

ПРИМЕНЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА ФОРМЫ В ВЕРИФИКАЦИИ ДЕМОНТАЖА ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Хелен Уайт, Филип Дэйборн, Пола Хайден и Филип Инд

Техническая верификация возможного будущего соглашения по контролю над ядерным оружием является серьезным вызовом для разработчиков технологии. Данная статья нацелена на использование методов испытаний на формы в качестве средства поддержания режима охраны хранящихся в контейнерах изделий, учитываемых по договору и оборудования для мониторинга. Испытания на форму представляют собой специализированную разновидность анализа резонансных вибраций, часто используемую для целей структурной идентификации, мониторинга состояния и обнаружения повреждения. В перспективе режима охраны было постулировано, что сигнатуры формы вибрации может быть использована для идентификации конкретного учитываемого по договору контейнера, или системы из контейнера и объекта, или для предоставления доказательства попытки взлома. В данной статье рассматриваются преимущества и недостатки испытаний на формы в качестве потенциального инструмента режима охраны. Обсуждаются экспериментальные результаты, относящиеся к развертыванию, индикации вмешательства, уникальной идентификации и методологии анализа данных.

Хелен Уайт, Филип Дэйборн, Пола Хайден и Филип Инд работают в Организации атомного вооружения, Олдермастон, Ридинг, Беркшир, Великобритания.

Почтовый адрес для корреспонденций: Helen White, AWE Aldermaston, Reading, Berkshire, RG7 4PR, United Kingdom.

Адрес электронной почты: Helen.white@awe.co.uk

Данный документ подготовлен в Великобритании и он содержит информацию, являющуюся собственностью государственного секретаря по обороне. Он предоставлен конфиденциально и он не может быть скопирован, использован или раскрыт, полностью, или частично, без предварительного письменного согласия подразделения по правам интеллектуальной собственности министерства обороны DGDCDIPR-PL – Ministry of Defence, Abbey Wood, Bristol, BS34 8JH, England.

Статья получена 7 октября 2013 года и принята к публикации 31 января 2014 года.

ПРОБЛЕМА ТЕХНИЧЕСКОЙ ВЕРИФИКАЦИИ

В программе исследования верификации контроля над вооружениями, предпринятая в Организации атомного вооружения исследуются и разрабатываются методологии и технологии, которые могли бы быть развернуты для верификации возможных будущих соглашений по контролю над ядерным разоружением^{1,2,3,4}. В программе рассматриваются гипотетические двусторонние или многосторонние сценарии, включающие демонтаж ядерных боеголовок. В настоящее время основной целью является общий сценарий, который отслеживает ядерную боеголовку от прибытия на площадку первоначального хранения, через различные стадии транспортировки и демонтажа, до хранения компонентов из делящихся материалов. В таком сценарии надзор за проектом может осуществляться «отслеживающей стороной» со ссылкой на процессы и установки, контролируемые «принимающей стороной». В таком контексте мониторинг представляет собой технический процесс сбора информации для того, чтобы убедиться в том, что соответствующие стороны соблюдают положения международного соглашения. Гипотетические декларации, рассматриваемые в данной работе, содержат ссылку на изделие, учитываемое по договору (например, собранную боеголовку, частично демонтированную боеголовку, компонент с делящимся материалом или делящийся материал).

Одними из ключевых движущих сил, влияющих на разработку окончательного согласованного режима мониторинга и на выбор технологий, являются различающиеся перспективы вовлеченных сторон. Принимающая сторона, хотя она и желает облегчить процесс мониторинга, обязана защищать секретную или способствующую распространению информацию, относящуюся к изделию, учитываемому по договору, площадке, или операциям, проводимым на площадке. Несмотря на любые ограничения, которые могут возникнуть в такой ситуации, отслеживающая сторона будет стремиться получить уверенность в том, что декларированные изделия,

учитываемые по договору, не подверглись несанкционированному вмешательству, и что никакие относящиеся к договору изделия или материалы не были выведены из процесса. Это приводит к основному вызову для любого верификационного режима, действующего внутри комплекса ядерного оружия: предоставить отслеживающей стороне возможность собрать достаточное доказательство выполнения, в то же время защищая секретную или способствующую распространению информацию, принадлежащую принимающей стороне. Окончательный режим мониторинга должен будет балансировать между этими двумя точками зрения и принимать во внимание любые появляющиеся ограничения, которые могут быть наложены.

Хотя в данной статье обсуждается один конкретный аспект режима мониторинга, режим охраны, эта тема должна рассматриваться как один из элементов конструкции всеобъемлющего режима. Мониторинг устройств и материалов, режим охраны, аутентификация, сертификация, управление данными и управляемый доступ должны быть сведены вместе и сбалансированы для того, чтобы создать взаимоприемлемый уровень доверия в общей системе верификации⁵.

РЕЖИМ ОХРАНЫ

Режим охраны представляет собой интегрированную серию процедур и технологий, разработанных для учета изделий, относящихся к договору, посредством подотчетного договору процесса, и обеспечивающих уверенность в том, что поддерживается целостность и аутентичность изделия^{6,7}. С точки зрения отслеживающей стороны, режим охраны предоставляет:

- Мониторинг доступа к изделиям, относящимся к договору.
- Контроль над оборудованием и данными мониторинга.
- Уверенность в том, что не было предпринято никакой попытки взлома, обмана или отвлечения изделий, относящихся к договору, оборудования или данных мониторинга.
- Связь между различными техническими мерами, требующимися для установления идентичности и аутентичности изделий, относящихся к договору.

Пограничный контроль и отслеживание сигнатур (иногда называемое созданием однозначных шаблонов) представляют собой две стратегические методологии, используемые в разработке систем режима охраны. Методы пограничного контроля предназначены для создания обозначенного и контролируемого периметра вокруг изделий, относящихся к договору, оборудования мониторинга, или рабочей площадки. Наиболее очевидным проявлением концепции пограничного контроля является ограждение, указывающее на вмешательство. Традиционно такие ограждения рассматриваются как «ящики», которые предоставляют доказательство несанкционированной попытки доступа к секретному изделию. Однако, действительная реализация подхода пограничного контроля может принимать многие формы, и может быть внедрена на многих различных уровнях масштабов, от индивидуальных изделий до площадок на уровне предприятия⁸⁻¹³. Ключом к созданию надежной системы пограничного контроля является интеграция нескольких технологий индикации вмешательства и уникальной (анти-контрафактной) идентификации в единую многоуровневую оптимизированную конструкцию.

Отслеживание сигнатур, основная цель данной статьи, является подходом, дополняющим создание контролируемой границы. Сигнатура, относящаяся к заданному объекту в контейнере, записывается до того, как объект переходит под прямой контроль отслеживающей стороны (например, во время хранения или на стадии транспортировки). В будущий момент времени объект повторно инспектируется, заново делается измерение, и производится сравнение. Задача такого подхода состоит в том, чтобы проверить, не изменилась ли сигнатура, указывающая на то, что произошло несанкционированное взаимодействие некоторого уровня. При рассмотрении отслеживания сигнатуры с такой точки зрения проявляется несколько пунктов:

- В отличие от технологий пограничного контроля, которые размещаются вокруг изделия, в концепциях отслеживания сигнатур используется измерение, которое непосредственно связано либо с самим изделием, либо с заданной комбинацией контейнера и изделия. Отметим, что отслеживающая сторона вряд ли получит полный доступ к изделиям, относящимся к договору, но вместо этого ей будут представлены серии объектов в контейнерах, каждый из которых будет представлять различный этап процесса демонтажа.
- Такой подход будет обладать преимуществами в ситуациях, где пограничный контроль будет трудно реализовать (например, во время этапов транспортировки).
- Отслеживание сигнатур будет трудно реализовать во время периодов, в которых может изменяться конфигурация объекта (например, в течение самого процесса демонтажа).

- Подход может быть реализован не только для изделий, относящихся к договору; можно также рассмотреть режим охраны, относящийся к оборудованию мониторинга.
- С точки зрения режима охраны, ионизирующее излучение не является единственным вариантом, который может быть использован в качестве базовой сигнатуры для такого подхода¹⁴. Тем не менее, выбранная сигнатура потребуется для:
 - Уникальной идентификации системы контейнера и объекта.
 - Предоставления доказательства взлома контейнера или доказательства взлома содержимого контейнера.
 - Поддержания стабильности в течение времени между периодами инспекции и постоянства (или предсказуемости) в отношении к фоновым эффектам окружающей среды.

Обеим сторонам потребуется рассмотреть, возникнет ли потенциал раскрытия способствующей распространению информации; принимающая сторона должна также рассмотреть защиту национальной секретной информации. Поскольку методы отслеживания сигнатур записывают измерение, непосредственно связанное с потенциально секретным изделием, для поддержки этого подхода может потребоваться информационный барьер¹⁵. Учитывая потенциальную сложность всеобъемлющих систем режима охраны, могут потребоваться разнообразные технологии для предоставления гибкости отклика на различные сценарии, для предоставления многих уровней доказательства, и для устранения уязвимости в единой точке отказа. По мере научно-технического развития и потенциального создания более изощренных методов атаки следует пересматривать существующие технологии и рассматривать дополнительные технологии. С учетом данного замечания программа режима охраны в Организации атомного вооружения исследует разнообразные методы отслеживания сигнатур для применения в контексте верификации договора. В качестве одного из потенциальных подходов было предложено испытание на форму.

ЦЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КАМПАНИИ

Была разработана серия экспериментов для исследования применения испытаний на форму в качестве метода отслеживания сигнатур в режиме охраны. В данной статье представлены и обсуждены результаты этой экспериментальной кампании, направленной на следующие цели:

- **Развертывание:** Оценить данный метод в отношении скорости, портативности и простоты применения.
- **Поход к анализу данных:** Определить оптимальный подход к анализу полученных данных.
- **Воспроизводимость:** Исследовать воспроизводимость измеряемых выходных данных и разработать аналитический метод классификации результатов для поддержки суждения оператора о том, произошло ли существенное изменение в сборке контейнера и объекта.
- **Уникальная идентификация:** Оценить способность данного метода к уникальной идентификации определенного контейнера или части компонента такого контейнера.
- **Идентификация вмешательства:** Оценить способность данного метода для предоставления доказательства несанкционированной попытки перемещения контейнера, открывания контейнера в нормальной точке входа или нарушения боковой стенки контейнера с ремонтом затронутого участка.
- **Внутренняя конфигурация:** Оценить потенциальную способность этого метода выявить изменение внутренней конфигурации объекта внутри испытываемого контейнера.

Во время этапа планирования была разработана всеобъемлющая методология испытаний на форму, которая охватывает общий подход, принятый для экспериментального этапа и этапа анализа данных. Были разработаны испытательные модельные контейнеры для поддержки кампании; экспериментальная установка была оптимизирована для скорости развертывания перед проведением окончательной экспериментальной кампании.

МЕТОДОЛОГИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ФОРМУ

Во всех твердых телах могут быть возбуждены механические резонансные колебания. Очевидным примером является звук после удара в колокол. Конструкция колокола характеризуется собственными резонансными

частотами; на заданной резонансной частоте конструкция примет форму «стоячей волны», или форму колебаний. Доминирующая форма колебаний будет приводит к тону, который мы слышим, и который изменится, если колокол будет существенно изменен или поврежден.

Испытание на форму представляет собой специализированную форму анализа резонансных вибраций, которая использует это свойство для целей структурной идентификации, мониторинга состояния и обнаружения повреждения¹⁶. С точки зрения режима охраны было принято, что такой метод структурных испытаний может быть также использован для уникальной идентификации контейнера с заданным объектом внутри и для выявления изменений, происшедших в результате вмешательства.

Действия по верификации будущего ядерного вооружения, вероятно, будут производиться в режиме ограниченного управляемого доступа¹⁷. По этой причине представляется, что измерительная система должна будет быстро собираться, быть транспортабельной и простой в использовании. Типичный эксперимент по испытаниям на форму включает метод возбуждения, который прилагает силу к конструкции, и измерение отклика, регистрирующее ускорение, скорость или смещение поверхности. После рассмотрения модальный молоток был выбран для приложения силы к конструкции и ее измерения, и трехосный акселерометр был выбран для записи вибрационного отклика в направлениях X, Y, и Z (рисунок 1). Такой выбор не исключает других подходов, но полагалось, что выбранный подход является самым простым для развертывания и, следовательно, он может быть обоснованно положен в основу такой предварительной экспериментальной кампании.

Обычно трехосные акселерометры могут быть размещены в нескольких местах на конструкции; модальный молоток используется для удара по конструкции в указанной точке. После этого система записывает (рисунок 1):

- Силу, прилагаемую молотком к конструкции.
- Отклики с акселерометров в направлениях X, Y, и Z.

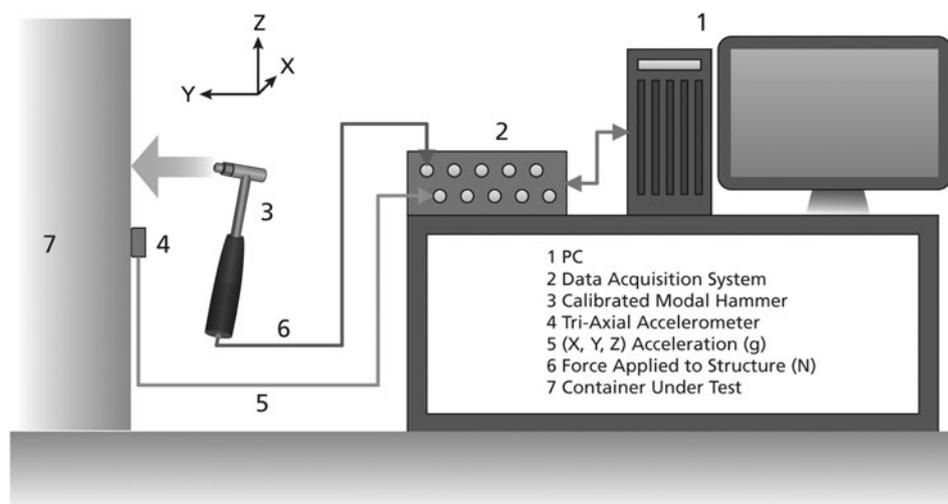


Рисунок 1. Калиброванный модальный молоток использовался для приложения и измерения силы, прилагаемой к конструкции, а трехосный акселерометр использовался для записи вибрационного отклика в направлениях X, Y, и Z. Надписи на легенде к рисунку: 1 – персональный компьютер; 2 – система регистрации данных; 3 – калиброванный модальный молоток; 4 – трехосный акселерометр; 5 – ускорения по осям X, Y, и Z (в $g = 9,81 \text{ м/с}^2$); 6 – сила, прилагаемая к конструкции (в Н); 7 – испытываемый контейнер.

Согласно принятой терминологии, «ударная точка» представляет собой отклик акселерометра, ближайшего к точке удара, в направлении удара; отклики акселерометров в других точках конструкции называются «точками переноса». Хотя такие измерения производятся во временной области, для дальнейшей обработки сигналы необходимо преобразовать в спектры, базирующиеся на частотной области. На этой стадии частотный отклик акселерометров делится на измеренную прилагаемую силу, приданную молотком, для того, чтобы получить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) (рисунок 2). Если конструкция и экспериментальная установка в диапазоне сил, используемых в указанной экспериментальной кампании, имеют линейный отклик, то эта АЧХ нормированного отклика будет независима от прилагаемой силы. По этой причине важно подтвердить линейную зависимость от прилагаемой силы для экспериментальной установки. Для каждого расположения

удара молотка данная экспериментальная установка предоставляет три кривых АЧХ для каждого трехосного акселерометра (X, Y, и Z).

Моделирование не демпфированной системы на одной из ее резонансных частот должно будет привести к бесконечному отклику. На практике демпфирование (механизмы потери энергии) ограничивают амплитуду отклика некоторым конечным значением, которое отмечается пиком в заданном спектре АЧХ (рисунок 2). Положение и амплитуда этих пиков определяется массой, жесткостью и затуханием испытываемой конструкции, и поэтому на них будет влиять значительное структурное изменение. На общий отклик контейнера будут также влиять соединения и зоны контакта, поскольку из предыдущего опыта известно, что переборка конструкции с соединениями редко приводит к той же самой АЧХ отклика. Эта особенность добавляется к уникальным свойствам конкретной сборки и она может также указывать на несанкционированную попытку открытия и повторной сборки конструкции.

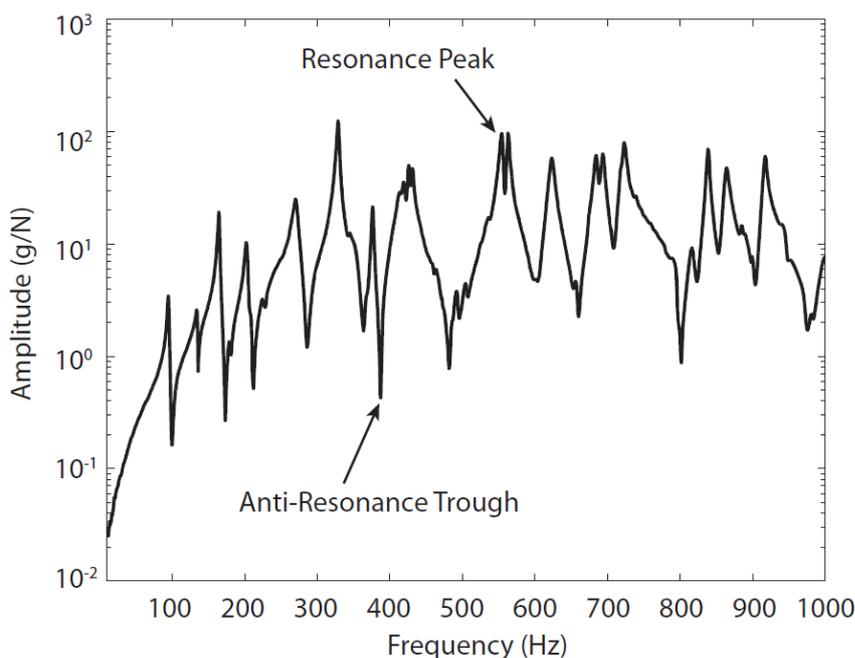


Рисунок 2. Рисунок, показывающий типичный частотный спектр отклика ускорения. В частотной области эта кривая представляет отклик вибрации, нормированный на приложенную силу. На вертикальной оси отложена амплитуда (g/N; $1\text{ g} = 9,81\text{ м/с}^2$), на горизонтальной оси – частота в Гц. Пики кривой соответствуют резонансам, провалы – анти-резонансам.

Имеется немало походов к анализу кривых АЧХ¹⁸; для поддержки данной экспериментальной кампании были выбраны два подхода:

- Анализ однозначного соответствия.
- Анализ глобального критерия (ГК).

Для анализа однозначного соответствия выбираются и накладываются друг на друга две кривые: после этого эксперт предметной области проводит простое качественное графическое сравнение. В анализе однозначного соответствия непрактично рассматривать все кривые АЧХ, и поэтому выбираются спектры, предоставляющие больше всего информации. Обычно эксперт предметной области будет начинать с АЧХ ударной точки перед тем, как переходить к анализу точек переноса. Отметим, что в традиционном анализе испытаний на форму рассматриваются только положения пиков в заданном спектре АЧХ. Для данного сценария предполагается, что в других спектральных областях может присутствовать дополнительная информация, и поэтому следует рассматривать весь спектр.

Анализ однозначного соответствия может быть исключительно полезным, но обычно он требует, чтобы сравнение полученных данных о конструкции А с аналогичными данными по конструкции В проводилось высо-

коквалифицированным специалистом-практиком. Этот анализ всегда проводится сравнением только двух кривых АЧХ за один раз, что может оказаться весьма трудоемким процессом. Кроме того, результаты такого анализа всегда будут качественными, поскольку они опираются на субъективное суждение (хотя и принадлежащее эксперту). В данном сценарии было бы желательно иметь объективный автоматизированный инструмент сравнения, который мог бы иметь дело со всеми данными, полученными в испытаниях. Для этой цели был разработана аналитическая программа, основанная на глобальном критерии (ГК). С математической точки зрения, глобальный критерий предоставляет метрику для сравнения амплитуды и формы наборов данных АЧХ. Программа глобального критерия рассчитывает корреляционные функции амплитуды и формы (χ_A и χ_B) в заданном диапазоне частот. Эти функции могут принимать значения от нуля до единицы; единица обозначает 100-процентную корреляцию, а ноль означает полное отсутствие корреляции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В данном гипотетическом сценарии отслеживающая сторона должна будет развернуть аппаратуру для проведения испытаний на форму с внешней стороны контейнера, в котором может быть установлено, а может быть и не установлено изделие, учитываемое по договору. Для моделирования такой ситуации в этих экспериментах использовалось девять номинально идентичных металлических испытательных контейнеров, объем каждого из которых приблизительно равнялся 1 м^3 (рисунок 3). Каждый контейнер состоял из:

- Блока основания, который состоял из цилиндра, прикрепленного к тяжелому основанию.
- Верхнего блока, состоящего из цилиндрической крышки.
- Соединительного узла, который соединял цилиндрический блок основания с цилиндрическим верхним блоком для создания закрытого контейнера.
- Дверцы для обслуживания в блоке основания.
- Бирки с серийным номером, обозначенным как ТС-(от А до I).

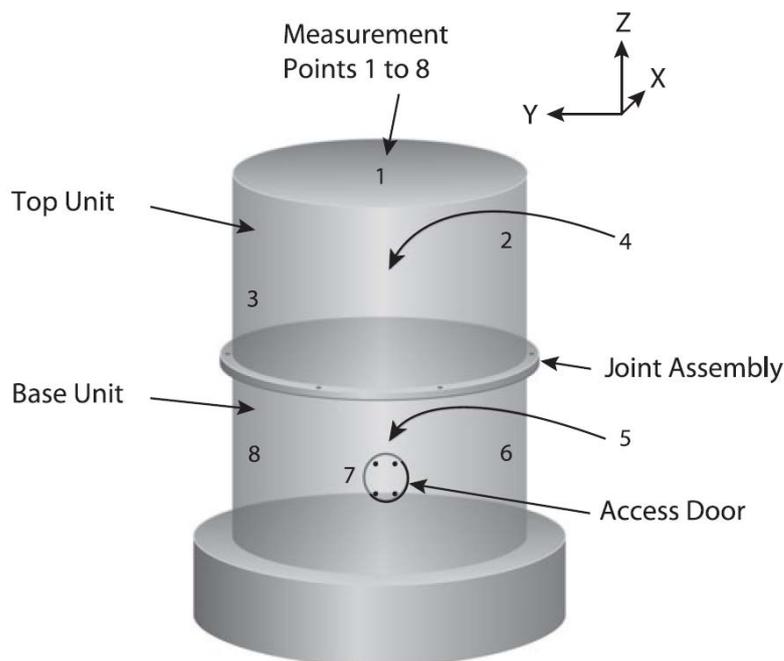


Рисунок 3. Иллюстрация, показывающая схему испытательного контейнера и восьми точек измерения. Надписи на рисунке (по часовой стрелке от левого нижнего угла): 1 – блок основания; 2 – верхний блок; 3 – точки измерения (от 1 до 8); 4 – соединительный узел; 5 – дверца для обслуживания.

Блок основания значительно жестче и тяжелее, чем верхний блок. Это означает, что в части экспериментального сценария можно будет исследовать неоднородную конструкцию контейнера. Для моделирования наличия объекта внутри контейнера были изготовлены также испытательная масса и внутренняя поддерживающая фурнитура.

Значительные усилия были посвящены поиску оптимальной конфигурации испытаний в отношении метода возбуждения и измерения отклика, построения координатной системы испытаний и расположения точек возбуждения и отклика. Целью данного этапа, занимавшего по времени около четырех часов, состояла в подтверждении того, что экспериментальная конструкция:

- Быстро и легко разворачивается.
- Достаточно для того, чтобы обеспечить охват всех деталей и компонентов испытательного контейнера.
- Сводит к минимуму измерения секретных и способствующих распространению параметров.

В типичном эксперименте по испытаниям на форму для оптимизации экспериментальной конфигурации используются аналитические модели. Принимающая сторона может счесть подробную конструкционную информацию по определенным системам контейнера и объекта секретной и отказаться раскрыть информацию, требующуюся для построения такой модели. По этой причине было решено, что в данном сценарии более подходящим может быть подход экспериментальной оптимизации.

Эксперт предметной области выбирает несколько положений возбуждения и отклика на данном испытательном контейнере; итеративная серия экспериментов позволяет оператору оптимизировать экспериментальную конфигурацию. Был выбран диапазон частот (от 0 до 1 кГц), который содержит подходящее количество резонансов для поддержки анализа однозначного соответствия и анализа глобального критерия (около 20). Были выбраны положения точек измерения, которые позволяют возбуждать и обнаруживать все резонансы в заданном диапазоне частот. Для того, чтобы обнаружить событие вмешательства, были выбраны положения точек измерения на каждой основной секции испытательного контейнера. Количество точек измерения сводилось к минимуму для того, чтобы сократить время разворачивания и ограничить измерения «секретной» информации. В течение всей кампании использовалась единая система координат (рисунок 3). Было обнаружено, что восьми точек измерения достаточно для того, чтобы обеспечить полное покрытие испытательного контейнера. Акселерометры располагались в двух положениях на верхнем блоке (1 и 3) и в четырех положениях на блоке основания (5, 6, 7 и 8); молоток обеспечивал возбуждение в четырех положениях на верхнем блоке (1, 2, 3 и 4) и в четырех положениях на блоке основания (5, 6, 7 и 8). Такая последовательность измерений позволяла получить 72 АЧХ для каждого испытательного контейнера. Для сбора данных использовалась коммерчески доступная система National Instruments PXi с программным обеспечением сбора данных M+P SmartOffice. Стандартная конфигурация аппаратных средств и программного обеспечения не изменялась.

Реализация экспериментальной кампании была нацелена на задачи проекта, связанные с разворачиванием, воспроизводимостью, уникальной идентификацией, обнаружением вмешательства, и внутренней конфигурацией. Первоначальный обзор результатов с помощью анализа однозначного соответствия показал, что АЧХ точки удара показывает максимальные изменения для заданного вмешательства; изменения в функциях переноса более тонкие и менее приспособленные для анализа однозначного соответствия. Поскольку функции переноса также могут содержать важную информацию, был разработан инструмент анализа глобального критерия для сравнения всех 72 АЧХ из одного набора данных со всеми 72 АЧХ из второго набора данных. АЧХ точки удара из всех измерений анализировались с помощью анализа однозначного соответствия; затем было выбрано подмножество наборов данных, которые сравнивались с помощью инструмента анализа глобального критерия. Для измерений воспроизводимости, уникальной идентификации, и обнаружения вмешательства в испытательных контейнерах устанавливалась полная внутренняя фурнитура без испытательной массы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разворачивание

Процесс измерения был оценен в отношении скорости разворачивания, простоты использования и транспортабельности:

- Одному оператору требуется приблизительно десять минут для того, чтобы определить характеристики одной конфигурации контейнера и объекта. Это время можно сократить, если использовать систему сбора данных с большим количеством каналов.
- Оператор сравнительно легко может провести испытание после всего лишь нескольких часов обучения, но для исправления технических проблем потребуется значительный опыт.

- Выбранная конфигурация испытаний на форму (молоток и акселерометры) легко транспортируется, доступно питание от сети и от батарей.

Учитывая вышесказанное, было обнаружено, что метод является быстрым, надежным, транспортабельным и легко развертываемым несколькими группами мониторинга. Это предполагает, что система была развернута в соответствии с планом и что не возникло никаких проблем, поскольку исправление аномалии может потребовать от оператора значительного опыта.

Воспроизводимость

Воспроизводимость проверялась при пяти различных условиях:

- Номинально идентичное повторное испытание.
- Линейная зависимость от возбуждающей силы.
- Разные инженеры-испытатели, номинально идентичная последовательность измерений.
- Разные инженеры-испытатели, выполняющие процедуру установки (например, отметку положений измерения) и последовательность измерений.
- Расположение точек возбуждения и отклика.

Анализ однозначного соответствия спектров АЧХ продемонстрировал, что результаты являются воспроизводимыми и линейными, и поэтому не зависящими от силы, прилагаемой к контейнеру (в диапазоне сил, использованных в течение данной экспериментальной кампании). Анализ также показал, что результаты не зависят от оператора, как в отношении к процедуре измерений, так и в отношении настройки измерений. Это наблюдение является важным, поскольку вероятно, что в течение действия режима мониторинга будет развернуто несколько различных групп мониторинга. Настройка проверялась также в отношении чувствительности к расположению точек возбуждения и отклика. Было обнаружено, что пока точки возбуждения и отклика располагаются в пределах ± 5 мм от идеального положения, измерения являются воспроизводимыми. Было обнаружено, что такая точность легко достигается на практике.

При рассмотрении практичности развертывания данной системы было решено, что может потребоваться система классификации измерений. Такая система будет использована оператором в качестве базиса для процесса принятия решений, поддерживая как определение отсутствия изменений, так и решение о начале процедуры разрешения аномалии. Для того, чтобы продемонстрировать простой пример возможности реализации подобной системы, был выполнен анализ глобального критерия на наборах данных из двух экспериментов:

- Номинально идентичное повторное испытание ($\chi_s = 0,95$; $\chi_a = 0,96$).
- Разные инженеры-испытатели, выполняющие процедуру установки (например, отметку положений измерения) и последовательность измерений ($\chi_s = 0,94$; $\chi_a = 0,95$).

Эти измерения воспроизводимости эксперимента предоставляют отправную точку для результатов анализа глобального критерия, по которым может быть построена система классификации. Например, номинально идентичное повторное испытание показывает, что результаты с $\chi_s = 0,95$ и $\chi_a = 0,96$, или выше, могут указывать на «отсутствие вмешательства» или на «не обнаружимое изменение». Однако, сценарий, включающий другого инженера-испытателя, выполняющие процедуру измерений, показывает меньшую корреляцию, указывая на область потенциальной неоднозначности, где результаты могут показывать либо на вмешательство, или на экспериментальную переменность. Такое изучение результатов анализа глобального критерия использовалось для установления приближенных границ для классификации наблюдений с анализом глобального критерия (таблица 1). Обсуждались три категории: (1) отправная точка или не обнаружимое изменение; (2) малое изменение, которое потребует дальнейшего анализа для подтверждения того, что оно не было связано с действиями оператора или параметрами эксперимента; и (3) большое изменение за пределами ожидаемых операционных параметров. Малые и большие изменения могут привести отслеживающую сторону к тому, чтобы исследовать другие направления режима охраны для поиска подтверждающих доказательств, а также к изучению результатов с помощью анализа однозначного соответствия. Данная система классификации использовалась при обсуждении результатов оставшейся части кампании. Очевидно, что предложенная схема является упро-

щенным и качественным подходом к определению границ классификации; для создания надежной и объективной системы классификации, пригодной для развертывания, потребуется дальнейшая работа.

Таблица 1. Классификация результатов анализа глобального критерия.

Категория	Форма (χ_s)	Амплитуда (χ_a)	Классификация результата
1	$\chi_s > 0,95$	$\chi_a > 0,96$	Отправная точка или не обнаружимое изменение.
2	$0,95 > \chi_s > 0,93$	$0,96 > \chi_a > 0,94$	Малое изменение. Без дополнительного анализа оно может быть приписано к факторам, связанным с оператором или экспериментом.
3	$\chi_s < 0,93$	$\chi_a < 0,94$	Большое изменение за пределами ожидаемых операционных параметров.

Уникальная идентификация

Спектры АЧХ шести номинально идентичных испытательных контейнеров сравнивались для того, чтобы увидеть, имеются ли различия в спектрах АЧХ, достаточные для того, чтобы этот метод мог использоваться для уникальной идентификации. Анализ однозначного соответствия показал, что кривые зависят от контейнера (рисунок 4); этот результат был поддержан анализом глобального критерия, который продемонстрировал большое изменение в ассоциированных значениях корреляции при сравнении АЧХ различных контейнеров ($\chi_s = 0,78$; $\chi_a = 0,79$). Кривые для каждого из испытательных контейнеров имеют аналогичное количество резонансов между 200 Гц и 1 кГц, но они различаются по частотам и амплитудам пиков (рисунок 4). Отметим, что пики в спектрах АЧХ от блоков основания не имеют столь четкого различия, какое наблюдается в верхних блоках (рисунок 5). Это связано с механизмами потери энергии (демпфирование), проявляющимися в соединительном узле, и с взаимодействием блока основания с полом.

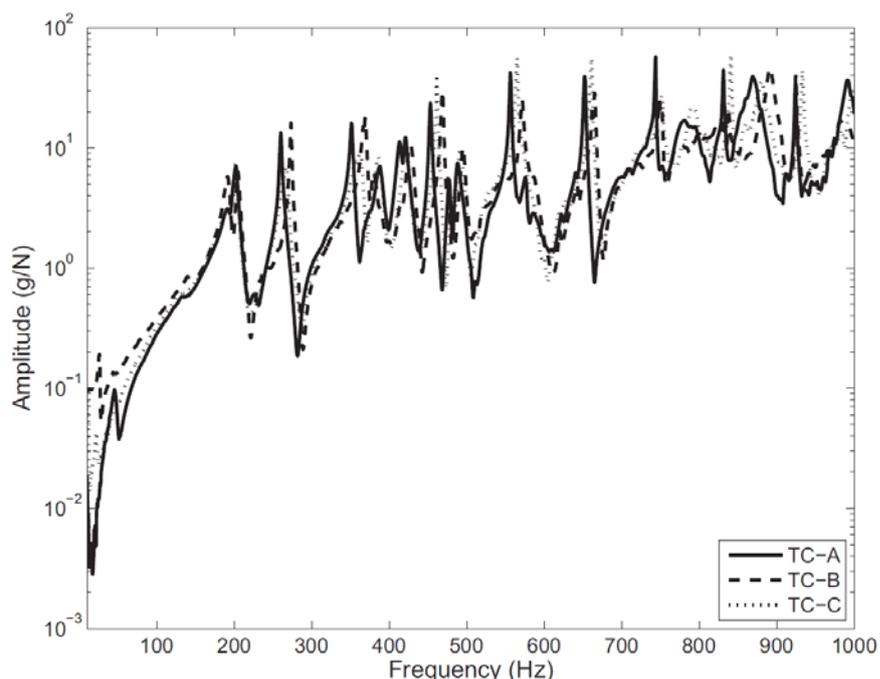


Рисунок 4. Пример функции спектра частотного отклика от трех номинально идентичных испытательных контейнеров (отклик и возбуждение в положении 3 по оси Y). Кривые для каждого испытательного контейнера имеют аналогичное количество резонансов в области от 200 Гц до 1 кГц, но отличаются по частоте и амплитуде пиков. На вертикальной оси отложена амплитуда (g/N; 1 g = 9,81 м/с²), на горизонтальной оси – частота в Гц.

Второй эксперимент был проведен с заменой верхних блоков двух контейнеров одного на другой. Анализ однозначного соответствия показал небольшие изменения в частоте и амплитуде пиков, которые указывают на возможное изменение конфигурации. Анализ глобального критерия показал пониженные значения корреляции,

указывающие на большое изменение в блоке основания ($\chi_s = 0,91$; $\chi_a = 0,92$) и на малое изменение в верхнем блоке ($\chi_s = 0,94$; $\chi_a = 0,95$). Это дает дополнительное подтверждение того, что идентифицирующая сигнатура относится к специфической конфигурации контейнера.

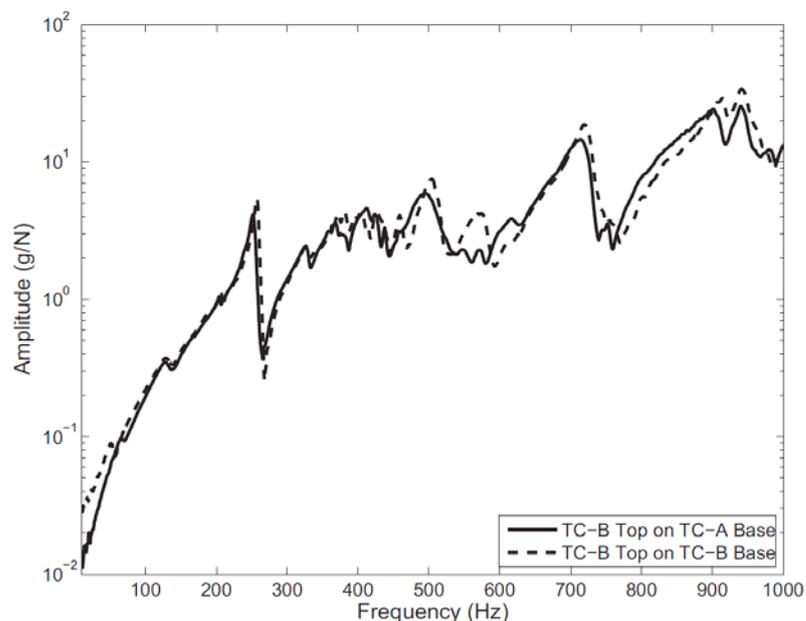


Рисунок 5. Пример функции спектра частотного отклика для сравнения контейнера TC-B (первоначальная конфигурация) с верхним блоком TC-B на блоке основания TC-A. Эти спектры записывались на блоке основания (отклик и возбуждение в положении 7, ось X). Сплошной линией показан спектр с верхним блоком TC-B на блоке основания TC-A, штриховой линией – спектр контейнера TC-B. На вертикальной оси отложена амплитуда (g/N; $1\text{ g} = 9,81\text{ м/с}^2$), на горизонтальной оси – частота в Гц.

Эксперименты по вмешательству – перемещение контейнера

Контейнер перемещался между четырьмя местоположениями и измерялся в каждой точке ((1) первоначальное местоположение, (2) на автопогрузчике с поддонами, (3) на другом этаже и (4) снова в первоначальном положении). Перемещение контейнера в другое местоположение приводило к наблюдаемому изменению в кривых АЧХ точки удара на верхнем блоке в диапазоне низких частот (0 – 200 Гц), причем высокочастотная область спектра (200 Гц – 1 кГц), связанная с идентификацией, оставалась неизменной (рисунок 6). Хотя изменения кривых АЧХ блока основания наблюдались, но изменения в кривых АЧХ верхнего блока были более выраженными. Контейнер ведет себя как жесткое тело, которое поворачивается вокруг соединения блока основания с полом; это приводит к большему перемещению верхней части контейнера, которая больше всего удалена от точки поворота. При сравнении измерений в первоначальном положении и в попытках перемещения контейнера в то же самое положение анализ глобального критерия показывает небольшие изменения корреляций формы и амплитуды, соответственно равные 0,95 и 0,96. Подтверждения этого результата поэтому должны опираться на результаты анализа однозначного соответствия и подтверждающие доказательства из других элементов режима охраны.

Эксперименты по вмешательству – обычные точки входа

В этих экспериментах исследовалась возможность того, что данный метод может быть использован для обнаружения несанкционированной попытки доступа в контейнер через обычные точки входа (то есть, дверцу обслуживания или соединительный узел). Как дверца обслуживания, так и соединительный узел закрепляются болтами. Изменялись следующие конфигурации:

- Дверца обслуживания: (1) первоначальное положение, (2) снята, (3) только правые болты, (4) три болта, и (5) возврат в первоначальное положение.

- Соединительный узел с болтами: (1) болты, затянутые по спецификации, (2) болты, ослабленные и снова затянутые по спецификации, (3) болты, затянутые вручную, и (4) болты, затянутые по спецификации, но в случайном порядке.

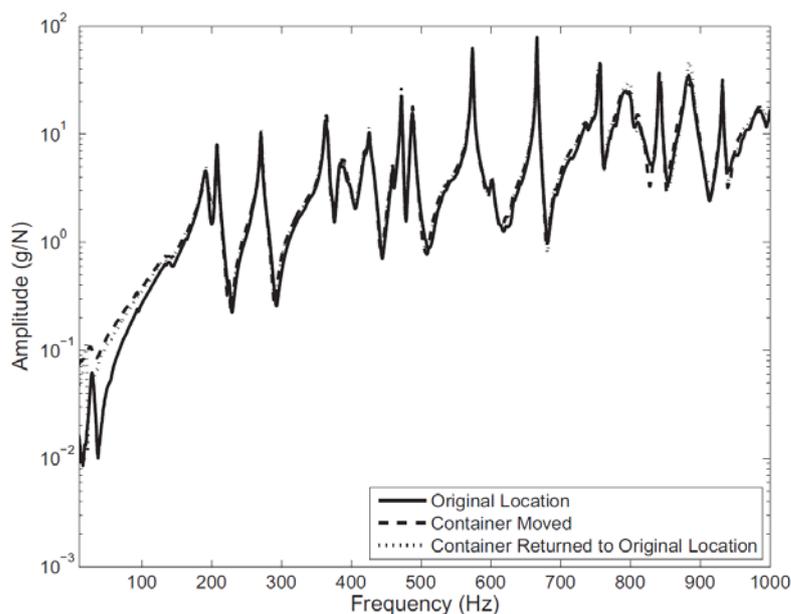


Рисунок 6. Эксперименты с вмешательством, перемещение контейнера, три примера спектров функции частотного отклика (отклик и возбуждение в положении 3, ось Y). Представляется, что перемещение контейнера оказывает большее влияние в низкочастотной части кривой АЧХ (0 – 200 Гц), оставляя высокочастотную область спектра (200 Гц – 1 кГц), связанную с идентификацией, неизменной. Сплошной линией показан спектр для первоначального положения, штриховой линией – спектр перемещенного контейнера, пунктирной линией – спектр контейнера, возвращенного в первоначальное положение. На вертикальной оси отложена амплитуда (g/N ; $1 g = 9,81 m/c^2$), на горизонтальной оси – частота в Гц.

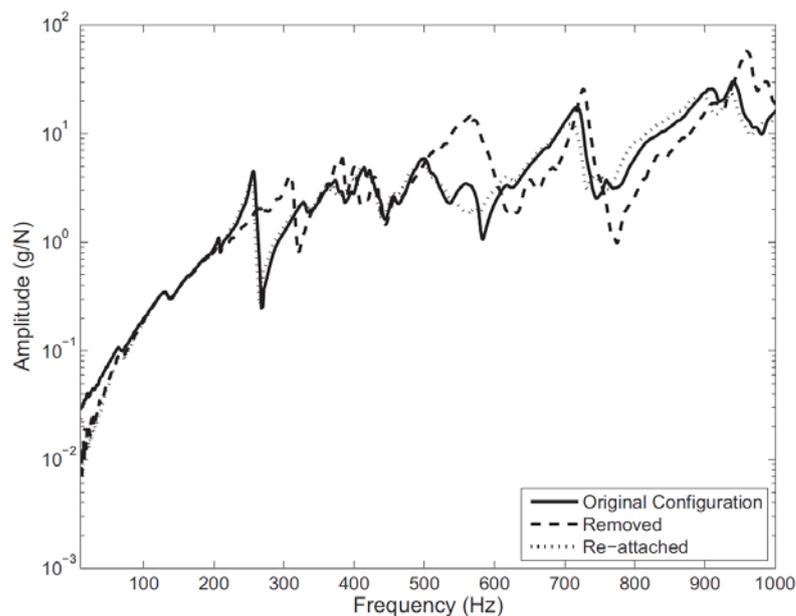


Рисунок 7. Эксперименты с вмешательством, обычная точка входа через дверцу обслуживания, три примера спектров АЧХ (отклик и возбуждение в положении 7, ось X). Эти кривые показывают три конфигурации дверцы обслуживания: сплошной линией показан спектр для первоначального положения, штриховой линией – спектр для снятой дверцы, пунктирной линией – спектр с дверцей, возвращенной в первоначальное положение. На вертикальной оси отложена амплитуда (g/N ; $1 g = 9,81 m/c^2$), на горизонтальной оси – частота в Гц.

Анализ однозначного соответствия спектров АЧХ с блока основания показывает значительные различия для всех конфигураций дверцы обслуживания (рисунок 7). АЧХ для точки удара вблизи дверцы обслуживания представляет самую четкую дифференциацию. Интересно, что этот метод позволяет продвинуться к распознаванию столь тонких изменений конфигурации. Похоже, что данная тема заслуживает дальнейшего рассмотрения, и далее будут обсуждаться связанные с ней некоторые дополнительные выполненные эксперименты.

Анализ однозначного соответствия, относящийся к конфигурации соединительного узла с болтами между верхним блоком и блоком основания (рисунок 8) выявил примечательные различия в спектре АЧХ при сравнении болтов, затянутых вручную, и болтов, затянутых динамометрическим ключом (то есть, по спецификации). Ослабление и повторное затягивание болтов по спецификации приводит к менее выраженному эффекту, который был зарегистрирован как малое изменение в анализе глобального критерия ($\chi_s = 0,94$; $\chi_a = 0,95$). Как малое изменение, этот выход может быть результатом действия факторов оператора или эксперимента.

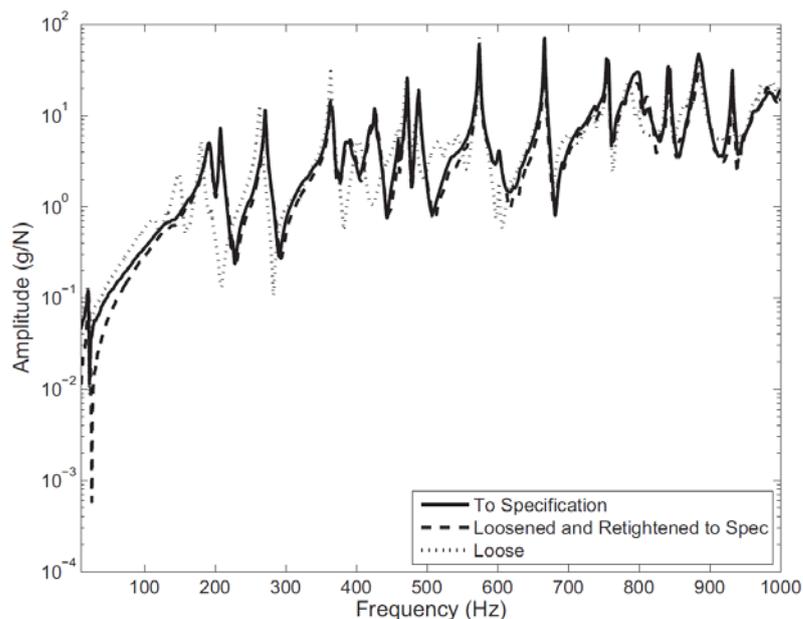


Рисунок 8. Эксперименты с вмешательством, обычная точка входа через соединительный узел с болтами, три примера спектров АЧХ (отклик и возбуждение в положении 3, ось Y). Сплошной линией показан спектр для болтов, затянутых по спецификации, штриховой линией – спектр для болтов, ослабленных и снова затянутых по спецификации, пунктирной линией – спектр для ослабленных болтов. На вертикальной оси отложена амплитуда (g/N; $1\text{ g} = 9,81\text{ м/с}^2$), на горизонтальной оси – частота в Гц.

Эксперименты по вмешательству – эксперименты по вмешательству и ремонту

Были исследованы следующие конфигурации экспериментов по вмешательству и ремонту:

- Сравнение поврежденных и неповрежденных контейнеров (отверстия в блоке основания и верхнем блоке с размерами от 5 до 20 мм).
- Сравнение с контейнером, который был отремонтирован заплаткой из металлической сетки над отверстиями.

Повреждение контейнера вызывает потерю определенных резонансных пиков в кривых АЧХ верхнего блока, в особенности выше 400 Гц (рисунок 9). АЧХ в точке удара, ближайшей к повреждению, предоставляет наиболее четкую дифференциацию. Замечено, что более жесткий и сильнее демпфированный блок основания предоставляет менее полезную динамическую информацию по сравнению с верхним блоком. Попытки исправить повреждение также проявляются в анализе однозначного соответствия АЧХ откликов (рисунок 10); это подтверждается большим изменением в коэффициентах корреляции глобального критерия ($\chi_s = 0,91$; $\chi_a = 0,93$). Отмечено, что:

- Идеально измерения следует проводить в точках, ближайших к области вмешательства.
- Жесткость и масса контейнера будут влиять на способность данного метода выявить изменение. Изменения в жестком и более тяжелом блоке основания будут менее заметны, чем в верхнем блоке.
- Ремонт проводился наложением легкой заплатки; другие способы ремонта будут приводить к различным результатам.
- Способность данного метода к обнаружению изменений на донной стороне контейнера в этой экспериментальной кампании не проверялась.

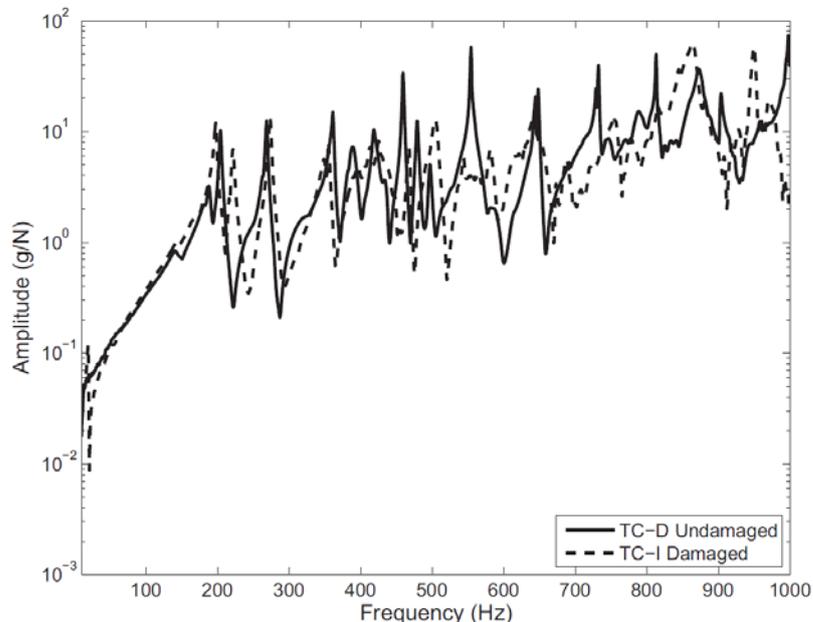


Рисунок 9. Эксперименты с вмешательством и ремонтом, сравниваются два примера спектров АЧХ неповрежденного контейнера TC-D (сплошная линия) и поврежденного контейнера TC-I (штриховая линия) (отклик и возбуждение в положении 3, ось Y). На вертикальной оси отложена амплитуда (g/N; $1\text{ g} = 9,81\text{ м/с}^2$), на горизонтальной оси – частота в Гц.

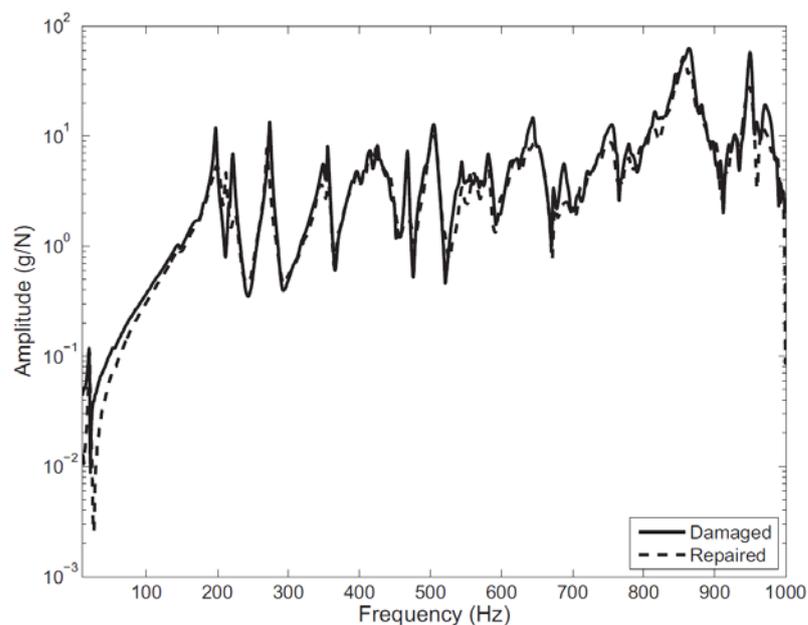


Рисунок 10. Эксперименты с вмешательством и ремонтом, влияние ремонта контейнера, сравниваются два примера спектров АЧХ (отклик и возбуждение в положении 3, ось Y). Сплошная линия соответствует поврежденному контейнеру, штриховая линия – отремонтированному. На вертикальной оси отложена амплитуда (g/N; $1\text{ g} = 9,81\text{ м/с}^2$), на горизонтальной оси – частота в Гц.

Внутренняя конфигурация

Были испытаны следующие внутренние конфигурации:

- Полная фурнитура без испытательной массы.
- Полная фурнитура с испытательной массой.
- Частичная фурнитура.
- Без внутреннего содержания.

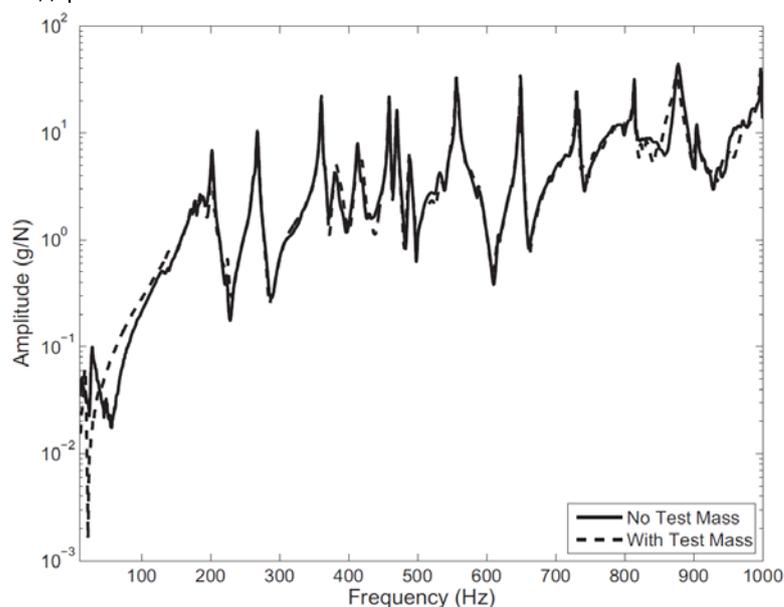


Рисунок 11. Примеры спектров АЧХ для сравнения контейнера (с полной фурнитурой) с испытательной массой (штриховая линия) и без нее (сплошная линия) (отклик и возбуждение в положении 3, ось Y). Представляется, что изменение внутреннего содержания оказывает большее влияние в низкочастотной части кривой АЧХ (0 – 200 Гц), оставляя высокочастотную область спектра (200 Гц – 1 кГц), связанную с идентификацией, неизменной. На вертикальной оси отложена амплитуда (g/N; 1 g = 9,81 м/с²), на горизонтальной оси – частота в Гц.

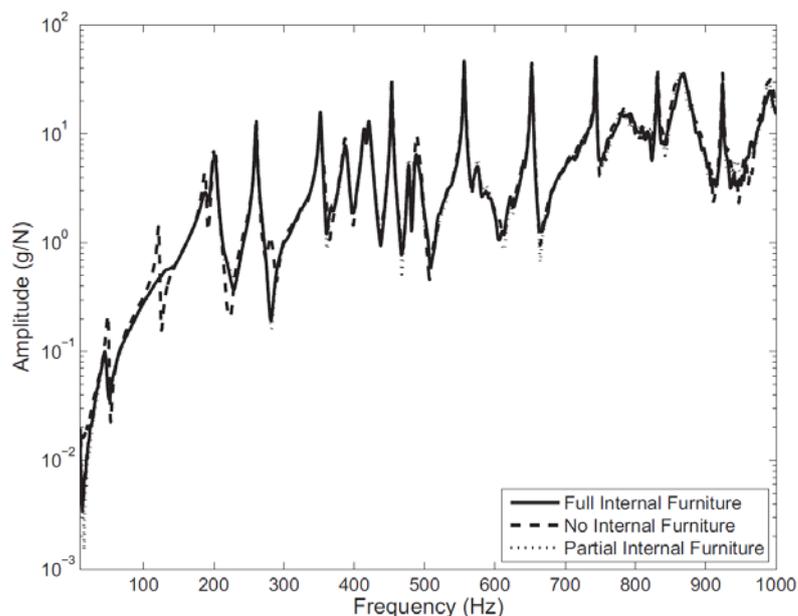


Рисунок 12. Примеры спектров АЧХ для сравнения контейнера без испытательной массы с полной фурнитурой (сплошная линия), частичной фурнитурой (штрих-пунктирная линия) и без фурнитуры (штриховая линия) (отклик и возбуждение в положении 3, ось Y). Представляется, что изменение внутреннего содержания оказывает большее влияние в низкочастотной части кривой АЧХ (0 – 200 Гц), оставляя высокочастотную область спектра (200 Гц – 1 кГц), связанную с идентификацией, неизменной. На вертикальной оси отложена амплитуда (g/N; 1 g = 9,81 м/с²), на горизонтальной оси – частота в Гц.

Анализ однозначного соответствия показывает, что изменения внутреннего содержания, по-видимому, оказывают большее влияние в низкочастотной части кривой АЧХ (0 – 200 Гц), оставляя высокочастотную область спектра (200 Гц – 1 кГц), связанную с идентификацией, неизменной (рисунки 11 и 12). Метод определяет разницу при больших изменениях во внутреннем содержании контейнера, то есть добавления полной фурнитуры или добавления испытательной массы. Эти крупномасштабные изменения приводят к появлению дополнительных резонансных пиков или провалов в диапазоне от 0 до 200 Гц (рисунки 11 и 12). Анализ глобального критерия подтверждает это наблюдение, показывая большие изменения в значениях корреляции при сравнении контейнера с испытательной массой и без нее ($\chi_s = 0,90$; $\chi_a = 0,93$). Отметим, что доступ к внутреннему содержанию контейнера открывался после отвинчивания болтов соединительного узла и удаления верхнего блока; во время повторной сборки болты закручивались согласно спецификации.

Метод однозначного соответствия не был достаточно чувствительным для обнаружения более тонких изменений, когда удалялась только часть внутреннего содержания (рисунок 12). Это было снова подтверждено сравнением полной фурнитуры и частичной фурнитуры по методу глобального критерия, которые привели к корреляциям формы и амплитуды, соответственно равным 0,95 и 0,97, попадающим в категорию отправной точки или не обнаружимого изменения. Для того, чтобы понять, насколько чувствительным может быть этот подход к изменениям внутренней конфигурации, необходима дальнейшая работа, поскольку результат будет зависеть от конструкции контейнера и взаимодействия между контейнером и его содержимым.

Методология анализа данных

Хотя анализ однозначного соответствия является простым качественным способом анализа данных, в этом сценарии у него есть два недостатка:

- Он требует субъективного суждения эксперта предметной области.
- В нем используется только часть доступного набора данных.

Метод анализа глобального критерия использовался только в части проведенных экспериментов, но он продемонстрировал возможность автоматизации рутинного анализа и использования всех доступных данных. Метрики корреляции формы и амплитуды предоставляют очень хорошую общую характеристику конструкции и не требуют персонального суждения о том, какие АЧХ являются важными. Идеальным подходом могло бы стать совместное использование анализа однозначного соответствия и анализа глобального критерия, с точным балансом методов, определяемым в каждом конкретном случае. Анализ глобального критерия может предоставить отслеживающей стороне первоначальное указание на аномалию и классификацию полученного результата в смысле серьезности (например, в данном эксперименте использовались термины малого и большого изменения). Этот анализ затем может использоваться для направления усилий отслеживающей стороны на оценку такой аномалии с помощью анализа однозначного соответствия и свидетельств из других элементов системы режима охраны.

Метод глобального критерия использует полный спектр от 0 до 1 кГц, однако некоторые эффекты наблюдались только в определенных участках кривой. Подход зоны интереса, разделяющий спектр на диапазоны частот, может предоставить повышенную чувствительность в отношении классификации результатов, указывая не только на уровень изменения, но и на то, где могли произойти изменения. Интеграция подхода с методами корреляции изображения также может предоставить повышенные возможности, указывая на то, какие спектры АЧХ в наборе данных должны быть выбраны для анализа однозначного соответствия.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Из предыдущего опыта было известно, что переборка конструкции, включающей соединения, редко приводит к тому же самому общему АЧХ-отклику. Экспериментальные результаты данных испытаний продемонстрировали, что этот метод способен обнаружить небольшое изменение, возникающее из-за переборки соединения, даже тогда, когда выполнялись согласованные спецификации для сборки. Было принято, что этот эффект может быть использован при конструировании контейнера с индикацией вмешательства, для того, чтобы обеспечить, чтобы операция сборки создавала уникальный характерный АЧХ-признак, который не может быть повторен. Небольшой контейнер был модифицирован для поддержки первоначального экспериментального исследования. Контейнер состоял из двух частей: основного корпуса и крышки с резиновой прокладкой. Крышка

и основной корпус контейнера были соединены четырьмя болтами. Болты позволяли создать уникальную картину напряжений в соединении и контейнере в целом, прилагая различные конфигурации крутящих моментов болтов.

Было получено небольшое количество АЧХ с применением легкого модального молотка и одноосного акселерометра. Болты соответственно затягивались с крутящими моментами в 2, 3, и 4 Н·м, и испытывались для каждого набора крутящих моментов; результаты показали, что величина момента затягивания болта существенно влияет на характеристики АЧХ. Болты контейнера были ослаблены, затянуты снова, и испытаны для каждого из наборов крутящих моментов в 2, 3, и 4 Н·м; это приводило к изменению в спектре АЧХ. Это показало возможность определения факта открытия контейнера, в особенности для конфигураций с меньшими крутящими моментами.

ВЫВОДЫ

Целью настоящего проекта является оценка того, сможет ли метод испытаний на форму быть использован в режиме охраны, развернутом как часть возможного будущего мониторинга режима демонтажа ядерного оружия. Было предложено, чтобы эта технология была бы применена как метод отслеживания сигнатуры. Спектры амплитудно-частотной характеристики вибраций должны будут записываться до и после того, как изделия в контейнерах, учитываемые по договору, принимаются на хранение, или в течение этапа транспортировки. Сравнение этих наборов данных покажет, происходило ли несанкционированное изменение контейнера, ли объекта в контейнере.

Была проведена предварительная экспериментальная кампания, в которой исследовалась пригодность метода в отношении развертывания, воспроизводимости, уникальной идентификации, индикации вмешательства в контейнер и обнаружения изменения внутренней конфигурации. Для поддержки кампании использовалась модельная система контейнера и объекта, и была разработана оптимизированная установка для испытаний на форму. Развернутый метод предусматривал использование калиброванного модального молотка (измерение возбуждения) и трехосных акселерометров (измерение отклика). Этап анализа данных включает аналитический метод для классификации результатов с целью поддержки суждения оператора, или для того случая, когда в сборке контейнера и объекта произошло существенное изменение.

Могут быть выведены следующие заключения, соотносящиеся к первоначальным целям экспериментальной кампании:

- **Развертывание:** В целом представляется, что было бы возможно развернуть этот метод в рамках режима мониторинга. Для разработки эксперимента и осуществления начальной настройки потребуются эксперт предметной области (на этом этапе ключом к успеху подхода испытаний на форму является тщательное проектирование). Было оказано, что окончательная установка является быстрой, надежной, транспортабельной и легко развертываемой несколькими группами мониторинга. Процедура испытаний может быть выполнена всего лишь через несколько часов обучения; детальный анализ данных должен будет выполняться опытным оператором.
- **Подход к анализу данных:** Подход, включающий как анализ однозначного соответствия, так и анализ глобального критерия, по-видимому, представляет хороший баланс субъективной оценки оператора и независимого автоматизированного анализа данных. Анализ глобального критерия предоставляет способ классификации результатов в терминах «серьезности»; потенциально это может помочь группе мониторинга эффективно направить любое последующее расследование.
- **Воспроизводимость:** Эксперимент является воспроизводимым и не зависящим от оператора, как в отношении разметки местоположений измерений и выполнения последовательности измерений.
- **Уникальная идентификация:** Метод уникально идентифицировал каждый контейнер в заданном наборе образцов; попытки замены компонентов также идентифицировались системой.
- **Индикация вмешательства:** Перемещение контейнера в заданное положение и из него определялись в измеренном отклике как наблюдаемые изменения. Этот индикатор находился в низкочастотной части измеренного спектра; при этом часть «уникального идентификатора сигнатуры» оставалась неизменной. Эксперименты продемонстрировали, что метод может обнаруживать небольшие изменения, которые могут возникать после отвинчивания и последующего привинчивания присоединенной конструкции, даже если повторная сборка проводилась в соответствии со спецификациями. Измерялись поврежденные и отремонтированные контейнеры, и было показано, что этот метод может обнаруживать несанкционированные попытки доступа к контейнеру через разрезы в его корпусе.

- **Внутренняя конфигурация:** Метод обнаруживал, что объект был помещен в контейнер, а также обнаруживал любое крупномасштабное изменение внутренней конфигурации.

В заключение, эта технология испытаний на форму обладает потенциалом в качестве инструмента отслеживания сигнатуры в режиме охраны, в котором она уникально идентифицирует заданные контейнеры, предоставляет уровень индикации вмешательства и может быть развернут в режиме такого рода. Однако, для полного исследования того, как этот метод может быть использован, потребуется дополнительная работа. Успех метода, в особенности в индикации вмешательства, зависит от размеров и конструкции контейнера, и позиционирования местоположений измерений. Выбор местоположений измерений в течение настоящих испытаний базировался на суждении эксперта в совокупности с уровнем знаний о конструкции контейнера. Принимающая сторона может не быть подготовлена к обсуждению конструкции контейнера; в таких обстоятельствах для отслеживающей стороны может оказаться трудным оценить эффективность похода испытаний формы. Тем не менее, имеется потенциальное приложение, в котором контейнер будет специально разработан для такого режима, или где подробности конструкции контейнера будут раскрыты обеим сторонам. Отметим, что в ситуациях, в которых будет раскрыта полная конструкция контейнера, может оказаться возможным использование аналитических моделей для оптимизации экспериментальной установки.

Учитывая вышеизложенное, потенциальная будущая работа в данной области может включать следующее:

- Метод следует проверить на восприимчивость к факторам окружающей среды (то есть температуре).
- Расширение экспериментов по уникальной идентификации для включения большего набора образцов и различных типов контейнеров.
- Более подробное исследование свойств определения вмешательства, включая рассмотрение различных механизмов ремонта, размера вмешательства и расположения области вмешательства на контейнере.
- Исследование чувствительности данного метода к изменениям внутренней конфигурации. Эта дополнительная работа позволит также произвести полную оценку того, потребуется ли информационный барьер при развертывании данного метода.
- Дальнейшее рассмотрение потенциальных дополнительных эффектов, включая несколько одновременных факторов вмешательства и действия окружающей среды.
- Усовершенствование анализа глобального критерия и классификационного подхода для дальнейшего выявления и категоризации аномалий.
- Исследование «дизайнерских контейнеров», включающих соединения с усиленными свойствами индикации вмешательства.

Для всех методов мониторинга, развернутых в таком сценарии, важно рассмотреть, как принимающая и отслеживающая стороны смогут достичь взаимного доверия к развернутому оборудованию (то есть аутентификации и сертификации), и поддерживать его. Для того, чтобы исследовать, как может быть достигнута аутентификация и сертификация системы, потребуются дальнейшие исследования.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. United Kingdom, "Verification of Nuclear Disarmament: Final Report on Studies into the Verification of Nuclear Warheads and their Components," paper presented at the NPT Review Conference, New York, USA, 2–27 May 2005.
2. Attila Burjan and David Keir, "Arms Control Verification – Recent Studies at the UK Atomic Weapons Establishment," Proceedings of the Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Tucson, Arizona, USA, 8–12 July 2007.
3. Helen White, David M. Chambers, David Keir, Keir Allen, Attila Burjan, and Mark Owen, "Research into Nuclear Arms Control Verification at the UK Atomic Weapons Establishment," Proceedings of the Annual Meeting of the *Institute of Nuclear Materials Management, Tucson, Arizona, USA, 12–16 July 2009.
4. Helen White, Aled Richings, Keir Allen, Attila Burjan, Sarah McOmish, Martin Morgan-Reading, Clive Pearman, Seb De Muynck and David M. Chambers, "An Overview of Research into Arms Control Verification at AWE," Proceedings of the ESARDA Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management, Bruges, Belgium, 28–30 May 2013.
5. Helen White et al., "An Overview of Research into Arms Control Verification at AWE" (ссылка 4).

6. Jennifer Tanner, Jake Benz, Helen White, Sarah McOmish, Keir Allen, Keith Tolk and George Weeks, "The 'Room within a Room' Concept for Monitored Warhead Dismantlement," Proceedings of the ESARDA Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management, Bruges, Belgium, 28–30 May 2013.
7. Jake Benz, Jennifer Tanner and Leesa Duckworth, "Templating as a Chain of Custody Tool for Arms Control," Proceedings of the ESARDA Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management, Bruges, Belgium, 28–30 May 2013.
8. Sandia National Laboratories, and Jack Bartberger, Passive Tamper-Indicating Secure Container, SAND-93-1651C, 1993.
9. Sandia National Laboratories, and B. D. Black, Survey of High Security Tamper- Indicating Enclosures, SAND-91-1567C, 1991.
10. Pacific Northwest National Laboratories, Paul Sliva et al., Optical-Based Smart Structures for Tamper-Indicating Applications, PNNL-11407, 1996.
11. Helen White, Paul Wynn, Keir Allen, Kevin Simmons, Paul Sliva, Jake Benz and Jennifer Tanner, "Passive Tamper Indicating Enclosures Incorporating Embedded Optical Fibre," Proceedings of the Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Palm Desert, California, USA, 17–21 July 2011.
12. Helen White, Jennifer Tanner, Keir Allen, Jake Benz, Sarah McOmish and Kevin Simmons, "A Passive Tamper Indicating Enclosure for use within a Nuclear Weapons Monitoring Regime," Proceedings of the Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Orlando, Florida, USA, 15–19 July 2012.
13. Jennifer Tanner et al., "The 'Room within a Room' Concept for Monitored Warhead Dismantlement" (ссылка 6).
14. Jacob Benz et al., "Templating as a Chain of Custody Tool for Arms Control" (ссылка 7).
15. Tore Ramsøy, Edward Day, K. Allen, C. Marsh, M. Morgan-Reading, A. Richings, S. Backe, T. Bjerk, S. Hustvelt, S. Høibråten, K. Johansson, and H. E. Torkidsen, "United Kingdom – Norway Initiative Information Barrier Development: Technical Trial Results," Proceedings of the Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Palm Desert, California, USA, 14–18 July 2013.
16. David Ewins, *Modal Testing – Theory, Practice and Application 2nd Edition*, (Baldock, Hertfordshire: Research Studies Press Ltd, 2000), 1–8.
17. Helen White et al., "An Overview of Research into Arms Control Verification at AWE" (ссылка 4).
18. Chaoping Zang, H. Grafe, and M. Imregun, "Frequency-Domain Criteria for Correlating and Updating Dynamic Finite Element Models," *Mechanical Systems and Signal Processing* (2001): 15(1), 139–155.