стационарных измерительных приборов. В документе ГОСТ Р ISO 29821-1-2015 «Контроль состояния и диагностирование машин с использованием воздушного и конструкционного ультразвука. Часть 1. Общие положения» указывается, что для практики удобнее использовать переносные приборы. Отмечается влияние интерференции (за счёт переотражений сигналов от местных предметов и операторов), способной серьёзно влиять на качество измерений и даются рекомендации по уменьшению этих влияний. Отмечается необходимость регистрации не только уровней сигналов, но и их формы (спектра) в октавных и третьоктавных полосах, а в некоторых случаях и в более узких полосах. При этом верхний диапазон частот ультразвуковых колебаний может достигать десятков мегагерц.

В проведённом обзоре методов измерения звуковых и ультразвуковых колебаний не рассматриваются вопросы определения местоположения источника сигнала, что логически

подводит к необходимости анализа технических характеристик приборов, используемых для регистрации источников ультразвука. На основе данного анализа становится возможным провести сопоставление приборов аналогичного назначения, что послужит основой для формирования требований к разработке нового, более доступного и удобного в эксплуатации устройства. В таблицах 4, 5, 6 приведены технические характеристики существующих приборов [5,6,20]

Таблица 4 – Технические характеристики прибора FLIR Si124

Акустические характеристики	
Акустические измерения	124 малошумных микрофона MEMS, визуализация звука в реальном времени
Чувствительность, погрешность	<0 дБ
Динамический диапазон	>120 дБ
Диапазон рабочих частот	от 2 кГц до 31 кГц, регулируемый диапазон
Дистанция	от 0,3 м (1,0 фута) до 100 м (328 футов)
Пользовательский интерфейс	
Дисплей	Размер: 5 дюймов, 800 × 480 Цвет: 24-битный RGB Яркость: 1000 кд/м ² (регулируемая)
Устройство ввода	Резистивный сенсорный экран
Разрешение видеозображения	1640 × 1234
Частота видеок кадров	25 кадров в секунду
Частота кадров акустического изображения	30 кадров в секунду
Связь и хранение данных	
Беспроводная передача данных	Wi-Fi 2,4 ГГц и беспроводная локальная сеть 5 ГГц IEEE 802.11.b/g/n/ac
Хранение, внутреннее	SD-карта 32 ГБ, несъемная
Хранение, внешнее	USB-накопитель 8 ГБ, поставляемый вместе с устройством
Источник питания	
Номинальное входное напряжение	12 В Максимальный входной сигнал: 15 В, 2 А
Внешняя батарея	LiFePO 12 В, 7 Ач, 84 Втч Использование: 7 ч (зависит от внешних условий) Время заряда: от 4 до 6 ч
Зарядное устройство	Вход: 100-240 В, ~ 50/60 Гц, 1,5 А Максимальные параметры входа: 13,8 В; 4,0 А
Внутренняя батарея (только для резервного использования камеры)	Литий-ионная 6 Втч
Параметры окружающей среды	
Диапазон рабочих температур и температур хранения	Рекомендуется от -10°C до 50°C
Влажность при эксплуатации и хранении	Рекомендуется от 0 до 90%
Физические характеристики	
Размер камеры	273 × 170 × 125 мм
Вес камеры	Камера: 980 г
Вес батареи	985 г
Общий вес, включая вспомогательное оборудование	2,9 кг

Таблица 5 – Технические характеристики прибора Crysound Cry 2624M

Количество каналов	128 каналов
Диапазон частот	2 кГц ~ 48 кГц
Порт	RJ45
Частота кадров	25FPS
Расстояние	0.5~50 м
Вес	Около 1.3 кг
Размеры	183 мм X 169 мм X 85.35 мм
Сохранение данных	8G внутренняя память, 64G TF карта расширение
Рабочая температура	-10°C~+50°C
Питание	DC12-20V
Потребляемая мощность	около 14 Вт

Таблица 6 – Технические характеристики прибора UE-Systems ULTRAPROBE 9000

Конструкция	Ручной, в форме пистолета блок измерений из окрашенного алюминия и АВС-пластика
Частота	От 20 до 100 кГц (настраиваемая с шагом 1 кГц)
Время отклика	< 10 миллисекунд
Дисплей	ЖК-дисплей 2 строки x 16 символов со светодиодной подсветкой
Рабочая температура	От 0 до 50°C
Выходы	Калиброванный гетеродинный выход, уровень сигнала в дБ, USB порт вывода данных
Зонды	Сканирующий модуль Trisonic и модуль стетоскопа
Индикаторы	дБ, частота, состояние батареи и 16-ти сегментная столбиковая диаграмма
Чувствительность	Детектирование утечек диаметром 0,127 мм при давлении 0,34 бара на расстоянии 15,24 м
Габаритные размеры	Полный комплект в фирменном алюминиевом кейсе для переноски: 47 x 37 x 17 см
Масса	1 кг

Самым простым по конструкции устройством является изделие UE-Systems ULTRAPROBE 9000 с одним микрофоном и рупорной приёмной антенной, выполненное в виде «пистолета». Направление на источник ультразвука определяется по максимуму сигнала. Сканирование пространства осуществляет оператор, поочерёдно направляя рупор в различных направлениях. Более сложные и дорогие устройства оснащены фазированными акустическими решётками более чем из 100 микрофонов, и совмещены с видеокамерой, позволяющей совмещать видео и акустическое изображение, что более подходит для целей диагностики машин и оборудования. Конструкция и расположение микрофонной решётки не раскрывается.

В научных статьях приводятся самые разные конструкции приёмных акустических решёток, используемых исследователями (рисунок 3).

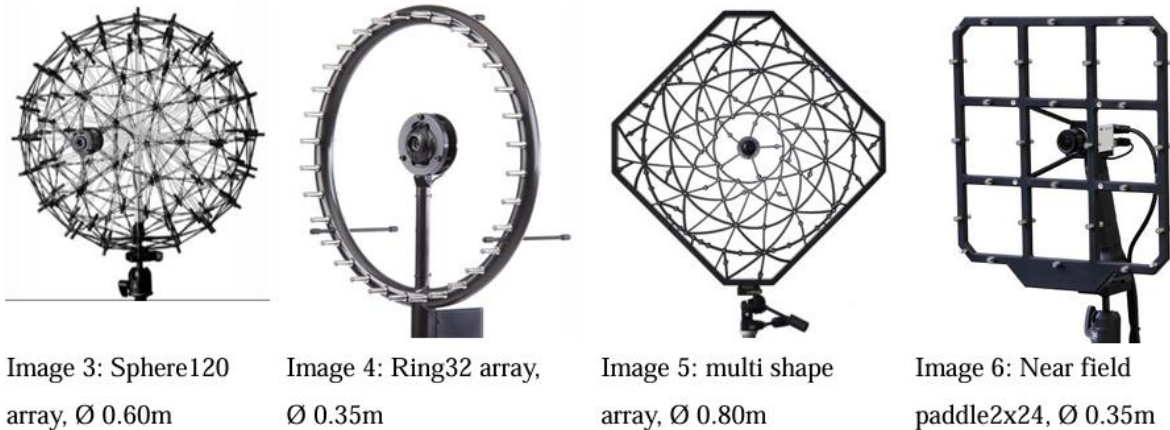


Рисунок 3 – Конструкции микрофонных решёток, совмещённые со средством фиксации видеоизображения

Конкретный вариант микрофонной решётки, очевидно, должен стать объектом дополнительных исследований, хотя имеются работы [14,17], в которых приводится информация о возможности получения приемлемых для практики результатов с решётками из 4 микрофонов.

Верхний диапазон рабочих частот у рассмотренных приборов от 31 до 100 кГц. Так как приборы имеют примерно одно назначение, то жёстких требований по верхней граничной частоте, очевидно, не существует. Производители применяли доступные ультразвуковые микрофоны.

В качестве сенсорного элемента для перспективного прибора нами предлагается микрофон SPU0410LR5H-QB-7 производства Knowles, относящийся к серии SiSonic™. Данный MEMS-сенсор обладает широким частотным диапазоном (100 Гц – 80 кГц), что обеспечивает регистрацию как звуковых, так и ультразвуковых сигналов. Микрофон имеет высокую чувствительность (–38 дБ при 94 дБ SPL) при низком энергопотреблении (160 мА при напряжении 1,5–3,6 В). Компактные размеры, всенаправленность, конструктивное исполнение микрофона и низкая цена (820 тенге) делают его привлекательным компонентом для интеграции в портативный диагностический прибор, предназначенный для локализации источников ультразвука и измерения их интенсивности [1].

На основе проведенного анализа были определены ключевые технические требования к системе. Она должна обеспечивать измерение сигналов в диапазоне от 100 Гц до 80 кГц и иметь функцию локализации источников ультразвуковых сигналов с использованием не менее четырех микрофонов. Необходима возможность как спектрального анализа интенсивности, так и измерения самой интенсивности сигналов. Данные должны сохраняться во внутренней памяти устройства и на внешних носителях. Конструкция предполагается портативной, удобной для использования одним человеком, но при этом допускающей стационарную установку. Устройство должно иметь степень защиты корпуса не ниже IP54 для эксплуатации в цехах и ангарах, а питание осуществляться от сети 220 В/50 Гц.

Приведенные результаты анализа современных подходов к технической диагностике показали её ключевую роль в обеспечении надёжности инженерных систем. В анализе особый акцент был сделан на авиационной отрасли, где своевременное выявление неисправностей напрямую связано с безопасностью полётов и минимизацией эксплуатационных рисков.

Приведенные результаты анализа методов ультразвукового контроля показали его эффективность в обнаружении скрытых дефектов материалов, утечек и электрических разрядов. Ультразвук, как метод неразрушающего контроля, позволяет проводить

обследование без повреждения объекта и является одним из наиболее востребованных инструментов диагностики авиационной техники.

В приведенных результатах анализа требований к новому прибору для ультразвуковой диагностики ключевыми параметрами были определены: диапазон частот 100 Гц - 80 кГц, возможность локализации источников ультразвука, спектральный анализ сигналов, визуализация акустического поля, портативность. Данные характеристики позволяют проводить измерения в условиях авиаремонтного завода №405.

Заключение.

В статье представлены результаты анализа современных методов и приборов технической диагностики, которые подтвердили высокую эффективность ультразвукового контроля для выявления скрытых дефектов и неисправностей. Особое внимание уделено авиационной отрасли, где своевременное обнаружение повреждений напрямую связано с безопасностью полётов.

Представлены результаты анализа характеристик существующих технических решений (FLIR Si124, Crysound Cry 2624M, UE-Systems ULTRAPROBE 9000) и нормативной базы по акустическим измерениям, которые позволили сформировать технические требования к перспективному прибору для проведения научных исследований по диагностике авиационного оборудования.

В качестве сенсорной базы был выбран недорогой MEMS-микрофон SPU0410LR5H-QB-7 (Knowles, серия SiSonic™), доступный в Казахстане. Он обладает широким частотным диапазоном (100 Гц – 80 кГц), высокой чувствительностью и низким энергопотреблением.

Благодарности.

Авторы выражают искреннюю благодарность АО «Авиаремонтный завод № 405» и главному инженеру предприятия Кариеву Дильшоду Хошимовичу за оказанные консультации и активное участие в обсуждении возможного прибора, что существенно способствовало уточнению направления исследования.

Список литературы

1. Абдиматова, Т. Д. (2025). Ультразвуковой мониторинг биологических и техногенных процессов. В VIII Международный научно-технический форум СТНО-2025. Сборник трудов (Т. 6, с. 269).
2. Bardis, K., Avdelidis, N. P., Ibarra-Castanedo, C., Maldague, C. P. V., & Fernandes, E. (2025). Advanced diagnostics of aircraft structures using ultrasound, thermography, eddy current, and ML. Applied Sciences. MDPI. <https://www.mdpi.com>
3. Berri, P. C., Matteo, D. L., Dalla Vedova, & Mainini, L. (2020). Computational framework for real-time diagnostics and prognostics of aircraft actuation systems. arXiv preprint. <https://arxiv.org>
4. Вибрационная диагностика машин и оборудования: Учебное пособие. (2015). Красноярск: Красноярский государственный технический университет.
5. FLIR Systems. (2025, 1 августа). FLIR Si2 (Industrial Acoustic Imaging Camera). <https://www.flir.com/products/si2-pro>
6. Global Test Supply. (2025, 20 июня). Официальный сайт. <https://www.globaltestsupply.com>
7. Голямина, И. П. (1979). Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Москва: Советская энциклопедия.
8. ISO 29821-2:2016. (2016). Condition monitoring and diagnostics of machines — Ultrasonic techniques — Part 2: Procedures to determine and assess measurement results. Geneva: ISO.
9. ISO 18405:2017. (2017). Underwater acoustics — Terminology. Geneva: ISO.

10. Laurijssen, D., Daems, W., & Steckel, J. (2024, February). HiRIS: An airborne sonar sensor with a 1024 channel microphone array. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/2402.12345>
11. Lu, Y. (1992). Real-time weld defect detection using ultrasonic methods (Doctoral dissertation). Brunel University, School of Engineering and Design.
12. Mast, T. D., Pucke, A., & Iskander, M. F. (2009). Passive imaging of cavitation acoustic emissions with ultrasound arrays. *AIP Conference Proceedings*, 1092(1), 126–130. DOI: 10.1063/1.3085725
13. Özlem, U., Furkan, E., & Elif, E. (2024). Non-destructive testing methods commonly used in aviation. *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, 5(1), 10–22.
14. Сдвижкова, Е. А., Головкин, Ю. Н., Нурпеисова, Т. Б., Бекеткызы, М. Б., Имансакипова, Б. Б., Айтказинова, Ш. К., Спицын, А. А., & Васильев, И. В. (2024). Способ определения направления на источник звука (Патент № 37080, Республика Казахстан). Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева». <https://gosreestr.kazpatent.kz/Invention/Details?docNumber=381657>
15. Samaitis, V., Jasiūnienė, E., Packo, P., & Smagulova, D. (2021). Ultrasonic methods. In M. G. R. Sause & E. Jasiūnienė (Eds.), *Structural Health Monitoring and Damage Detection Systems in Aerospace* (pp. 101–124). Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-72192-3_5
16. Shetu, A. M. Sh. (2025). A review of nondestructive testing methods for aerospace composite materials. ResearchGate. <https://www.researchgate.net>
17. Soeta, Y., Takahashi, Y., Ito, N., & Hasegawa, A. (2020). Application of simple visualization system for analysing direction of sound sources by 3D microphones. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 261(5), 1234–1243. Institute of Noise Control Engineering.
18. Therre, S., Bost, W., Hewener, H., Tretbar, S., & Fournelle, M. (2021). Passive acoustic mapping for ultrasound therapy monitoring. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 7(2), 437–440. DOI: 10.1515/cdbme-2021-1095
19. Tran, V. T., & Yang, B.-S. (2009). Machine fault diagnosis and prognosis: The state of the art. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 2(1), 61–71. https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijfms/2/1/2_1_61/article/-char/ja
20. UE Systems. (2025, 13 августа). Ultraprobe 9000. <https://www.uesystems.com/product/ultraprobe-9000/>

References

1. Abdimatova, T. D. (2025). Ultrasonic monitoring of biological and technogenic processes. In VIII International Scientific and Technical Forum STNO-2025. Proceedings (Vol. 6, p. 269).
2. Bardis, K., Avdelidis, N. P., Ibarra-Castaneda, C., Maldague, C. P. V., & Fernandes, E. (2025). Advanced diagnostics of aircraft structures using ultrasound, thermography, eddy current, and ML. *Applied Sciences*. MDPI. <https://www.mdpi.com>
3. Berri, P. C., Matteo, D. L., Dalla Vedova, & Mainini, L. (2020). Computational framework for real-time diagnostics and prognostics of aircraft actuation systems. arXiv preprint. <https://arxiv.org>
4. *Vibration diagnostics of machines and equipment: Textbook*. (2015). Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Technical University.
5. FLIR Systems. (2025, August 1). FLIR Si2 (Industrial Acoustic Imaging Camera). <https://www.flir.com/products/si2-pro>
6. Global Test Supply. (2025, June 20). Official website. <https://www.globaltestsupply.com>
7. Golyamina, I. P. (1979). *Ultrasound*. Small encyclopedia. Moscow: Soviet Encyclopedia.
8. ISO 29821-2:2016. (2016). Condition monitoring and diagnostics of machines — Ultrasonic techniques — Part 2: Procedures to determine and assess measurement results. Geneva: ISO.

9. ISO 18405:2017. (2017). Underwater acoustics — Terminology. Geneva: ISO.
10. Laurijssen, D., Daems, W., & Steckel, J. (2024, February). HiRIS: An airborne sonar sensor with a 1024 channel microphone array. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/2402.12345>
11. Lu, Y. (1992). Real-time weld defect detection using ultrasonic methods (Doctoral dissertation). Brunel University, School of Engineering and Design.
12. Mast, T. D., Pucke, A., & Iskander, M. F. (2009). Passive imaging of cavitation acoustic emissions with ultrasound arrays. AIP Conference Proceedings, 1092(1), 126–130. DOI: 10.1063/1.3085725
13. Özlem, U., Furkan, E., & Elif, E. (2024). Non-destructive testing methods commonly used in aviation. International Journal of Aeronautics and Astronautics, 5(1), 10–22.
14. Sdvizhkova, E. A., Golovko, Y. N., Nurpeisova, T. B., Beketkyzy, M. B., Imansakipova, B. B., Aitkazinova, Sh. K., Spitsyn, A. A., & Vasiliev, I. V. (2024). Method for determining the direction to a sound source (Patent No. 37080, Republic of Kazakhstan). Non-commercial Joint Stock Company “Satbayev Kazakh National Research Technical University”. <https://gosreestr.kazpatent.kz/Invention/Details?docNumber=381657>
15. Samaitis, V., Jasiūnienė, E., Packo, P., & Smagulova, D. (2021). Ultrasonic methods. In M. G. R. Sause & E. Jasiūnienė (Eds.), Structural Health Monitoring and Damage Detection Systems in Aerospace (pp. 101–124). Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-72192-3_5
16. Shetu, A. M. Sh. (2025). A review of nondestructive testing methods for aerospace composite materials. ResearchGate. <https://www.researchgate.net>
17. Soeta, Y., Takahashi, Y., Ito, N., & Hasegawa, A. (2020). Application of simple visualization system for analysing direction of sound sources by 3D microphones. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 261(5), 1234–1243. Institute of Noise Control Engineering.
18. Therre, S., Bost, W., Hewener, H., Tretbar, S., & Fournelle, M. (2021). Passive acoustic mapping for ultrasound therapy monitoring. Current Directions in Biomedical Engineering, 7(2), 437–440. DOI: 10.1515/cdbme-2021-1095
19. Tran, V. T., & Yang, B.-S. (2009). Machine fault diagnosis and prognosis: The state of the art. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2(1), 61–71. https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijfms/2/1/2_1_61/article/-char/ja
20. UE Systems. (2025, August 13). Ultraprobe 9000. <https://www.uesystems.com/product/ultraprobe-9000/>

МЕХАНИЗМДЕРДІ УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ДИАГНОСТИКАЛАУҒА АРНАЛҒАН БОЛАШАҚ ҚҰРЫЛҒЫНЫҢ СИПАТТАМА ТАЛАПТАРЫ

***Аңдатпа.** Мақалада машиналар мен механизмдерді ультрадыбыстық диагностика әдістерін қолдануды реттейтін нормативтік құжаттарды талдау нәтижелері ұсынылған, сондай-ақ оларды дыбыс жиілігі саласындағы қолданыстағы стандарттармен салыстыру жүргізілген. Мұндай тәсіл қолдану салаларындағы айырмашылықтарды анықтауға және жаңа диагностикалық аспаптарды әзірлеу кезінде қолданыстағы нормаларды практикалық тұрғыдан пайдалану мүмкіндіктерін белгілеуге мүмкіндік берді.*

Арнайы назар қазіргі уақытта сатып алуға болатын ультрадыбыстық жиіліктегі өлшеу аспаптарына аударылды. Көптеген аспаптардың функционалдық мүмкіндіктері шектеулі әрі құны жоғары екені анықталды. Мәселен, жекелеген құрылғылар ультрадыбыстық сигналдарды тіркеп, олардың көзінің бағытын көрсете алады, алайда визуализация тек локализацияланған нүктені бейнелеумен шектеледі. Бұл өз кезегінде сигналдың физикалық параметрлерін және оның ортадағы таралу динамикасын жазып алуға мүмкіндік бермейді. Мұндай шектеулер кешенді диагностиканың мүмкіндіктерін айтарлықтай тарылтады.

Мақаланың негізгі мақсаты – механизмдерді ультрадыбыстық диагностикалауға арналған болашағы бар аспаптың сипаттамаларына қойылатын талаптарды қалыптастыру. Мұндай аспап жиілік параметрлерін тіркеу және ультрадыбыстық өрісті кеңістікте визуализациялау функцияларын біріктіруі тиіс.

Көрсетілгендей, қазіргі аспаптар тек сигнал көзін іздеуге бағытталған. Жаңа буындағы аспаптарды жасау қажеттілігі негізделді. Олар ультрадыбыстық өрісті кеңістікте бейнелеуге және машиналар мен механизмдерді неғұрлым толық диагностикалауға, оның ішінде жасырын ақаулар мен ықтимал істен шығуларды ерте анықтауға мүмкіндік береді. Авиация саласы үшін бұл талаптарды орындау ерекше маңызды, себебі ол тікелей ұшу қауіпсіздігінің жоғары деңгейін қамтамасыз етумен байланысты.

Түйін сөздер: ультрадыбыстық диагностика, акустикалық, бұзбайтын бақылау (NDT), авиациялық қауіпсіздік, MEMS-микрофондар, техникалық диагностика, акустикалық визуализация; аспаптарға қойылатын талаптар, механизмдердің сенімділігі.

REQUIREMENTS FOR THE CHARACTERISTICS OF A PROSPECTIVE DEVICE FOR ULTRASONIC DIAGNOSTICS OF MECHANISMS

Abstract. *The article presents the results of an analysis of regulatory documents governing the application of ultrasonic diagnostic methods for machines and mechanisms, as well as a comparison with current standards in the field of acoustic frequencies. This approach made it possible to identify differences between areas of application and to determine the possibilities of practical use of existing standards in the development of new diagnostic devices.*

Special attention is given to the review of ultrasonic frequency measuring instruments currently available on the market. It was found that most of these devices have limited functional capabilities and a high cost. For example, some instruments are capable of detecting ultrasonic signals and indicating the direction of their source; however, visualization is limited to displaying a localized point, which does not allow the recording of physical parameters of the signal or the dynamics of its propagation in the medium. These limitations significantly reduce the potential for comprehensive diagnostics.

The main objective of the article is to establish requirements for the characteristics of a next-generation device for ultrasonic diagnostics of mechanisms, which should combine the functions of recording frequency parameters and spatial visualization of the ultrasonic field.

It is shown that existing devices are focused only on detecting the signal source. The need for developing new-generation instruments is substantiated. Such instruments would enable the visualization of the ultrasonic field in space and ensure more comprehensive diagnostics of machines and mechanisms, including early detection of hidden defects and potential failures. For the aviation industry, meeting these requirements is of particular importance, as it is directly related to ensuring a high level of flight safety.

Keywords: *ultrasonic diagnostics, nondestructive testing (NDT), aviation safety, MEMS microphones, technical diagnostics, acoustic visualization, instrument requirements, mechanism reliability.*

Сведение об авторах

Абдиматова Толкын Досалықызы	Докторант «Академии гражданской авиации», г. Алматы, Казахстан E-mail: t.abdimatova@agakaz.kz
Васильев Иван Вениаминович	Канд. физ.-мат. наук., ассоциированный профессор Академии Гражданской Авиации, г. Алматы, Казахстан, e-mail: iv@granit.kz

Авторлар туралы мәлімет

Әбдіматова Толкын Досалықызы	«Азаматтық авиация академиясының» докторанты, Алматы қ., Қазақстан E-mail: t.abdimatova@agakaz.kz
Васильев Иван Вениаминович	PhD (физика-математика), Азаматтық Авиация Академиясының қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., Қазақстан e-mail: iv@granit.kz

Information about the authors

Abdimatova Tolkyun Dosalykyzy	Doctoral Student, Civil Aviation Academy, Almaty, Republic of Kazakhstan E-mail: t.abdimatova@agakaz.kz
Vassilyev Ivan Veniaminovich	PhD (phys.-math.), Associate professor of Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan, e-mail: iv@granit.kz