

Grishchenko Vyacheslav Igorevich – Don State Technical University; e-mail: vgritshenko@donstu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Hydraulics, Hydropneumatic Automation and Thermal Processes; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kalmykova Ksenia Fedorovna – Don State Technical University; e-mail: kfkalmykova@donstu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Electrical Engineering and Electronics; postgraduate.

Rakhmanov Arslan Ikramovich – Don State Technical University; e-mail: ikramovic55@gmail.com; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Design and Technical Service of Transport and Technological Systems; student.

Tsymbalov Denis Sergeevich – Don State Technical University; e-mail: dcymbalov@donstu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Electronics and Electrical Engineering; senior lecturer.

УДК 621.374.33

DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-201-211

А.Ю. Звягин, К.А. Бойков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ МЕТОДА АКТИВНОЙ РАДИОСЕНСОРНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования двух конструкций безэховых камер, предназначенных для активной радиосенсорной технической диагностики (АРТД). Цель работы заключалась в создании условий для получения достоверного сигнального радиопрофиля (СРП) исследуемого объекта с минимальными искажениями за счет эффективного подавления внешних электромагнитных наводок и отражений. В рамках исследования были реализованы две конфигурации экранированных объемов: первая – на основе многослойной фольгированной отражающей структуры, вторая – с использованием высококачественной ткани Фарадея. Проведено сравнительно оценочное тестирование эффективности экранирования при разных состояниях СВЧ элемента. Состояние СВЧ элемента менялось за счёт изменения схемы СВЧ смесителя, путем выпаивания ключевых элементов. Для верификации функциональных характеристик выполнены серии измерений с помощью зондирования поверхности исследуемого СВЧ-смесителя сверхкороткими импульсами (СКИ). Получаемый СРП регистрировался с помощью осциллографа и принимающей антенны. Для обработки результатов использовался корреляционный анализ Пирсона, который показал свою эффективность в количественной оценке различий СРП объекта в исправном и дефектном состояниях. Полученные экспериментальные данные позволили оценить качество и перспективы материалов по ключевым параметрам: степень подавления паразитных сигналов, устойчивость к внешним помехам в различных условиях эксплуатации, механическая долговечность при циклических нагрузках и экономическая целесообразность реализации с учетом себестоимости материалов и трудоемкости сборки. Результаты исследования демонстрируют практическую применимость обеих конструкций в задачах прецизионных радиоизмерений, при этом выбор конкретного материала определяется оптимальным компромиссом между стоимостью производства, эксплуатационными характеристиками в различных климатических условиях и требуемым уровнем экранирования для конкретного применения. Полученные данные могут быть успешно использованы при проектировании как стационарных лабораторных комплексов, так и мобильных систем АРТД в условиях ограниченных ресурсов, включая полевые измерения и промышленный мониторинг. Исследования показали перспективность обоих подходов для достижения максимальных характеристик экранирования в широком частотном диапазоне.

Безэховая камера; активная радиосенсорная диагностика; ткань Фарадея; фольгированные поглотители; радиопрофиль; коэффициент экранирования.

A.Y. Zvyagin, K.A. Boikov

EXPERIMENTAL FACILITY BASED ON ANECHOIC CHAMBER FOR ACTIVE RADIOSENSORY TECHNICAL DIAGNOSTICS

The article presents the results of the development and experimental study of two designs of anechoic chambers designed for active radiosensory technical diagnostics (ARTD). The aim of the work was to create conditions for obtaining a reliable radio signal profile (SRP) of the object under study with minimal distortion due to the effective suppression of external electromagnetic interference and reflections. As part

of the study, two configurations of shielded volumes were implemented: the first based on a multilayer foil reflective structure, the second using high-quality Faraday fabric. Comparative evaluation testing of the shielding efficiency was carried out at different states of the microwave element. The state of the microwave element was changed by changing the scheme of the microwave mixer, by soldering out key elements. To verify the functional characteristics, a series of measurements were performed by probing the surface of the microwave mixer under study with short pulses (SP). The resulting SRP was recorded using an oscilloscope and a receiving antenna. Pearson correlation analysis was used to process the results, which proved effective in quantifying the differences in the SRP of an object in good and defective conditions. The experimental data obtained made it possible to evaluate the quality and prospects of materials based on key parameters: the degree of suppression of parasitic signals, resistance to external interference in various operating conditions, mechanical durability under cyclic loads, and the economic feasibility of implementation, taking into account the cost of materials and the complexity of assembly. The results of the study demonstrate the practical applicability of both designs in precision radio measurement tasks, while the choice of a specific material is determined by an optimal compromise between production costs, performance characteristics in various climatic conditions and the required level of shielding for a specific application. The data obtained can be successfully used in the design of both stationary laboratory complexes and mobile ARTD systems in conditions of limited resources, including field measurements and industrial monitoring. Studies have shown the promise of both approaches to achieve maximum shielding characteristics over a wide frequency range.

Anechoic chamber; active radiosensory technical diagnostics; Faraday fabric; foil absorbers; radio profile; shielding coefficient.

Введение. Метод активной радиосенсорной технической диагностики (АРТД) представляет собой перспективное направление в области контроля технического состояния электронных средств (ЭС), позволяя выявлять дефекты и отклонения в их функционировании без необходимости демонтажа или физического контакта [1–3]. Однако одной из ключевых проблем, ограничивающих широкое внедрение АРТД на практике, является сложность точной идентификации радиопрофиля исследуемого объекта. Эта проблема обусловлена высокой чувствительностью используемых в АРТД широкополосных антенн к внешним и внутренним электромагнитным помехам, которые существенно искажают полезный сигнал.

Помехи различной природы – как стационарные, так и случайные – создают фоновый шум, который маскирует информативные компоненты отражённого сигнала. Особенно остро эта задача стоит при диагностике сложных, многослойных устройств с миниатюрными элементами, где даже незначительные паразитные наводки могут привести к ложной интерпретации результатов. Это снижает достоверность диагностики и увеличивает вероятность ошибок особенно при определении наличия скрытых дефектов.

В предыдущих исследованиях было показано, что основными источниками искажений являются паразитные отражения от конструктивных элементов измерительного оборудования, взаимные наводки между антеннами и внешние электромагнитные поля промышленного происхождения [4]. Для борьбы с этими явлениями применяются различные методы: аппаратная фильтрация сигналов, пространственно-временная обработка, адаптивная компенсация помех, а также алгоритмические подходы, включая использование методов машинного обучения для повышения разрешающей способности диагностики. Однако данные методы зачастую оказываются недостаточны для обеспечения требуемой точности, особенно в условиях реального окружения с переменным уровнем электромагнитного фона.

Одним из наиболее эффективных путей решения этой проблемы является организация контролируемой электромагнитной среды, в которой проводятся измерения. В связи с этим актуальным становится проектирование специализированных безэховых камер [5–7], предназначенных для минимизации уровня внешних помех и подавления паразитных отражений. Такие камеры позволяют создать условия, максимально приближенные к свободному пространству распространения электромагнитных волн, тем самым улучшая качество регистрации отклика исследуемого образца.

В настоящей работе представлено решение по созданию и экспериментальной апробации двух типов безэховых камер, ориентированных на применение в системах АРТД. Особое внимание уделено выбору материалов поглощающих конструкций и оцен-

ке их эффективности в различных частотных диапазонах. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшей разработке измерительных комплексов, обеспечивающих высокую воспроизводимость и точность диагностики в условиях ограниченных ресурсов.

Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация геометрии и состава поглощающих покрытий для расширения рабочего частотного диапазона, а также разработка новых композитных материалов, сочетающих высокую эффективность поглощения с технологичностью изготовления и экономической целесообразностью применения [8].

Электромагнитное излучение в различных средах и его роль в системах АРТД.

При пересечении границы раздела между двумя средами с различными электромагнитными свойствами происходит частичное отражение волны согласно законам Френеля, преломление – в соответствии с законом Снеллиуса, а также поглощение части энергии, сопровождающееся выделением тепла. Особое поведение наблюдается при взаимодействии электромагнитных излучений (ЭМИ) с проводящими материалами, например, металлами. Благодаря наличию свободных электронов, такие материалы эффективно экранируют внешние поля: под действием падающей волны в них возникают токи, генерирующие вторичное поле, компенсирующее внешнее. В результате электромагнитная волна практически не проникает внутрь проводника, а отражается от его поверхности – это явление лежит в основе принципа электромагнитного экранирования.

В контексте АРТД особую важность представляет процесс распространения сигналов внутри экранированного объема – такой как безэховая камера или экранирующая коробка. При работе широкополосной антенны формируется волновой импульс, содержащий широкий спектр частот. Этот сигнал распространяется в ограниченном пространстве, сталкиваясь с внутренними поверхностями конструкции, где он может отражаться, рассеиваться или поглощаться материалом стенок [9]. Наличие паразитных отражений и неполного поглощения приводит к образованию остаточных эхосигналов, которые могут маскировать информативную составляющую, связанную с откликом исследуемого объекта.

Особенно чувствительна к таким эффектам система АРТД, поскольку задача заключается в регистрации изменений в радиопрофиле, обусловленных дефектами или неоднородностями структуры. Таким образом, эффективное подавление паразитных отражений и защита от внешних электромагнитных наводок становятся ключевыми факторами обеспечения высокой точности диагностики.

Безэховая камера, как было показано ранее, служит инструментом для создания контролируемой электромагнитной среды, максимально приближенной к идеальным условиям измерений. Одним из основных метрических параметров, характеризующих ее эффективность, является степень экранирования (Shielding Effectiveness, SE), которая определяет способность конструкции ослаблять внешние электромагнитные поля. Значение SE зависит от рабочей частоты сигнала, геометрии камеры, а также типа и толщины используемых поглощающих материалов [5, 10].

$$SE = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{ВНЕШ}}}{P_{\text{ВНУТР}}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{E_{\text{ВНЕШ}}}{E_{\text{ВНУТР}}} \right), \quad (1)$$

где $P_{\text{ВНЕШ}}$, $E_{\text{ВНЕШ}}$ – мощность и напряженность поля до экранирования, $P_{\text{ВНУТР}}$, $E_{\text{ВНУТР}}$ – мощность и напряженность поля внутри экрана.

Обычно SE представляют через три основных критерия экранирования ЭМП – это отражение, поглощение и многократное отражение:

$$SE = R + A + M, \quad (2)$$

где R – потери на отражение, A – потери на поглощение, M – потери на многократные отражения. Чем выше SE, тем лучше экран блокирует волны:

$$R = 168 + 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right). \quad (3)$$

$$A = 8,686 \cdot \frac{t}{\delta} \quad (4)$$

$$M = 20 \log_{10} |1 - e^{-2t/\delta}| \quad (5)$$

Материал для безэховой камеры. На основе анализа уравнений (2–5), описывающих взаимодействие электромагнитного поля с материалами, были определены и обоснованы основные материалы, применимые при создании безэховой камеры. Эти уравнения учитывают такие параметры, как коэффициент отражения, поглощения и проницаемости материалов в зависимости от частоты электромагнитного излучения.

При разработке экранирующей камеры важно было подобрать материалы, сочетающие механическую прочность с эффективной защитой от электромагнитных помех. В качестве основы выбран полиэтилен – легкий и экономичный полимер с отличными изолирующими свойствами. Благодаря этому удалось создать прочный каркас, который не нарушает работу экранирующего слоя. В качестве одного из ключевых материалов для экранирования выбрано фольгированное покрытие, характеризующееся высокой электрической проводимостью σ , что обеспечивает значительный коэффициент отражения электромагнитных волн на границе раздела сред. Для идеального проводника коэффициент отражения по напряженности электрического поля определяется выражением:

$$K = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (6)$$

где Z_1 и Z_2 – волновые сопротивления первой и второй сред соответственно. В случае металлической поверхности ($\sigma \rightarrow \infty$) $Z_2 \rightarrow 0$, что приводит к $K \approx -1$, т.е. практически полному отражению падающей волны.

Фольгированные покрытия применяются в стелс-технологиях благодаря своей способности к управляемому переотражению электромагнитной энергии в широком диапазоне частот. Это позволяет минимизировать уровень вторичного излучения, регистрируемого внешними радиолокационными системами [11].

Вторым перспективным материалом для использования в АРТД является ткань Фарадея (ФТ), представляющая собой композитный экранирующий материал со сложной многослойной структурой. Ее поведение в электромагнитном поле описывается через комплексную относительную диэлектрическую проницаемость:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (7)$$

и магнитную проницаемость:

$$\mu^* = \mu' - j\mu'', \quad (8)$$

где действительные части ε' и μ' характеризуют способность материала хранить энергию электромагнитного поля, а мнимые части ε'' и μ'' – степень диссипации энергии, связанной с потерями в материале.

Проникающая в такой материал электромагнитная волна подвергается экспоненциальному затуханию, которое описывается коэффициентом затухания α :

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1 \right)}, \quad (9)$$

где ω – угловая частота, σ – удельная проводимость материала.

Это приводит к уменьшению интенсивности переотраженных сигналов и снижению уровня паразитных помех, что особенно важно при восстановлении радиопрофиля объекта диагностики [12, 13].

Процесс распространения электромагнитного излучения внутри экранированной области безэховой камеры при проведении АРТД определяется совокупностью факторов:

- ◆ электрофизическими характеристиками материалов (проводимость σ , комплексная диэлектрическая ε^* и магнитная μ^* проницаемости);
- ◆ геометрией объема;
- ◆ спектральным составом зондирующего сигнала;
- ◆ наличием исследуемого образца, который вносит дополнительные возмущения в распределение электромагнитного поля.

Математически изменение поля можно описать с помощью уравнений Максвелла.

Адаптация и тонкая настройка указанных параметров играют ключевую роль в минимизации уровня шумов и интерференционных эффектов, обеспечивая тем самым высокую точность и воспроизводимость результатов диагностики. Эти аспекты имеют принципиальное значение для успешного внедрения метода АРТД в практику технической диагностики.

АРТД в безэховой камере. Для оценки влияния экранирования безэховой камеры на эффективность АРТД была разработана и реализована измерительная установка, включающая сигнал-генератор, осциллограф, а также пару направленных антенн – передающую и приёмную, между которыми размещался исследуемый образец (рис. 1).

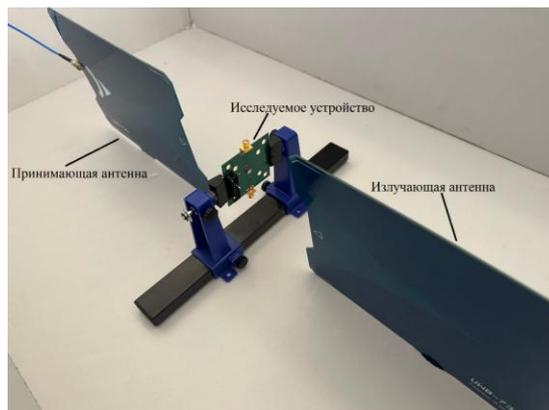


Рис. 1. Измерительная установка в безэховой камере

В качестве объекта исследования выбран СВЧ-смеситель с установленным SMD-компонентом на печатной плате. Проводилось измерение СРП устройства до и после демонтажа указанного компонента (рис. 2), что позволило оценить изменение электромагнитного отклика при наличии и отсутствии элемента.



Рис. 2. СВЧ усилитель с выпаянным SMD компонентом

Исследование выполнялось с использованием двух типов экранирующих покрытий [14] с целью сравнительной оценки их эффективности в условиях АРТД. Для обеспечения достоверности полученных данных проведено значительное количество измерений (не менее 20–30 циклов для каждого случая) в строго контролируемых лабораторных услови-

ях. Все эксперименты были повторными, с фиксированным положением антенн, стабильными температурой и влажностью окружающей среды, а также неизменными настройками измерительных приборов, что обеспечивало воспроизводимость результатов.

Для обработки экспериментальных данных применялся метод корреляционного анализа Пирсона, позволивший выявить статистически значимые различия между СРП исправного и дефектного состояний исследуемого объекта (СВЧ-смесителя). Было проведено около ~100 измерений, при которых средний коэффициент корреляции между импульсами по одному устройству составляет ~0,81, а при корреляционном анализе устройств с дефектом и без ~(0,35). Полученные результаты характеризуются высокой степенью повторяемости: относительный разброс данных составил не более 3–5%, что подтверждает устойчивость наблюдаемых диагностических признаков и их связь именно с наличием/отсутствием функционального элемента, а не со случайными шумами или вариациями параметров измерительной системы.

На зондируемый образец был подан сверхкороткий импульс [15–17] длительностью 10 нс. На рис. 3 показан СРП исправного устройства в фольгированной безэховой камере.

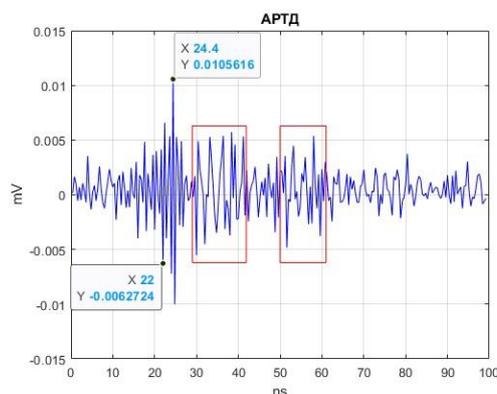


Рис. 3. СРП СВЧ усилителя в фольгированной камере

На графике наблюдается значительное переотражение импульса (области, выделенные красными прямоугольниками), что свидетельствует о высокой отражающей способности фольгированной поверхности и её низкой эффективности в поглощении ЭМИ в исследуемом частотном диапазоне. Фольга отражает основную долю падающей электромагнитной энергии, что приводит к возникновению не только первичного, но и множественных вторичных, а также последующих переотраженных сигналов.

Важно отметить, что характер и интенсивность этих переотражений тесно связаны с геометрическими размерами безэховой камеры. В частности, при соизмеримости линейных размеров внутреннего пространства камеры L с длиной волны зондирующего сигнала λ , возникают условия для формирования устойчивых стоячих волн и интерференционных максимумов:

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (10)$$

где n – целое число, определяющее порядок резонанса. Это выражение описывает условие образования стоячей волны между двумя параллельными поверхностями, разделенными расстоянием L . При выполнении этого условия внутри камеры формируются зоны усиления и ослабления электромагнитного поля, что дополнительно искажает регистрируемый СРП и снижает точность диагностики методом АРТД. Кроме того, согласно выражению (6), коэффициент отражения K от идеально проводящей поверхности (в случае фольги) близок к единице. Такой материал эффективен для внешнего экранирования, но плохо справляется с поглощением в АРТД.

Интенсивность повторных отражений может быть оценена через время задержки между ними:

$$\Delta t = \frac{2L}{c}, \quad (11)$$

где c – скорость света в вакууме.

При увеличении размера камеры временной интервал между отражениями возрастает, что позволяет их разрешить во времени, однако общий уровень фоновых помех остаётся высоким из-за слабого затухания сигнала при каждом отражении. Геометрия камеры играет ключевую роль в поведении электромагнитного поля внутри нее: увеличение объема помещения относительно длины волны позволяет снизить вероятность формирования стоячих волн и минимизировать влияние переотражений на результаты измерений.

Несмотря на переотраженный сигнал видны различия в СРП исправного и неисправного устройств (рис. 4). Основным отличием радиопрофиля неисправного устройства является разница в максимальной амплитуде сигнала, что влияет и на энергетику отраженного сигнала импульса. Когда из устройства удаляется SMD-усилитель, это напрямую влияет на амплитуды свободных составляющих СРП.

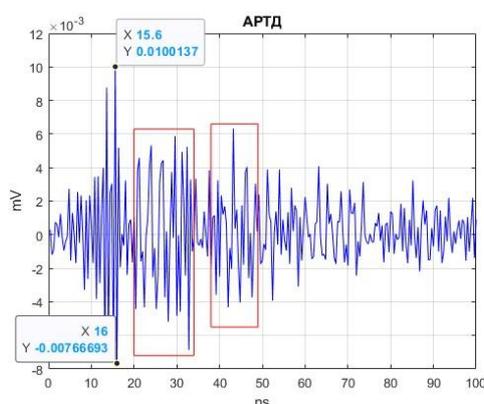


Рис. 4. СРП СВЧ усилителя без SMD компонента в фольгированной камере

В случае же с материалом ФТ переотражение импульса более сглажено, что соответствует высокой поглощающей способности материала (рис. 5). Амплитуда отраженного сигнала снижается на 30–40% по сравнению с фольгированной камерой. На временной развертке видно, что фронт отраженного сигнала менее выражен, а затухание происходит по экспоненциальному закону, что характерно для материалов с высокими потерями на поглощение. Это согласуется с теоретическими ожиданиями [18–20], поскольку материал ФТ имеет высокую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon' \approx 12\text{--}15$) и значительную мнимую часть ($\epsilon'' \approx 3\text{--}5$), что обеспечивает сильное рассеивание энергии. Дополнительное ослабление сигнала может быть связано с пористой структурой материала, способствующей многократному внутреннему переотражению и последующему поглощению. Таким образом, материал ФТ демонстрирует лучшие поглощающие свойства по сравнению с обычной фольгой, что делает его потенциально более эффективным для применения в задачах, требующих снижения уровня переотражений и электромагнитных помех.

На рис. 6 представлен СРП усилителя с выпаянным SMD-компонентом, который, как и в случае фольгированной камеры демонстрирует характерное отличие по сравнению с СРП исправного устройства. Оно заключается в изменении амплитудно-временных характеристик отраженного сигнала. Так после удаления SMD-компонента наблюдается уменьшение амплитуды основного сигнала на 5–8%, что связано с изменением локального импеданса в месте расположения компонента. Так же стоит заметить, что за счет более эффективного поглощения и переотражения сигналов внутри ФТ-камеры амплитуда принимаемого сигнала оказывается выше, чем в обычной фольгированной камере, независимо от текущего состояния устройства.

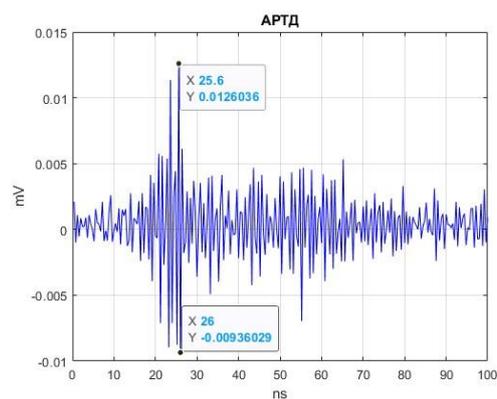


Рис. 5. СРП СВЧ усилителя в ФТ камере

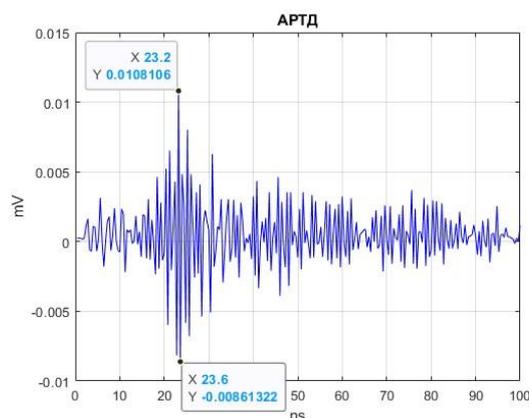


Рис. 6. СРП СВЧ усилителя с выпаянным SMD в ФТ камере

Полученные результаты могут быть полезны для адаптации экранирующих систем в радиотехнике, проектировании безэховых камер и других приложениях, где важно управление электромагнитными волнами.

За счет применения экранирования в безэховых камерах радиопрофиль исследуемого образца стал намного четче, поскольку экранирующие материалы (фольга и ФТ) эффективно подавили паразитные электромагнитные наводки и внешние помехи. В случае с фольгой, несмотря на сильное переотражение, проявились границы импульса и его временные характеристики, что позволило определить динамику взаимодействия радиоволн с поверхностью образца. Однако из-за множественных переотражений возникли искажения на поздних временных интервалах, затрудняющие анализ слабых сигналов.

При использовании материала ФТ радиопрофиль становится еще более детализированным, поскольку снижение уровня переотражений минимизировало наложение эхосигналов. Это особенно важно при исследовании образцов со сложной структурой или слабыми откликами, так как позволяет выделить даже незначительные особенности рассеяния и поглощения. Уменьшение фонового шума и вторичных отражений сделало сигнал чище, а значит, повысило точность измерений амплитуды, длительности и формы импульса.

Таким образом, экранирование не только позволило повысить соотношение сигнал/шум, но и более точно визуализировать СРП исследуемого образца, включая его геометрические особенности, распределение отражающих элементов и возможные аномалии рассеяния. Это особенно ценно для задач радиосенсорной диагностики где четкость радиопрофиля напрямую влияет на достоверность результатов.

Заключение. В ходе эксперимента был разработан и отлажен измерительный стенд для реализации АРТД, предназначенный для оценки СРП электронных устройств. Основное внимание было уделено сравнительному анализу двух типов экранирующих материалов – ткани Фарадея и фольгированного покрытия с точки зрения их влияния на качество регистрируемых сигналов и помехозащищённость измерений.

Экспериментальные данные показали, что использование ФТ обеспечивает более высокую стабильность и воспроизводимость результатов за счет эффективного поглощения паразитных отражений и снижения уровня внешних электромагнитных помех. Многослойная структура материала, сочетающая проводящие и диэлектрические элементы с потерями, способствует контролируемому затуханию электромагнитной волны в теле материала, что минимизирует интерференционные эффекты и сохраняет амплитудную целостность полезного сигнала. Таким образом, ФТ-ткань является предпочтительным материалом для применения в прецизионных измерениях методом АРТД, особенно при необходимости точного восстановления пространственного распределения электромагнитного поля объекта.

В то же время фольгированное покрытие продемонстрировало свою эффективность в задачах электромагнитной защиты, где главным критерием является подавление внешнего излучения. Высокая отражающая способность фольги позволяет экранировать внутреннее пространство от внешних воздействий. Однако из-за значительного переотражения внутри камеры ее применение требует строгого соблюдения геометрических условий – в частности, соотношения между длиной волны и размерами камеры чтобы минимизировать искажения сигнала. Следовательно, фольгированный экран может быть рекомендован в случаях, когда требуется общая электромагнитная изоляция, а не высокоточная диагностика.

Таким образом, выбор типа экранирующего материала должен основываться на функциональных требованиях к измерительной системе: если ключевыми являются точность, стабильность и воспроизводимость результатов, предпочтительно использовать ФТ-ткань. Если же необходима надежная защита от внешних электромагнитных наводок в крупногабаритных системах, фольга остается экономически и технически обоснованным решением. Оба материала обладают определенной спецификой применения, что подтверждает необходимость их индивидуального подхода при проектировании безэховых камер для АРТД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бойков К.А.* Радиосенсорная техническая диагностика сложного электронного узла // Сенсорные системы. – 2022. – Т. 36, № 3. – С. 252-261. – DOI: 10.31857/S0235009222030027. – EDN SESCKY.
2. *Бойков К.А.* Радиосенсорная аутентификация электронных устройств // Проектирование и технология электронных средств. – 2022. – № 2. – С. 19-25. – EDN INGPVX.
3. *Бойков К.А.* Радиосенсорная идентификация и аутентификация радиоэлектронных устройств // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2022. – Т. 16, № 5. – С. 15-20. – DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-5-15-20. – EDN XXHOJL.
4. *Бойков К.А., Звягин А.Ю.* Исследование сигнального радиопрофиля при активной радиосенсорной диагностике // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем ("Радиоинфоком-2024"): Сб. научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 18–22 ноября 2024 года. – М.: МИРЭА - Российский технологический университет, 2024. – С. 403-406. – EDN DALURT.
5. *Paul C.R., Scully R.C., Steffka M.A.* Introduction to electromagnetic compatibility. – John Wiley & Sons, 2022.
6. *Скулачев Д.П., Косов А.С.* Особенности применения металлизированной ткани для экранирования безэховой камеры // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – № 4.
7. *Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е.* Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // Вестник ВГТУ. – 2012. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnyh-radiopogloschayuschih-materialov> (дата обращения: 28.05.2025).
8. *Газизов Т.Р.* Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 256 с. – ISBN 5-91302-018-9. – EDN YTZTJD.

9. *Chung B.K., Chuah H.T.* Design and construction of a multipurpose wideband anechoic chamber // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 2003. – Vol. 45, No. 6. – P. 41-47.
10. *Никольский В.В., Никольская Т.И., Никольский В.В., Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для студентов радиотехнических специальностей вузов. – 6-е. изд. – М.: Либроком, 2012. – 542 с. – ISBN 978-5-397-02973-5. – EDN QJZUGD.
11. *Лагарьков А.Н. и др.* Актуальные задачи стелс-технологий / Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН. – URL: <http://www.itae.ru/science/topics/%E2>.
12. *Насонова Н.В., Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Бозуш В.А.* Пористые волокнистые материалы с жидкостными наполнителями для экранирования электромагнитного излучения // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. – 2004. – № 12. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poristye-voлокnistye-materialy-s-zhidkostnymi-napolnitelyami-dlya-ekranirovaniya-elektromagnitnogo-izlucheniya> (дата обращения: 28.05.2025).
13. *Saito T.* Shielding performance of open-type magnetic shielding box structure // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2009. – Vol. 45, No. 10. – P. 4640-4643.
14. *Xu Q., Huang Y.* Anechoic and Reverberation Chambers: Theory, Design, and Measurements. – 2019.
15. *Усыченко В.Г., Усыченко А.С., Сорокин Л.Н.* Энергетические характеристики излучателей сверхкоротких электромагнитных импульсов // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2015. – Т. 58, № 2. – С. 114-122.
16. *Елфимов А.Е. и др.* Перестраиваемый генератор СКИ с низким уровнем звона // VI научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2023. Физика и технические приложения волновых процессов ФиТПВП-2023: Матер. XX Международной научно-технической конференции. Казань, 22–24 ноября 2023 года. – 2023. – С. 192.
17. *Wentzloff D.D., Chandrakasan A.P.* Gaussian pulse generators for subbanded ultra-wideband transmitters // *IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2006. – Vol. 54, No. 4. – P. 1647-1655.
18. *Periyasamy A.P. et al.* Effect of silanization on copper coated milife fabric with improved EMI shielding effectiveness // *Materials Chemistry and Physics*. – 2020. – Vol. 239. – P. 122008.
19. *Lara J.L., del Jesus M., Losada I.J.* Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures: Part II: Experimental validation // *Coastal Engineering*. – 2012. – Vol. 64. – P. 26-46.
20. *Pandey R., Tekumalla S., Gupta M.* EMI shielding of metals, alloys, and composites // *Materials for potential EMI shielding applications*. – Elsevier, 2020. – P. 341-355.

REFERENCES

1. *Boykov K.A.* Radiosensornaya tekhnicheskaya diagnostika slozhnogo elektronnoy uzla [Radiosensory technical diagnostics of a complex electronic node], *Sensornye sistemy* [Sensor systems], 2022, Vol. 36, No. 3, pp. 252-261. DOI: 10.31857/S0235009222030027. EDN SESCKY.
2. *Boykov K.A.* Radiosensornaya autentifikatsiya elektronnykh ustroystv [Radiosensory authentication of electronic devices], *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and technology of electronic means], 2022, No. 2, pp. 19-25. EDN INGPVX.
3. *Boykov K.A.* Radiosensornaya identifikatsiya i autentifikatsiya radioelektronnykh ustroystv [Radiosensory identification and authentication of radio-electronic devices], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-program comm: Telecommunications and transport], 2022, Vol. 16, No. 5, pp. 15-20. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-5-15-20. EDN XXHOJL.
4. *Boykov K.A., Zvyagin A.Yu.* Issledovanie signal'nogo radioprofilya pri aktivnoy radiosensornoy diagnostike [Research of the signal radio profile in active radiosensory diagnostics], *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya radiotekhnicheskikh i infokommunikatsionnykh sistem ("Radioinfokom-2024")*: Sb. nauchnykh statey po materialam VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 18–22 noyabrya 2024 goda [Actual problems and prospects of development of radio engineering and infocommunication systems (Radioinfokom-2024): Collection of scientific articles based on materials from the VIII International Scientific and Practical Conference, Moscow, November 18-22, 2024]. Moscow: MIREA - Rossiyskiy tekhnologicheskii universitet, 2024, pp. 403-406. EDN DALURT.
5. *Paul C.R., Scully R.C., Steffka M.A.* Introduction to electromagnetic compatibility. John Wiley & Sons, 2022.
6. *Skulachev D.P., Kosov A.S.* Osobennosti primeneniya metallizirovannoy tkani dlya ekranirovaniya bezekhvoy kamery [Features of the use of metallized fabric for shielding an anechoic chamber], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics], 2023, No. 4.
7. *Latypova A.F., Kalinin Yu.E.* Analiz perspektivnykh radiopogloshchayushchikh materialov [Analysis of promising radio-absorbing materials], *Vestnik VGTU* [Bulletin of VSTU], 2012, No. 6. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnykh-radiopogloshchayushchikh-materialov> (accessed 28 May 2025).

8. *Gazizov T.R.* Elektromagnitnaya sovместimost' i bezopasnost' radioelektronnoy apparatury [Electromagnetic compatibility and safety of electronic equipment]. Tomsk: TML-Press, 2007, 256 p. ISBN 5-91302-018-9. EDN YTZTJD.
9. *Chung B.K., Chuah H.T.* Design and construction of a multipurpose wideband anechoic chamber, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2003, Vol. 45, No. 6, pp. 41-47.
10. *Nikol'skiy V.V., Nikol'skaya T.I., Nikol'skiy V.V., Nikol'skaya T.I.* Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln: ucheb. posobie dlya studentov radiotekhnicheskikh spetsial'nostey vuzov [Electrodynamics and radio wave propagation : a textbook for students of radio engineering specialties of universities]. 6th. ed. Moscow: Librokom, 2012, 542 p. ISBN 978-5-397-02973-5. – EDN QJZUGD.
11. *Lagar'kov A.N. i dr.* Aktual'nye zadachi stels-tekhnologiy [Current tasks of stealth technologies], Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics of the Russian Academy of Sciences. Available at: <http://www.itae.ru/science/topics/%E2>.
12. *Nasonova N.V., Lyn'kov L.M., Borbot'ko T.V., Bogush V.A.* Poristye voloknistye materialy s zhidkostnymi napolnitelyami dlya ekranirovaniya elektromagnitnogo izlucheniya [Porous fibrous materials with liquid fillers for shielding electromagnetic radiation], *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Sergey B. Submission. Latest news], 2004, No. 12. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/poristye-voloknistye-materialy-s-zhidkostnymi-napolnitelyami-dlya-ekranirovaniya-elektromagnitnogo-izlucheniya> (accessed 28 May 2025).
13. *Saito T.* Shielding performance of open-type magnetic shielding box structure, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, Vol. 45, No. 10, pp. 4640-4643.
14. *Xu Q., Huang Y.* Anechoic and Reverberation Chambers: Theory, Design, and Measurements, 2019.
15. *Usychenko V.G., Usychenko A.S., Sorokin L.N.* Energeticheskie kharakteristiki izluchateley sverkhkorotkikh elektromagnitnykh impul'sov [Energy characteristics of ultrashort electromagnetic pulse emitters], *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Izvestiya vuzov. Radiophysics], 2015, Vol. 58, No. 2, pp. 114-122.
16. *Elfimov A.E. i dr.* Perestraivaemyy generator SKI s nizkim urovнем zvona [Tunable low-ringing SKI generator], *VI nauchnyy forum telekommunikatsii: teoriya i tekhnologii TTT-2023. Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov FiTPVP-2023: Mater. XX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Kazan', 22–24 noyabrya 2023 goda* [VI Scientific Forum of Telecommunications: Theory and Technologies TTT-2023. Physics and Technical Applications of Wave Processes FiTAVP-2023: Proc. XX International Scientific and Technical Conference. Kazan, November 22–24, 2023], 2023, pp. 192.
17. *Wentzloff D.D., Chandrakasan A.P.* Gaussian pulse generators for subbanded ultra-wideband transmitters, *IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, Vol. 54, No. 4, pp. 1647-1655.
18. *Periyasamy A.P. et al.* Effect of silanization on copper coated milife fabric with improved EMI shielding effectiveness, *Materials Chemistry and Physics*, 2020, Vol. 239, pp. 122008.
19. *Lara J.L., del Jesus M., Losada I.J.* Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures: Part II: Experimental validation, *Coastal Engineering*, 2012, Vol. 64, pp. 26-46.
20. *Pandey R., Tekumalla S., Gupta M.* EMI shielding of metals, alloys, and composites, *Materials for potential EMI shielding applications*. Elsevier, 2020, pp. 341-355.

Звягин Алексей Юрьевич – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: zvyagin@mirea.ru; г. Москва, Россия; кафедра радиоволновых процессов и технологий; аспирант.

Бойков Константин Анатольевич – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: nauchnyi@yandex.ru; г. Москва, Россия; кафедра радиоволновых процессов и технологий; д.т.н.

Zvyagin Alexey Yurevich – MIREA – Russian Technological University; e-mail: zvyagin@mirea.ru; Moscow, Russia; the department of radio wave processes and technologies; graduate student.

Boikov Konstantin Anatol'evich – MIREA – Russian Technological University; e-mail: nauchnyi@yandex.ru; Moscow, Russia; the department of radio wave processes and technologies; graduate student.