

11. Jirsik, T. Identifying Operating System Using Flow-based Traffic Fingerprinting [Text] / T. Jirsik, P. Celeda // 20th EUNICE/IFIP EG 6.2, 6.6 International Workshop, 2014. – P. 70–73. doi: 10.1007/978-3-319-13488-8_7
12. Arkin, O. Xprobe - Remote ICMP Based OS Fingerprinting Techniques [Text] / O. Arkin. – 2001
13. Zalewski, M. Ciszа w sieci [Text] / M. Zalewski. – Helion, 2005. – 304 p.
14. Montigny-Leboeuf, A. De. A Multi-Packet Signature Approach to Passive Operating System Detection [Text] / A. De Montigny-Leboeuf. – Communications Research Centre Canada, 2005.
15. Gutkowski, M. Kilka ciekawych metod rozpoznawania systemu operacyjnego [Text] / M. Gutkowski // Hakin9. – 2004. – Vol.2
16. Allen, J. M. OS and Application Fingerprinting Techniques [Text] / J. M. Allen. – SANS Institute InfoSec Reading Room, 2007. – 49 p.
17. Lloyd, G. G. Evaluating Tests used in Operating System Fingerprinting [Text] / G. G. Lloyd, J. T. Tavaris. – LGS Bell Labs Innovations Technical Memorandum TM-071207.
18. Shu, G. Network Protocol System Fingerprinting – A Formal Approach [Text] / G. Shu, D. Lee // Proceedings of 25th IEEE International Conference on Computer Communications, 2006. – P. 12. doi: 10.1109/infocom.2006.157
19. Lippmann, R. Passive Operating System Identification From TCP/IP Packet Headers [Text] / R. Lippmann, D. Fried, K. Piwowarski, W. Streilein. – Springer, 2005.
20. Nostromo, Techniques in OS-Fingerprinting [Text] / Nostromo. – Hagenberg, 2005. – 24 p.

Розроблено програму обробки сигналів в математичному пакеті MATLAB і віртуальний прилад з підтримкою до семи вимірjовальних каналів. Проведено оцінку корисних сигналів. У графічному пакеті CATIA створено тривимірну модель резервуара об'ємом 0,04 м³. Проведено модальний аналіз конструкції з використанням програмного комплексу ANSYS. Показано, що ефективність макета каналу вимірювання вібрації становить понад 90 %

Ключові слова: вібраційна діагностика, вертикальний сталевий резервуар, LabVIEW, діагностичний комплекс, ANSYS

Разработана программа обработки сигналов в математическом пакете MATLAB и виртуальный прибор с поддержкой до семи измерительных каналов. Проведена оценка полезных сигналов. В графическом пакете CATIA создана трехмерная модель резервуара объемом 0,04 м³. Проведен модальный анализ конструкции с использованием программного комплекса ANSYS. Показано, что эффективность макета канала измерения вибрации составляет свыше 90 %

Ключевые слова: вибрационная диагностика, вертикальный стальной резервуар, LabVIEW, диагностический комплекс, ANSYS

УДК 004.925.8: 624.953: 004.03

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50980

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА КАНАЛА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Н. И. Бурау

Доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой*
E-mail: burau@pson.ntu-kpi.kiev.ua

С. А. Цыбульник

Аспирант*
E-mail: Tsybulnik.s.a@gmail.com

Д. В. Шевчук

Аспирант*
E-mail: 00012066@ukr.net

*Кафедра приборов и систем ориентации и навигации
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

1. Введение

В последние десятилетия во многих развитых странах мира большое внимание уделяется обеспечению безопасной эксплуатации сложных инженерных сооружений и конструкций различного назначения,

к которым относятся такие ответственные объекты, как: мосты, гидротехнические сооружения, хранилища опасных веществ, электростанции, объекты газовой и нефтегазотранспортной области, а также другие. На сегодняшний день проектирование большинства ответственных конструкций основывается на принципе

безопасного повреждения [1], при котором наличие или возникновение микродефектов в конструкциях рассматривается как возможное, но такое, что не приводит к потере работоспособности и разрушению объекта. Это обусловлено тем, что на практике есть ряд факторов, которые способствуют появлению микродефектов и которые не всегда могут быть учтены расчетами конструкции на прочность и устойчивость. К таким факторам, в первую очередь, относятся конструктивные и технологические погрешности производства, а также эксплуатационные факторы, связанные с нарушением условий и режимов эксплуатации и с влиянием внешних динамических возмущений природного или техногенного происхождения.

При эксплуатации имеющиеся в элементах конструкций микродефекты взаимодействуют, развиваются и со временем могут привести к потере несущей способности или к полному разрушению объекта. Чаще всего эксплуатационные повреждения проявляются в виде трещин, коррозии, а наиболее опасными местами их расположения являются места крепления различных элементов конструкции и сварные швы.

В широком смысле эксплуатационные повреждения можно рассматривать как физический износ под воздействием системы вредоносных факторов (старение, перегрузки, коррозия, усталость металла, внешние возмущения природного и техногенного происхождения и так далее), что в конечном итоге приводит к уменьшению ресурса, эксплуатационной пригодности элементов конструкции и их разрушению. Поэтому для безаварийной эксплуатации ответственных инженерных объектов необходимо своевременно выявлять повреждения на всех этапах их развития, а также прогнозировать предельные состояния конструкции.

Одним из путей обеспечения надежной, безаварийной и эффективной эксплуатации сложных инженерных сооружений и конструкций является мониторинг их жизненного цикла на основе комплексного анализа информации о текущем техническом состоянии (ТС), эксплуатационных нагрузках и воздействиях внешней среды. Разработанные в последнее десятилетие методы, методики и технологии диагностирования позволяют создать диагностические системы нового класса – комплексные интеллектуальные системы мониторинга (КИСМ) ТС конструкций в эксплуатации. Такие системы по принципам построения и функционирования можно отнести к системам, реализующим современную концепцию Structural Health Monitoring (SHM). Концепция SHM сейчас активно развивается за рубежом [1–4] и предусматривает непрерывный и автономный контроль дефектов и повреждений, статических и динамических нагрузок, взаимодействия элементов конструкций с окружающей средой с помощью сети постоянно прикрепленных или встроенных в объект контроля чувствительных элементов. Таким образом, системы SHM обеспечивают мониторинг жизненного цикла

объекта контроля для его надежной и безопасной эксплуатации.

Именно на базе концепции SHM и была разработана структура информационно-диагностического комплекса (рис. 1) для мониторинга и прогнозирования технического состояния вертикальных стальных резервуаров, которые эксплуатируются в труднодоступных местах под влиянием динамических возмущений [5, 6].

Данный комплекс предназначен для функционирования в режиме реального времени, он стационарный и автоматический, имеет современное программное обеспечение и гибкую структуру. Для получения диагностической информации используются датчики, построенные на различных физических принципах (датчики вибрации, тензорезисторы, инклинометры). Модуль АЦП, который имеет встроенный микропроцессор, преобразует измеренные сигналы в цифровой вид и передает их в абонентскую станцию беспроводной связи, которая, в свою очередь, передает полученные данные на подключенную к блоку записи базовую станцию. В блоке обработки выполняется анализ диагностической информации и устанавливаются зависимости между полученными данными о действующих возмущениях и изменением параметров, которые характеризуют ТС объекта контроля. Информация о внешних возмущениях поступает от блока автоматизированного определения метеорологических параметров. Дополнительная информация о состоянии объекта контроля выводится на устройство графического отображения. Устройство аварийной сигнализации необходимо для предупреждения персонала об изменении ТС объекта контроля.

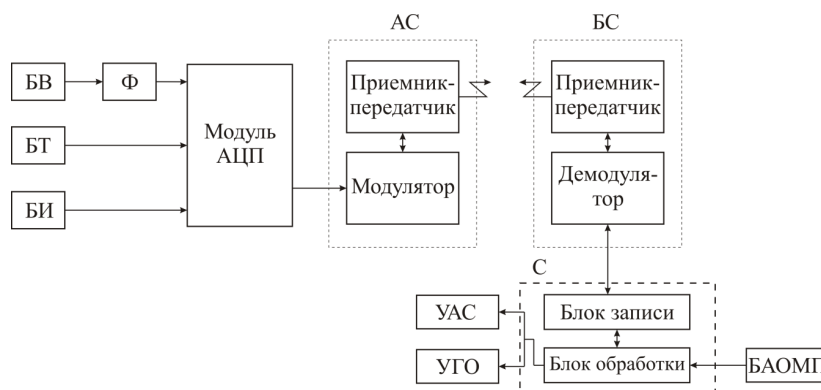


Рис. 1. Структурная схема КИСМ: БВ – блок вибродатчиков; БТ – блок тензорезисторов; БИ – блок инклинометров; АС – абонентская станция; БС – базовая станция; УГО – устройство графического отображения; БАОМП – блок автоматизированного определения метеорологических параметров; УАС – устройство аварийной сигнализации; Модуль АЦП – модуль аналогово-цифрового преобразования; С – сервер; Ф – фильтр

В случае, когда определены диагностические задачи и приемлемые для рассматриваемого объекта методы контроля и диагностики, эффективность мониторинга в основном зависит от таких факторов, как: структура системы мониторинга; характеристики измерительных каналов; методы и алгоритмы анализа диагностической информации. В статье рассмотрены и проанализированы, полученные в процессе исследования, данные о составной части КИСМ – макета канала измерения вибрации.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В процессе разработки КИСМ авторами данной статьи были рассмотрены и проанализированы схемы построения и принципы функционирования современных систем мониторинга, которые решают задачи контроля ТС сложных объектов. В результате этого можно выделить наиболее распространенные схемы таких систем.

В работах [7, 8] авторы рассматривают задачу мониторинга объекта контроля по параметрам его напряженно-деформированного состояния. Для этого используются GPS датчики и акселерометры. Данные полученные с их помощью обрабатываются известными методами неразрушающего контроля и анализируются оператором системы мониторинга. Следует отметить, что GPS датчики имеют ряд недостатков, среди которых следует отметить: малую точность (зависит от числа наблюдаемых спутников и их геометрического расположения), низкую частоту передачи информации и трудность в реализации многоканальной схемы построения системы. Аналогичные минусы имеет система, описанная в [9], поскольку в ней используется выделенный спутниковый канал передачи данных. Также её существенным недостатком является высокая стоимость такой системы и трудности, возникающие при синхронизации измерительных каналов.

Среди преимуществ можно отметить:

- возможность увеличения количества объектов контроля, ограничивается только скоростью передачи данных в линиях связи и скоростью обработки диагностических данных;
- диагностирование удаленных друг от друга объектов;
- проведение контроля объектов, находящихся в труднодоступных и значительно удаленных местах, или в сложных условиях эксплуатации.

Такими же преимуществами обладают современные системы с беспроводными каналами связи. Именно такая система мониторинга рассмотрена в [10]. Существенным недочетом этой системы является отсутствие блока анализа полученных данных (данные могут только сохраняться и отображаться).

Система [11] является еще одним примером использования современных технологий передачи данных в сфере контроля технического состояния строительных конструкций. Она построена на основе Ethernet-технологий.

Использование Ethernet-технологий для передачи информации позволяет путем последовательной агрегации данных от большого числа пространственно разнесенных датчиков решить следующие задачи:

- существенно сократить число используемых кабелей;
- обеспечить высокую надежность и достоверность передачи данных;
- синхронизировать потоки данных и организовать управление ими;
- обеспечить возможность резервирования не только на уровне каналов передачи данных, но и на уровне потоков данных.

Основными недостатками рассматриваемой системы являются сложности в построении Ethernet-сетей и отсутствием аварийной сигнализации.

Система мониторинга безопасной эксплуатации конструкций зданий и инженерно-строительных сооружений [12] работает следующим образом: в процессе эксплуатации объекта происходит изменение их технологических параметров. Датчики регистрируют эти изменения и передают их на персональный компьютер. Тот в свою очередь сравнивает текущие значения показателей датчиков с предельно допустимыми их значениями, заложенными в память блока предварительной обработки сигналов, и передает результаты сравнения в ячейки памяти для хранения. При превышении численных значений параметров хотя бы одним из датчиков предельно-допустимого значения или приближении значений до порогового значения показателей нескольких датчиков персональный компьютер вырабатывает сигнал "Тревога".

Аналогичная система оповещения рассмотрена в работе [13]. Отличие её состоит лишь в том, что предельно-допустимые значения получают в процессе статического расчета конструктивной схемы объекта в программном комплексе ANSYS.

Недостатком [12,13] является то, что они определяют ТС объекта диагностики только на момент снятия датчиками характеристик объекта контроля. При этом они не позволяют осуществить прогнозную оценку будущего технического состояния объекта на долгосрочный временной интервал. Следует отметить, что описанная проблема присуща всем выше описанным системам. Пример системы с реализацией прогнозного расчета ТС представлен в [14]. Эта система мониторинга осуществляет разделение параметров ТС зданий и сооружений на две группы: группа параметров нижней части и группа параметров верхней части объекта. В свою очередь параметры верхней и нижней части определяются по результатам натуральных измерений от датчиков для мониторинга ТС. На основе параметров нижней части объекта рассчитываются параметры строительных конструкций верхней части и сравниваются с аналогичными параметрами натуральных измерений верхней части. Затем экстраполируя трендовые значения параметров ТС нижней части объекта на заданный временной интервал определяют прогнозные расчетные параметры строительных конструкций верхней части объекта, фиксируют для потребителя прогнозную оценку будущего ТС объекта на основе сравнительного анализа прогнозных расчетных параметров ТС строительных конструкций верхней части объекта с предельно допустимыми значениями.

Недостатками такого способа, а также системы мониторинга и прогнозирования технического состояния зданий и сооружений, являются:

1. В системе отсутствует устройство аварийной сигнализации, что приводит к необходимости присутствия оператора, то есть система работает в полуавтоматическом режиме.
2. При прогнозировании технического состояния объекта диагностики система не учитывает внешние возмущающие силы, она учитывает лишь реакцию на возмущение нижней части объекта. Это делает расчетные прогнозные параметры неточными, особенно если объект находится в зоне больших ветровых, сейсмиче-

ских и гидрогеологических нагрузок, так как именно верхняя часть объекта диагностики будет воспринимать большую часть этих нагрузок.

Анализ приведенных выше систем мониторинга позволил определить преимущества и недостатки современных комплексов для контроля ТС строительных конструкций. Решение указанных недостатков при разработке КИСМ позволит проводить более качественный и надежный контроль. Поэтому в разработанной схеме КИСМ значительное внимание уделено вопросам прогнозирования ТС объекта контроля по данным виброизмерений с учётом действующих на него внешних динамических возмущений. Также предусмотрено наличие устройства аварийной сигнализации и устройство графического отображения, которое использует данные полученные в процессе имитационного моделирования.

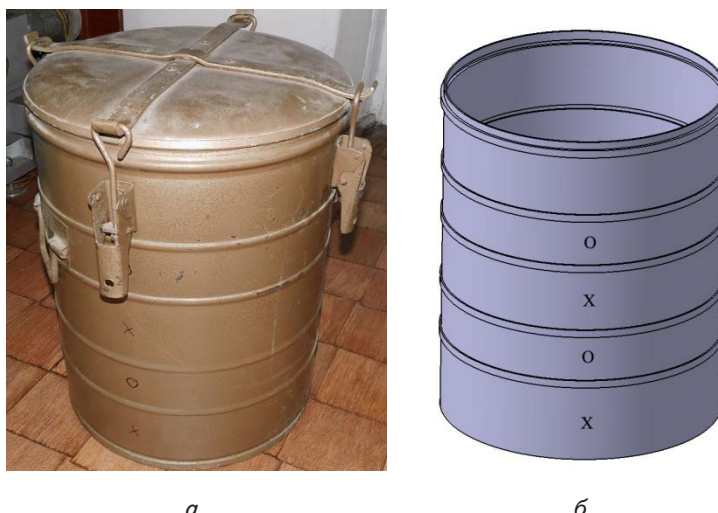


Рис. 2. Модель объекта контроля: а – вертикальный стальной резервуар; б – трехмерная модель

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование составной части КИСМ – макета канала измерения вибрации для отработки и совершенствования методики проведения вибрационных измерений, а также программы обработки сигналов с целью последующего их внедрения в систему для корректного анализа ТС объекта контроля.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определить влияние шумов АЦП на результаты измерений;
- провести модальный анализ объекта контроля с использованием программного комплекса конечно-элементного моделирования ANSYS;
- провести сравнительный анализ результатов конечно-элементного моделирования и обработки сигналов вибрации;
- рассчитать значение погрешностей определения частот в канале измерения вибрации.

4. Исследование макета канала измерения вибрации

4. 1. Описание объекта контроля

В качестве физической модели объекта контроля для исследования эффективности макета канала измерения вибрации был использован вертикальный стальной резервуар цилиндрической формы объемом 0,04 м³ (рис. 2, а). Резервуары подобного типа зачастую используются для хранения экологически-опасных веществ, таких как: нефть или нефтепродукты, химикаты, токсические вещества, газы. Для указанной физической модели резервуара была создана упрощенная трехмерная модель в графическом пакете САТІА (рис. 2, б). Упрощение модели заключается в исключении некоторых элементов конструкции (например, ручек и зажимов крышки) для оптимизации соотношения время расчета/точность результатов при имитационном моделировании.

4. 2. Макет канала измерения вибрации

Макет канала измерения вибрации КИСМ был реализован в соответствии с приведенной на рис. 3 схемой.



Рис. 3. Общая структурная схема канала измерения вибрации: О – объект контроля; БА – блок акселерометров; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БО – блок обработки (персональный компьютер)

В качестве датчиков первичной информации использован блок акселерометров, состоящий из двух закрепленных на плате МЭМС датчиков MS8002.D фирмы Colibrus, технические характеристики которых приведены в табл. 1. Платы с датчиками размещены на корпусе так, что измерительные оси акселерометров являются ортогональными. Под действием ускорения инерционная масса датчика смещается относительно положения своего равновесия, это смещение превращается в соответствующий электрический сигнал и передается на 14-разрядный АЦП m-DAQ-14, с помощью которого входные аналоговые сигналы преобразуются в дискретный код и передаются на блок обработки. Главная задача вибрационного канала заключается в определении и контроле вибрационных характеристик объекта.

Таблица 1

Технические характеристики датчика вибрации MS 8002.D

Параметры	Значение
Диапазон измерений	±2g
Чувствительность	1000 мВ/г
Напряжение питания	2,5...5,5В
Ток	400 мкА
Диапазон рабочих температур	-55...+125 °С
Масса	1,64г
Количество осей чувствительности	1
Резонансная частота	1,4 кГц

Предварительно была проведена калибровка акселерометров методом тестовых поворотов с точностью до 4'.

Для оценки влияния шумов АЦП на результаты измерений была проведена запись сигналов без подключения блока акселерометров. Запись сигналов осуществлялась при помощи виртуального прибора, созданного в программной среде LabVIEW (рис. 4). Для более эффективного и интуитивно понятного управления созданным программным обеспечением, интерфейс лицевой панели разработан в виде мультивкладочной структуры. Модуль системы опроса датчиков может получать информацию от 2 акселерометров, 4 тензорезистивных датчиков и инклинометра, поэтому на главной лицевой панели созданы соответствующие вкладки «Акселерометры», «Тензодатчики» и «Инклинометр», а также сервисная вкладка «Настройки каналов опроса» для конфигурации линий опроса. При необходимости функционал прибора можно расширить.

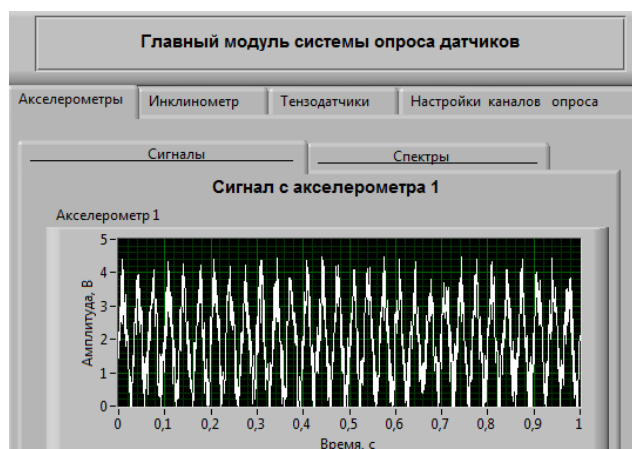


Рис. 4. Виртуальный прибор — главный модуль системы опроса датчиков

Программа обработки полученных в ходе исследований сигналов реализована в математическом пакете MATLAB и выполняет следующие функции:

- загрузка сохраненных на персональный компьютер сигналов;
- формирование вектора данных по каждому отдельному каналу;
- коррекция значений вектора данных с учетом разрядности АЦП и его входного диапазона в соответствии с особенностями записи сигналов в файл;
- проведение спектрального анализа с применением метода Уэлча и спектрограммы;
- вывод полученных графиков.

Временная реализация шумов АЦП и результат их спектральной обработки представлены на рис. 5. Спектральный анализ показал, что максимальный уровень шума достигает -84 дБ на частоте 6 Гц, а средний уровень шумов АЦП составляет -98 дБ.

На основании анализа сигналов шума АЦП в программу обработки вибрационных сигналов был внесен дополнительный модуль предварительной обработки, выполняющий вычисление среднего значения измерительного шума по первым 512 точкам сигнала до возбуждения колебаний в объекте с последующим его вычитанием из полезного сигнала для исключения из

спектров составляющей на нулевой частоте. Это необходимо для учёта отклонения блока акселерометров от вертикальной и горизонтальной плоскостей при его закреплении на объекте контроля.

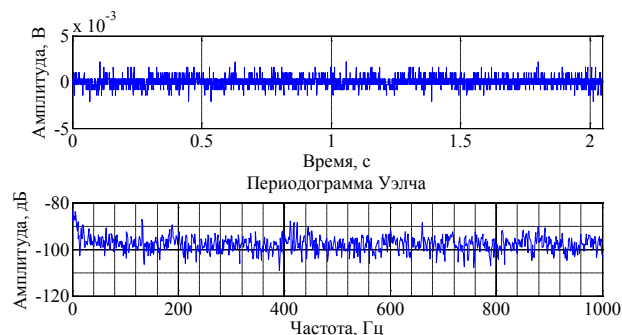


Рис. 5. Шумы АЦП во временной и частотной области

4. 3. Методика исследования канала измерения вибрации

Существует два основных способа возбуждения колебаний конструкции: импульсный с последующим модальным анализом и вынужденные колебания для проведения гармонического анализа. Под модальным анализом понимается задача определения частот и форм собственных колебаний конструкции, а под гармоническим анализом — задача определения вынужденных колебаний конструкции под действием постоянной колебательной силы, например гармонической или стационарной случайной. Для оценки параметров вибрации объектов в эксплуатации на практике часто используется наиболее простой импульсный метод возбуждения колебаний, причем определяются, в основном, собственные частоты и коэффициенты затухания свободных колебаний на этих частотах, а форме колебаний уделяется значительно меньше внимания [15]. При этом также необходимо учитывать возможные изменения собственной частоты вследствие наличия дефектов или повреждений конструкции.

Если моды колебаний (со слабым затуханием) объекта четко разделены друг от друга (слабо связаны), то такая конструкция ведет себя как система с одной степенью свободы вблизи моды и называется «простой» [16]. Модальный анализ простых конструкций применяется для поиска их дефектов и повреждений, когда на амплитудно-частотных характеристиках присутствуют мало демпфированные, хорошо выделяющиеся пики. На амплитудно-частотных характеристиках объекта с сильным затуханием колебаний или высокой модальной плотностью нет четко разделенных мод. Реакция такой конструкции на внешние возмущения представляет собой комбинацию многих мод. В этом случае используется термин «сильно связанные моды», а для конструкции — «сложная» конструкция.

Поскольку физическая модель объекта контроля представляет собой металлическую конструкцию большой жесткости, для корректной идентификации высокочастотных составляющих выбрана частота дискретизации равная 2 кГц. Для оптимизации алгоритмов спектрального анализа длина каждой выборки составляла 8192 точек. Измерения вибрации проводились на двух поясах резервуара со снятой крышкой.

В рамках каждого пояса было выбрано 4 точки, смещенные относительно вертикальной плоскости на 900 одна относительно другой, для закрепления блока акселерометров.

В колебательной системе может существовать одновременно несколько форм (направлений) свободных колебаний, при исследовании которых следует уделять особое внимание направлениям их предварительного возбуждения. Эффективность анализа собственных колебаний при импульсном возбуждении существенно зависит от особенностей ударного возбуждения, т. е. от формы и точки действия ударного импульса. Лучшим местом и направлением удара [15] при анализе собственных колебаний является точка в зоне пучности колебаний и направление, в котором эти колебания будут иметь максимум. Поэтому свободные колебания вызывались путем импульсного воздействия ударным устройством в точках непосредственно под местами установки датчиков и в точках, смещенных на 900 против часовой стрелки в пределах одного и того же пояса. Точки закрепления блока акселерометров и импульсных воздействий отмечены на рис. 2 соответственно «О» и «Х».

5. Результаты исследования канала измерения вибрации

На рис. 6 изображен спектр сигнала вибрации, полученного при импульсном возбуждении колебаний вдоль оси чувствительности акселерометра, находящейся в горизонтальной плоскости (первый канал).

Ось чувствительности второго акселерометра (второй канал) расположена в ортогональной плоскости и направлена вертикально вверх. Анализ периодограммы Уэлча показал, что:

а) для колебаний в горизонтальной плоскости (первый канал):

- доминирующими являются две составляющие на частотах 324 Гц и 371 Гц и уровнями –33 дБ и –34 дБ, соответственно;

- средний уровень периодограммы составляет –60 дБ;

б) для колебаний в вертикальной плоскости (второй канал):

- характерны сильно связанные моды, т. е. в пределах 10 дБ (отличие уровня колебательных процессов в 3,16 раз) находится порядка 10 частотных составляющих (в том числе и на частотах 324 Гц и 371 Гц);

- максимальный уровень периодограммы составляет –45 дБ на частоте 968 Гц, а средний уровень – –70 дБ.

Второе импульсное воздействие производилось в рамках того же пояса со смещением на 90° против часовой стрелки при неизменном положении блока акселерометров. Результаты обработки соответствующего сигнала приведены на рис. 7, из которого следует, что:

а) для колебаний в горизонтальной плоскости:

- доминирующей является составляющая на частоте 325 Гц с уровнем –31 дБ;

- средний уровень периодограммы составляет –60 дБ;

б) для колебаний в вертикальной плоскости:

- также характерны сильно связанные моды, но в пределах 10 дБ находится значительно меньше частотных составляющих в сравнении с предыдущим случаем;

- максимальный уровень периодограммы составляет –43 дБ на частоте 970 Гц, а средний уровень составляет –70 дБ.

Как видно, во втором случае в спектре не присутствует ряд частотных составляющих. Это означает, что направление ударного импульса в данной точке не совпадает с направлением колебаний объекта контроля по нескольким формам на определенных частотах. Также можно сделать вывод об отсутствии влияния шумов АЦП на сигналы вибрации в связи с отличием их уровней более чем на 20 дБ.

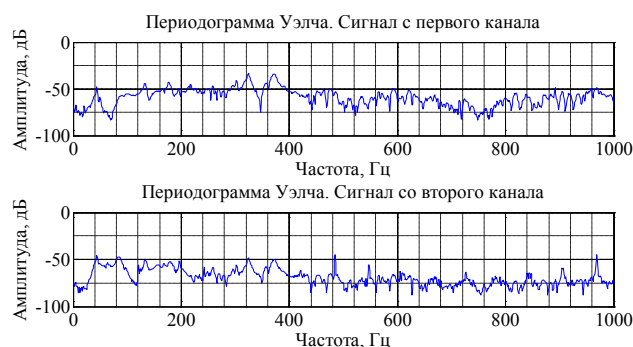


Рис. 6. Периодограмма Уэлча вибрационного отклика при ударе вдоль оси чувствительности акселерометра

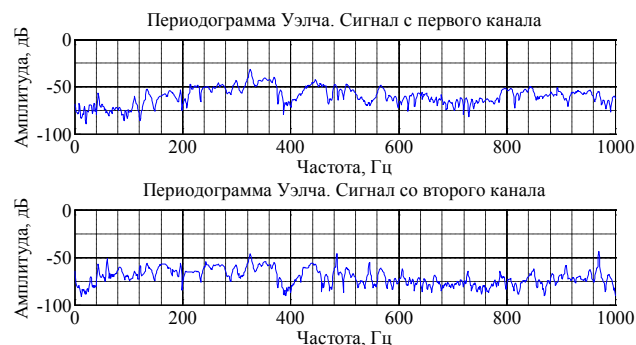


Рис. 7. Периодограмма Уэлча вибрационного отклика при ударе в направлении, ортогональном осям чувствительности обоих акселерометров

Для сравнения проведен модальный анализ модели объекта контроля с использованием программного комплекса конечно-элементного моделирования ANSYS. Как известно, основная идея всех численных методов, в том числе и метода конечных элементов [17, 18], состоит в дискретизации или аппроксимации (замене, приближении) исходной задачи другой, более удобной для решения на персональном компьютере, причем решение аппроксимирующей задачи зависит от некоторых параметров, управляя которыми, можно определить решение с необходимой точностью. Конечно-элементная модель резервуара состояла из 480 тысяч элементов. Результаты модального анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты модального анализа в программном комплексе ANSYS

Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц
1	303,81	6	414,43	11	745,63	16	909,03
2	303,81	7	559,43	12	745,64	17	931,02
3	407,62	8	559,44	13	780,91	18	931,04
4	407,62	9	742,77	14	780,93	19	965,38
5	414,4	10	742,83	15	908,99	20	965,42

Сравнительный анализ полученных результатов конечно-элементного моделирования и обработки сигналов вибрации показывает, что объект контроля совершает в горизонтальной плоскости колебания по первым двум модам, а в вертикальной – по девятнадцатой и двадцатой независимо от выбранного направления импульсного воздействия. Также на спектре присутствуют другие частоты, которые с некоторой степенью достоверности могут соответствовать колебаниям по 3–8 формам. Наличие в спектре других частот объясняется наличием неучтенных в конечно-элементной модели элементов конструкции. Значения абсолютной и относительной погрешностей определения частот собственных колебаний по первой форме экспериментальным путем и численными методами находятся в допустимых пределах и составляют соответственно 20,4 Гц и 6,3 %.

6. Обсуждение результатов исследования макета канала измерения вибрации комплексной системы диагностики

Несмотря на некоторый прогресс, достигнутый в последние годы в сфере строительства вертикальных стальных резервуаров, оценка технического состояния является очень важной составляющей их безотказной работы. Это связано с тем, что возникновение дефектов и повреждений возможно на протяжении всего жизненного цикла резервуаров: на этапах изготовления, транспортировки, монтажа, испытаний и эксплуатации. Своевременное выявление и прогнозирование причин изменения технического состояния позволит принимать оперативные решения для предотвращения развития негативных факторов, приводящих к уменьшению остаточного ресурса или разрушению объектов в целом.

Проведенные исследования являются одним из шагов, необходимых для создания комплексной интеллектуальной системы мониторинга на основе концепции Structural Health Monitoring для оценки функционального технического состояния конструктивных элементов, предупреждения разрушения и предотвращения катастрофических последствий. Неоспоримым достоинством рассмотренного макета канала измерения вибрации, как составной части КИСМ, является высокая точность полученных результатов. Из недостатков исследования можно отметить отсутствие изменения текущего состояния резервуара для оценки изменения диагностических параметров. В связи с этим в дальнейшем планируется улучшение методики проведения виброизмерений для учета изменений частотного состава полученных сигналов при изменении уровня наполнения резервуара, а также исследование и улучшение макета канала измерения напряжений и визуализации диагностической информации.

7. Выводы

Проведенные исследования макета канала измерения вибрации по методу собственных колебаний показали, что спектр вибрационного отклика резервуара существенно зависит от направления приложения ударного возбуждения и направления оси чувствительности акселерометра.

Для учёта отклонения блока акселерометров от вертикальной и горизонтальной плоскостей при его закреплении на объекте контроля предложена предварительная обработка вибрационных сигналов, состоящая в исключении из полученных выборок постоянной составляющей измерительных шумов, рассчитанной по первым 512 точкам.

Сравнительный анализ полученных результатов конечно-элементного моделирования и обработки сигналов вибрации показал, что объект контроля совершает в горизонтальной плоскости колебания по первым двум модам, а в вертикальной – по девятнадцатой и двадцатой независимо от выбранного направления импульсного воздействия.

Рассчитанные значения абсолютной (20,4 Гц) и относительной (6,3 %) погрешностей определения частот собственных колебаний по первой форме экспериментальным путем и численными методами свидетельствуют о том, что эффективность макета канала измерения вибрации находится в пределах 93–94 %.

Литература

1. Бурау, Н. И. Структурно-функциональный синтез систем диагностики конструкций в эксплуатации [Текст] / Н. И. Бурау, О. М. Павловский, Д. В. Шевчук // Вісник ТНТУ. – 2013. – Т. 72, № 4. – С. 77–86.
2. Chang, F. From Diagnostics & Prognostics to Structural Health Menegment [Text] / F. Chang // Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University. – Stanford, 2003.
3. Speckmann, H. Structural Health Monitoring: a contribution to the intelligent aircraft structure [Electronic resource] / H. Speckmann, H. Roesner // ECNDT. – 2006. – Available at: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.1.pdf>
4. Adams, D. Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications [Text] / D. Adams. – John Wiley & Sons Ltd., 2007. – 476 p.

5. Пат. № 73310 Україна, МПК G01 M 7/00. Інформаційно-діагностичний комплекс моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних споруд [Текст] / Бурау Н. І., Кузько О. В., Жуковський Ю. Г., Цибульник С. О., Шевчук Д. В. – Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – заявка № у 2011 15682, опубліковано 25.09.2012, Бюл. № 18. – 7 с.
6. Бурау, Н. І. Вимоги до розробки інформаційно-діагностичного комплексу моніторингу резервуарів з паливом в умовах Антарктики [Текст] / Н. І. Бурау, Ю. Г. Жуковський, О. В. Кузько, С. О. Цибульник, Д. В. Шевчук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2013. – № 45. – С. 107–116.
7. Xiaolin, M. Real-time vibration monitoring system of the bridge deflection [Text] / M. Xiaolin, G. W. Roberts, E. Cosser, A. H. Dodson // Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini. Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy. – IESSG, The University of Nottingham, NG7 2RD, UK, 2003.
8. Rizos, C. A dynamic GPS system for on-line structural monitoring [Text] / C. Rizos, J. Wang. – Satellite Navigation and Positioning Group School of Geomatic Engineering. University of New South Wales Sydney NSW 2052 Australia, 2003.
9. Мишкин, Г. Б. Краткий обзор систем обнаружения утечек российских производителей [Текст] / Г. Б. Мишкин // Молодой ученый. – 2011. – Т. 1, № 2. – С. 41–47.
10. Баскаков, С. А. Беспроводная система мониторинга состояния строительных конструкций [Текст] / С. А. Баскаков // Беспроводные технологии. – 2010. – № 3. – С. 52–54.
11. Севбо, В. Многоканальная распределенная система синхронного сбора данных «жесткого» реального времени, построенная на основе Ethernet технологий [Текст] / В. Севбо, А. Орлов, А. Лошаков // Судовое оборудование. – 2007. – № 3. – С. 40–45.
12. Пат. №87792 Российская Федерация, МПК G01B7/16, G01B7/00. Система мониторинга безопасной эксплуатации зданий и инженерно-строительных сооружений [Текст] / Рубин К. С. – Заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Инновационно-производственное предприятие "Практика". – № 2008141363/22; заявл. 22.01.2009; опубл. 20.10.2009. – 7 с.
13. Живаев, А. А. Системы мониторинга строительных конструкций зданий и сооружений [Текст] / А. А. Живаев, Г. Г. Болдырев, Д. Н. Валеев, П. В. Нестеров // Жилищное строительство. – 2010. – № 10. – С. 38–44.
14. Пат. № 2381470 Российская Федерация, МПК G01B7/00. Способ мониторинга и прогнозирования технического состояния зданий и сооружений и система мониторинга и прогнозирования технического состояния зданий и сооружений [Текст] / Шахрамьян А. М. – Заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное объединение "Современные диагностические системы". – № 2008106992/28; заявл. 26.02.2008; опубл. 10.02.2010. – 17 с.
15. Барков, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации [Текст]: учеб. пос. / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – СПб.: Изд. центр СПб ГМТУ, 2004. – 152 с.
16. Вахидов, У. Ш. Численные исследования колебаний узлов автомобилей [Электронный ресурс] / У. Ш. Вахидов, А. В. Согин, В. А. Шапкин, Ю. В. Шапкина. – Наземные транспортные системы, 2014. – Режим доступа: <http://www.nntu.ru/trudy/2014/03/145-153.pdf>
17. Самарский, А. А. Введение в численные методы [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 272 с.
18. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы [Текст] / Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. – 428 с.