

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ЧАСТОТНО-РЕЗОНАНСНОМ МОНИТОРИНГЕ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

Арташес Николаевич Саркисян^{1*}, Саргис Гегамович Степанян¹,
Александр Арташесович Саркисян²

¹ Национальный университет архитектуры и строительства Армении, г.Ереван, РА

²Национальный политехнический университет Армении, г.Ереван, РА

*ansargsyan@yahoo.com

Приведено краткое описание микроэлектромеханических систем (МЭМС) и возможности акселерометров, производимых на основе этих систем. На основе акселерометра MPU6050 был создан комплекс сенсоров и программного обеспечения, позволяющий производить измерения ускорений колебаний пролетного строения в режиме реального времени и анализировать эти измерения. На примере Давидашенского моста в г.Ереване показаны возможности разработанного комплекса.

Ключевые слова: акселерометры, пролетное строение, колебания, спектр частот, мониторинг

Введение

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) представляют собой устройства микросистемной техники, выполненные по технологии объёмной микромеханики, получаемые путем комбинирования механических элементов, датчиков и электроники на общем кремниевом основании посредством технологий микропроизводства.

Появление МЭМС позволило создать массу миниатюрных, надежных и недорогих устройств, которые стали востребованы практически во всех отраслях производства и на потребительском рынке. По мере совершенствования технологий производства, повышения качества и характеристик МЭМС изделия стали все более широко применяться в оборонной, авиационно-космической, энергетической и других высокотехнологичных отраслях.

Размеры МЭМС лежат в диапазоне от 1 мкм до нескольких мм, в зависимости от мощности, области применения, наличия встроенных схем обработки и количества элементов.

МЭМС - это множество микроустройств самой разнообразной конструкции и назначения, в производстве которых используются модифицированные технологические приемы микроэлектроники. Они формируются путём локального вытравливания подложки, легирования, нанесения на неё материала и т. д. Подложки, как правило, изготавливаются из кремния благодаря его превосходным электрическим, механическим и тепловым свойствам. Все используемые элементы могут быть реализованы в виде единого изделия, причем сразу десятками или сотнями, как микросхемы на кремниевой пластине. В основе этого лежит апробированная традиционная технология производства полупроводниковых интегральных микросхем.

Одной из первых МЭМС-технологий, получивших повсеместное распространение, стали датчики ускорения (акселерометры), устанавливаемые сейчас практически во всех современных автомобилях для детектирования столкновения и выпуска защитных воздушных подушек (SRS). Известная корпорация Analog Devices (<http://www.analog.com>), изготовившая первые такие сенсоры в

1993г., сейчас продает автомобилестроителям десятки миллионов так называемых iMEMS-акселерометров в год.

Благодаря своим миниатюрным размерам, МЭМС активно применяется в мобильных и карманных компьютерах, ноутбуках, а также в бытовых устройствах, которые все чаще своими системами управления и интерфейсами пользователя напоминают компьютеры. В настоящее время МЭМС акселерометры стали широко применяться также в машиностроении и медицине.

Одним из приоритетных направлений использования МЭМС акселерометров является мониторинг поведения строительных конструкций [1]. Системы мониторинга подразделяются на статические и динамические. В статических системах мониторинга выполняются измерения относительной и абсолютной (прогиб, перемещения) деформаций конструкций с использованием тензометрических или струнных датчиков деформации. В динамических системах мониторинга выполняются измерения ускорения колебаний конструкций с использованием двух или трех координатных акселерометров и определяются динамические характеристики: собственные частоты, формы деформации и декремент затухания.

Сооружения, как известно, колеблются и имеют свой собственный период колебания. Собственный период колебания любой конструкции или сооружения зависит от жесткости и массы. Определение жесткости конструкции методами строительной механики и подсчет массы не составляет труда. Таким образом, период собственных колебаний конструкции или сооружения может быть определены еще на стадии проектирования.

В дальнейшем сравнение теоретических данных или данных, полученных при приемосдаточных испытаниях, с результатами текущих измерений может стать основой оценки технического состояния сооружения.

Постановка задачи

Авторами была поставлена цель создать на базе МЭМС акселерометров малобюджетный измерительный комплекс для измерений ускорений. В этих целях были рассмотрены несколько акселерометров, которые широко используются в различных устройствах и имеют невысокую цену. Были рассмотрены акселерометры ADXL 335, ADXL 345, MPU 6050, MMS. В результате тестовых сборок будущих приборов в качестве основного был принят акселерометр MPU 6050 [2] (рис.1.).

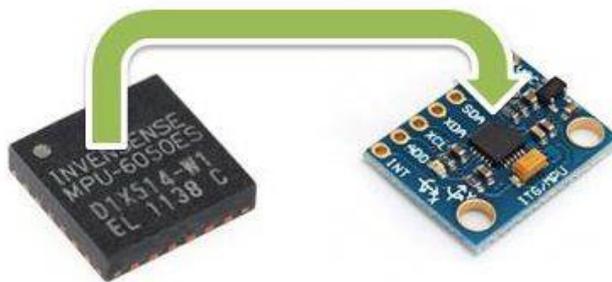


Рис. 1. Акселерометр MPU-6050

Акселерометр микросхемы MPU-6050 использует пьезоэлектрический эффект. Микросхема MPU-6050 содержит запатентованный компанией InvenSense процессор обработки сигналов, вызванных движением Digital Motion Processor (DMP), способный обрабатывать алгоритмы MotionFusion. DMP может быть использован для сложных расчетов. Собственный процессор может делать расчеты, не отвлекая микроконтроллер и даже способен обрабатывать информацию от другого

датчика, подключенного ко второй шине I2C. Специальная программа на языке команд DMP записывается в память каждый раз после подачи питания. Это занимает около секунды. Программа фильтрует показания акселерометра и гироскопа. Данные передаются в буфер FIFO. Для точного отслеживания движений предусмотрена возможность записи в память MPU-6050 актуальных пределов измерений. Данные можно считывать из регистров хранения или буфера FIFO размером 1024 байт. Микросхема MPU-6050 может работать в режиме мастер на шине I2C для контактов XDA и XCL. Содержит АЦП 16 бит.

Акселерометры MPU-6050 были подключены к плате Arduino UNO через I2C протокол. Всего, исходя из возможностей микроконтроллера, были подключены 4 акселерометра. В целях упрощения одновременного подсоединения акселерометров к плате Arduino UNO была разработана дополнительная плата – сервер. Связь между платами MPU-6050 и сервером обеспечена обычными сетевыми кабелями (рис.2).



Рис. 2. Разработанный на базе акселерометра MPU6050 комплекс для измерений ускорений колебаний

Для первичной обработки сигналов было разработано специальное программное обеспечение AcceloAI, которое состоит из двух блоков. Первый блок дает возможность просматривать ускорения по трем направлениям и соответственно получать спектры частот ускорений в режиме реального времени от всех четырех акселерометров (рис.3). Второй блок предусмотрен для камеральной обработки записей ускорений (AcceloAI).

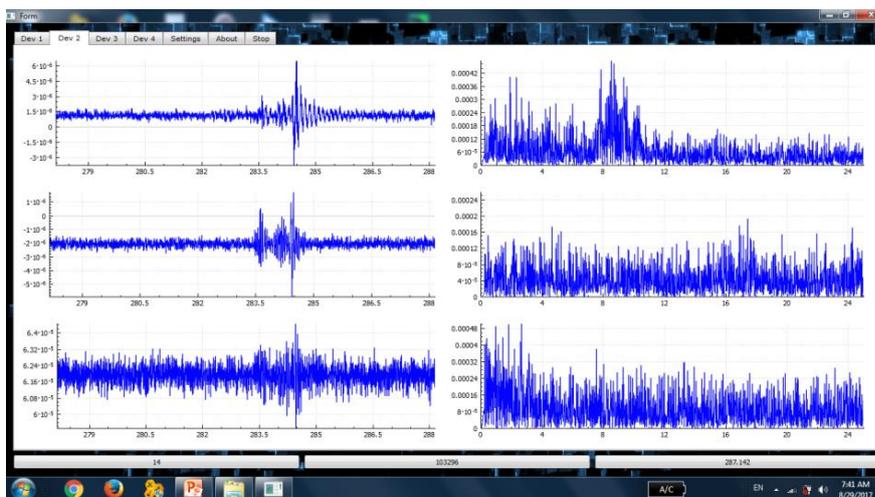


Рис. 3. Интерфейс программного комплекса для измерения ускорений на базе MPU 6050

Результаты

Созданный комплекс был протестирован на Давидашенском мосту (г.Ереван). Приборы были установлены в середине центрального пролета, на крайней левой главной балке. Одновременно с акселерометрами на базе MPU6050 также были установлены акселерометры типа BS (рис. 4), которые разработаны в Берлинском университете прикладных наук [3] и в рамках сотрудничества между указанным университетом и Национальным университетом архитектуры и строительства Армении тестировались также на разных мостах в Армении [4].

Полученные в ходе тестирования спектры были сравнены со спектром ускорений вертикальных колебаний (рис.5), полученным во время динамических испытаний Давидашенского моста во время сдачи моста в эксплуатацию в 2003 г. [5] и результатами численного моделирования [6]. В ходе испытаний значение полученной основной частоты было аналогичным.

Как было указано выше, для анализа записей была создана отдельная программа AcceloAI, которая позволяет получать спектры частот колебаний, вырезать интересующие участки записей для дальнейшего анализа (определение логарифмического декремента колебаний, динамического коэффициента и т.д.). Программа также позволяет конвертировать график спектра и отрезки записи колебаний в отдельные текстовые файлы (.txt) и файлы растрового изображения (.jpg).

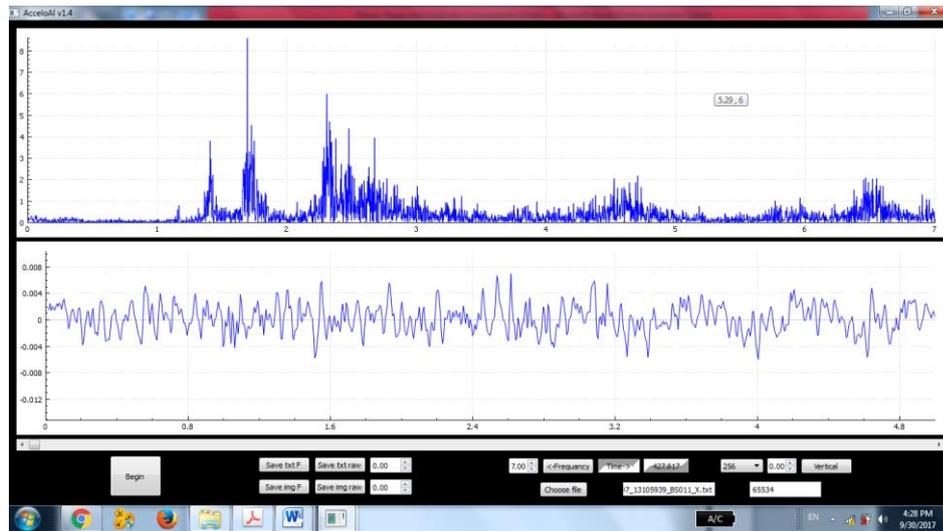
Ниже приведены спектры частот ускорений вертикальных и поперечных колебаний, полученных на основе записей колебаний, которые производились одновременно, а время запуска приборов синхронизировалось программным обеспечением. Записи проводились в дневное время, когда на мосту было обычное движение транспорта.



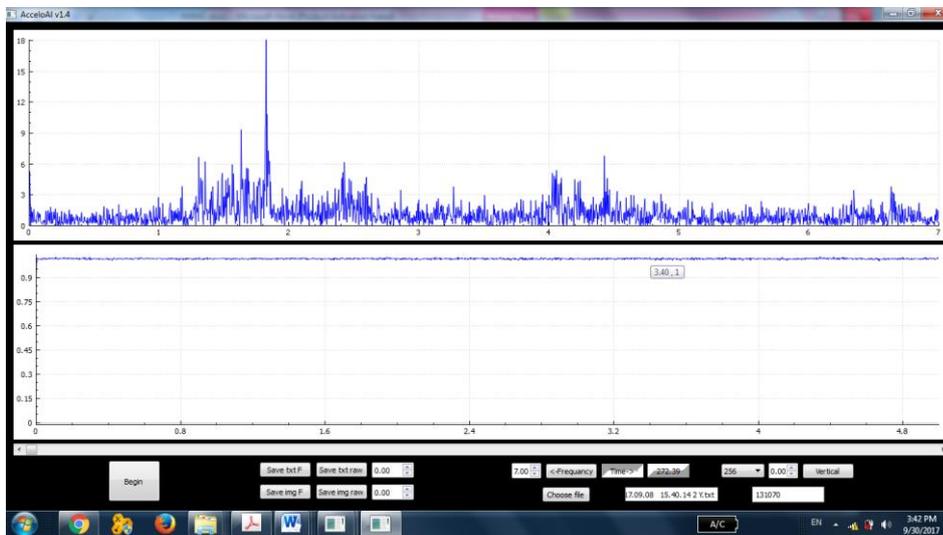
Рис. 4. Установленные на Давидашенском мосту акселерометры BS и MPU6050

Как видно из рис.5 и 6, имеется довольно хорошая корреляция между спектрами частот, полученными двумя разными приборами.

Полученные в ходе тестирования спектры были сравнены со спектром ускорений вертикальных колебаний (рис.7), полученным во время динамических испытаний Давидашенского моста во время сдачи моста в эксплуатацию в 2000 г. [5]. При этом измерения проводились в середине одного и того же пролета. Полученные данные были сравнены с результатами численного моделирования [6], согласно которым значение основной частотой вертикальных колебаний равно $1,6 \dots 1,8 \text{ Гц}$.

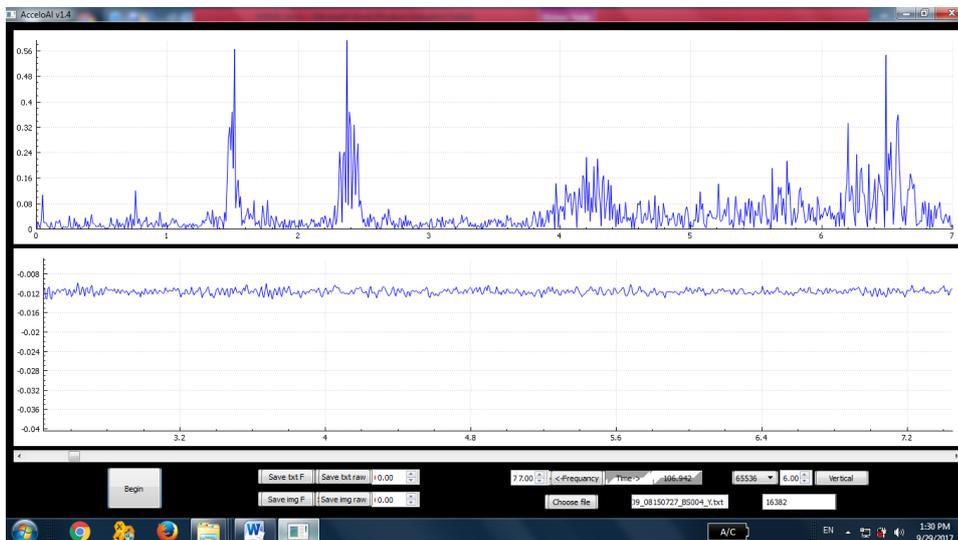


а

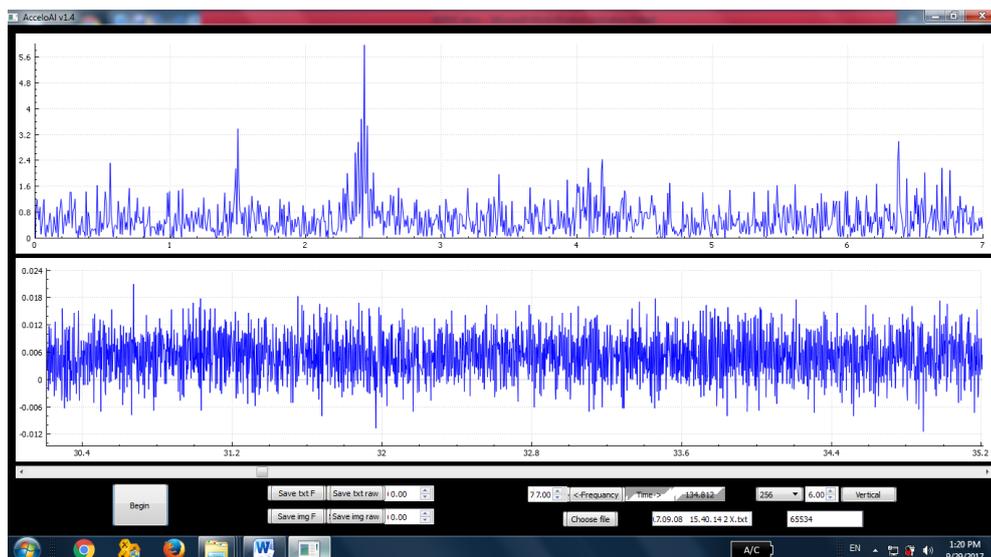


б

Рис. 5. Спектр частот вертикальных ускорений середины центрального пролета Давидашенского моста, вертикальная ось – величина вертикального ускорения выраженная в “g”, горизонтальная ось – частота вертикальных колебаний в Гц: а- спектр, полученный на основе записи прибором BS; б- спектр, полученный на основе записи прибором на основе MPU 6050



а



б

Рис. 6. Спектр частот поперечных ускорений середины центрального пролета Давидашенского моста, вертикальная ось – величина вертикального ускорения выраженная в “g”, горизонтальная ось – частота вертикальных колебаний в Гц; а- спектр, полученный на основе записи прибором BS; б – спектр, полученный на основе записи прибором на основе MPU 6050

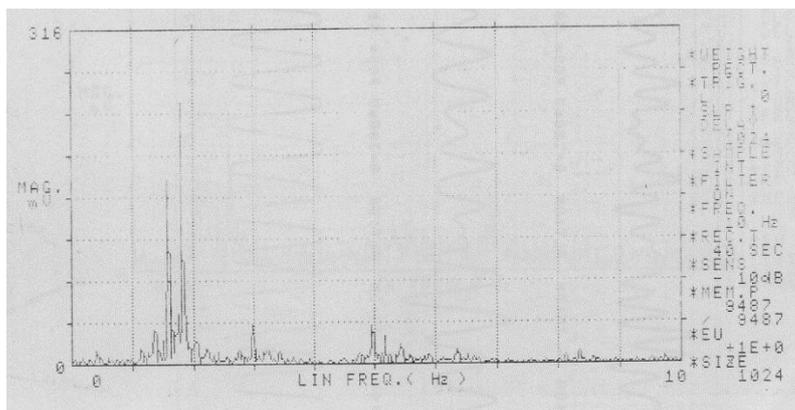


Рис. 7. Спектр частот вертикальных ускорений середины центрального пролета Давидашенского моста, полученный во время испытаний моста в 2001 г.

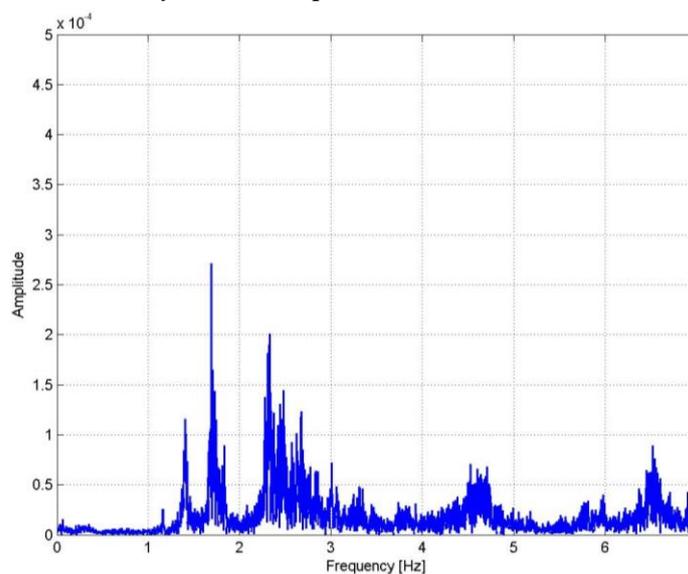


Рис. 8. Спектр частот вертикальных ускорений середины центрального пролета Давидашенского моста, полученный на основе записи произведенной в 2011г. прибором серии BS

На рис.8 приведен спектр частот вертикальных ускорений, запись которых произведена в 2011г. приборами типа BS в той же части пролетного строения [7]. Как видно из приведенных спектров, за последнее время существенных изменений в распределении частот вертикальных колебаний не наблюдается, что свидетельствует о стабильности частотно-резонансных характеристик пролетного строения в данном сечении. Последнее может также свидетельствовать о неизменности работы пролетного строения.

Выводы

Проведенные экспериментальные измерения ускорений, а также анализ их результатов показал, что акселерометры, применяемые в бытовой технике, могут использоваться и для мониторинга колебаний конструкций мостов. Разработанный комплекс приборов на основе акселерометра MPU6050 и программного обеспечения могут применяться для частотно-резонансного мониторинга пролетных строений и опор мостов. Развитие данного комплекса позволит оценивать состояние конструкций в режиме реального времени без дополнительных расходов и остановке движения, необходимых при динамических испытаниях мостов.

ՄԻԿՐՈԷԼԵԿՏՐՈՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ ԿԱՍՈՒՐՉՆԵՐԻ ԹՈՒՉՔԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԱՃԱԽԱՌԵԶՈՆԱՆՍԱՅԻՆ ՄՇՏԱԴԻՏԱՐԿՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

**Արտաշես Նիկոլայի Սարգսյան¹, Սարգիս Գեղամի Ստեփանյան¹,
Ալեքսանդր Արտաշեսի Սարգսյան²**

¹Ճարտարապետության և շինարարության Հայաստանի ազգային համալսարան, ք.Երևան, ՀՀ

²Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան, ք.Երևան, ՀՀ

**ansargsyan@yahoo.com*

Բերված է միկրոէլեկտրամեխանիկական համակարգերի (ՄԷՄՀ) և դրանց հիման վրա արտադրված արագացումաչափերի հնարավորությունների նկարագրությունը: MPU6050 արագացումաչափի հիման վրա մշակված է չափիչների ու ծրագրային ապահովման համալիր, որը թույլ է տալիս իրական ժամանակի ռեժիմում չափագրել տատանումների արագացումները և վերլուծել այդ չափագրումները: Մշակված համալիրի հնարավորությունները ցույց են տված ք.Երևանում գտնվող Դավիթաշեն կամրջի օրինակի վրա:

***Առանցքային բառեր.** արագացումաչափ, թռիչքային կառուցվածք, տատանումներ, հաճախականությունների սպեկտր, մշտադիտարկում*

APPLYING OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS FOR THE FREQUENCY- RESONANCE MONITORING OF THE BRIDGES SUPERSTRUCTURES

Artashes Sargsyan^{1*}, Sargis Stepanyan¹, Alexander Sargsyan²

¹ National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan, RA

²National Polytechnic University of Armenia

**ansargsyan@yahoo.com*

The description of the microelectromechanical systems (MEMS) and accelerometers, developed on the base of this system, are presented in the paper. On the base of MPU 6050 accelerometer authors developed

complex of sensors and software which allow record the vibration accelerations of bridges superstructures. The properties of the developed complex are illustrated on Davidashen Bridge in Yerevan.

Keywords: *accelerometers, bridge superstructure, vibration, frequency spectra, monitoring*

Литература

1. **Resnik B., Gerstenberg J.** Qualitätssicherung bei der Anwendung von preiswerten MEMS-Sensoren für geodätische Zwecke – Ansätze // Neumann (Hrsg) Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren. - Augsburg: Wißner-Verlag, 2013. –pp.171-186.
2. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4. - Available at: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>.
3. **Resnik B., Ribakov Y.** Implementation and analysis of vibration measurements obtained from monitoring the Magdeburg water bridge // The Seventh International Conference on Material Technologies and Modeling MMT-2012: Proceedings. - 2012. - pp.470-474.
4. **Resnik B., Sargsyan A.** Dynamic Monitoring of Bridges Spans // Resnik (Hrsg) Opportunities of Geodetic Monitoring on the Example of Current Projects in Eastern Europe. - Aachen: Shaker Verlag, 2013. - pp. 20-27.
5. Երևանում Հրազդան գետի վրա կառուցված Դավիթաշենի կամրջի հետազննումը և փորձարկումը: Պայմանագիր AC 63/T, հաշվետվություն. – Երևան, 2000:
6. **Սարգսյան Ա.Ն., Սարգսյան Գ.Գ., Սիրունյան Դ.Ե., Մարգարյան Ա.Ա.** Տատանումների հաճախականությունների չափագրման եղանակով կամուրջների թռիչքային կառուցվածքների մոնիտորինգ՝ Հայաստանի կամուրջների օրինակով // ԵՃՊՇՀ գիտական աշխատանքների ժողովածու. – 2013. – Հ. II (49). - էջ 177-185:
7. **Resnik B., Sargsyan A.** Analyse von Schwingungsmessungen im Rahmen eines Frühwarnsystems für Bauwerksmonitoring // Forschungsbericht. Beuth hochschule Für Technik Berlin. – 2011. - S.85-89.

References

1. Resnik, B., Gerstenberg, J. (2013), “Kwaliteitsiherong by der Anwedun von praisverten MEMS-Sensoren fur geodatish Zvek” [Quality assurance by the application of reasonable MEMS sensors for geodetic purposes]. *Anzats, In: Noyman (Hrsg) Kwaliteitsiherong geodetish Mess – und Ausvertevefaren. Wibnar-Verlag, Ougsbburg*, pp.171-186, (in German).
2. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4. Available at <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>.
3. Resnik, B., Ribakov, Y. (2012), Implementation and analysis of vibration measurements obtained from monitoring the Magdeburg water bridge. *The Seventh International Conference on Material Technologies and Modeling MMT-2012. Proceedings.* pp.470-474.
4. Resnik, B., Sargsyan, A. (2013), Dynamic Monitoring of Bridges Spans. In: Resnik (Hrsg) *Opportunities of Geodetic Monitoring on the Example of Current Projects in Eastern Europe.* Shaker Verlag, Aachen, pp. 20-27.

5. (2000), “Yerevanum Hrazdan geti vra karutsvats Davidasheni kamrji hetazotume ev portsarkume” [The investigation and testing of Davidashen Bridge over River Hrazdan in Yerevan]. *Contract AC 63/T, Report*, (in Armenian).
6. Sargsyan, A.N., Sargsyan, G.G., Sirunyan, D.E., Margaryan, A.A. (2013), “Tatanumneri hajakhakanwutyunneri chapagrman eghanakov kamurjneri trichkain karutsvatskneri monitoring, Ayastani kamurjneri orinakov” [The monitoring of bridges super-structures on the base of vibration frequency recording, an Armenian bridges exmples]. *ErJSHH gitakan ashkhatankneri johovatsu*, no 49, pp.177-185, (in Armenian).
7. Resnik, B., Sargsyan, A. (2011), “Analise von Shvinonsmessomen im Ramen iynes Fruvanzesystems fur Bauveksmonitoring” [Analysis of oscillation measurements within the framework of an early warning system for building monitoring]. *Forshunsberikht.Bauit hukchschule Fur Technik Berlin*, pp.85-89, (in German).

Աշխատանքն իրականացված է ՀՀ պետական բյուջեից գիտական և գիտատեխնիկական գործունեության բազային ֆինանսավորմամբ «ՀՀ ճարտարապետական և շինարարական համալիրների կայուն զարգացման ուղիների բացահայտում, ճշգրտում, ներդրման առաջարկությունների և հանձնարարականների մշակում՝ մշտական մոնիտորինգի կիրառմամբ» ծրագրի շրջանակում:

Մարգյան Արտաշես Նիկոլայի, տ.գ.թ., դոցենտ (ՀՀ, ք.Երևան) - ՃՇՀԱՀ, ակ. Ալ. Թամանյանի անվ. Քաղաքաշինության, ճարտարապետության և շինարարության պրոբլեմային լաբորատորիա, տ.գ.ա., (+374)91414238, ansargsyan@yahoo.com, Ստեփանյան Մարգիս Գեղամի (ՀՀ, ք.Երևան) - ՃՇՀԱՀ, ասպիրանտ (+374)43188121, sastep1991@mail.ru, Մարգյան Ալեքսանդր Արտաշեսի (ՀՀ, ք.Երևան) - Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան, ուսանող, (+374)077293005, aasarg@ymail.com.

Саргсян Арташес Николаевич, к.т.н., доц. (РА, г.Ереван)- НУАСА, Проблемная лаборатория Градостроительства, архитектуры и строительства им. акад. Ал. Таманяна, с.н.с (+374) 91414238, ansargsyan@yahoo.com, Степанян Саргис Гегамович (РА, г.Ереван)- НУАСА, аспирант (+374)43188121, sastep1991@mail.ru, Саркисян Александр Арташесович (РА, г.Ереван) - Национальный Политехнический Университет Армении, студент, (+374)077293005, aasarg@ymail.com
Sargsyan Artashes, doctor of philosophy (PhD) in Engineering, associate professor (Yerevan, RA) - NUACA, Problem Laboratory of Urban Development, Architecture and Construction after Academician Al. Tamanyan, senior researcher, (+374)91414238, ansargsyan@yahoo.com; Stepanyan Sargis, (Yerevan, RA) – NUACA, postgraduate student, (+374)43188121, sastep1991@mail.ru, Sargsyan Alexander, (Yerevan, RA) - National Polytechnic University of Armenia, student, (+374)77293005, aasarg@ymail.com

*Ներկայացվել է՝ 10.01.2018թ.
 Շնորհվել է տպագրության՝ 22.01.2018թ.*