

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ДЛЯ СНЯТИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

В работе производится сравнение микроэлектромеханических инерциальных измерительных модулей, которые могут быть использованы для записи двигательной активности человека. В сравнении участвовали датчики с девятью степенями свободы нижней ценовой категории. Оценивались такие параметры, как величина шума в состоянии покоя, среднее отклонение измеряемых данных от истинных значений, среднее значение дрейфа гироскопа под воздействием внешних факторов и без, встроенные возможности датчиков, удобство настройки. На основе данных сравнения выделяется инерциальный измерительный модуль, наиболее подходящий для создания системы записи двигательной активности человека.

Ключевые слова: среднее отклонение, микроэлектромеханические системы, гироскоп, акселерометр, магнетометр.

Введение. Для снятия двигательной активности человека в первую очередь необходимо определиться с диапазоном измеряемых параметров. Получение полной картины двигательной активности частей человеческого тела требует: определения положения частей тела в пространстве, положения частей тела относительно друг друга, определения изменения углов сгиба суставов, определения скорости изменения положения и изменения углов сгибов суставов, а также определения максимального диапазона вышеописанных параметров. Согласно статье [1], среднее ускорение при нанесении удара профессиональным боксером составляет около 21,5 g ($g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$), или 210,7 м/с^2 . Также в статье [2] и книге [3] говорится о том, что максимальное угловое ускорение при движении суставов спортсмена может достигать $\approx 300 \text{ рад/с}$. Также максимальная частота циклических колебаний частей тела среднестатистического человека [4] составляет около 10 Гц. Поэтому выбор оборудования для создания системы снятия двигательной активности человека должен основываться на вышеописанных значениях.

В настоящее время для двигательной активности человека (походка, жесты и т.д.) используют разрозненные узконаправленные системы, стационарные модули для исследования определенных параметров или дорогостоящие комплексы носимой электроники [5]. Узконаправленные системы способны отслеживать одновременно небольшое количество жизненных показателей и записывать полученную информацию на встроенные носители. Они доста-

точно точно оценивают состояние того или иного отдельно взятого параметра, но не дают полной картины процессов, происходящих с носителем. Эти системы используют акселерометры, проводные и беспроводные пульсометры, стационарные методы снятия биометрических параметров, такие как инфракрасное сканирование, и датчики движения в совокупности с камерами и датчиками давления на полу, которые дают высокую точность получаемых данных. Системы такого рода могут быть использованы только в специализированных центрах и нуждаются в квалифицированном персонале [6]. Комплексы носимой электроники в основном состоят из костюмов с наборами датчиков, которые используют проводную и беспроводную связь для сбора данных на носимый микроконтроллер [7]. И хотя эти системы дают широкий спектр измерений и возможностей применения, цена одного комплекта может достигать нескольких тысяч долларов. К тому же ремонт данной аппаратуры в случае поломки затруднителен из-за специфических проприетарных запчастей. Все эти системы удовлетворяют параметрам записи максимальных значений движений человека и способны к записи данных на частотах, достигающих 500 Гц.

Поскольку приоритетом выбора оборудования для реализации системы является мобильность и низкая цена, инерциальные измерительные модули представляют наибольший интерес. На сегодняшний день существует множество компаний предлагающих свои решения в виде датчиков для захвата движений: ASC GmbH, Colibrys SA, DTS – Diversified

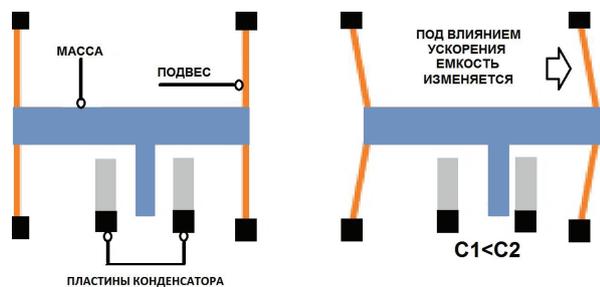


Рис. 1. Принцип работы MEMS акселерометра

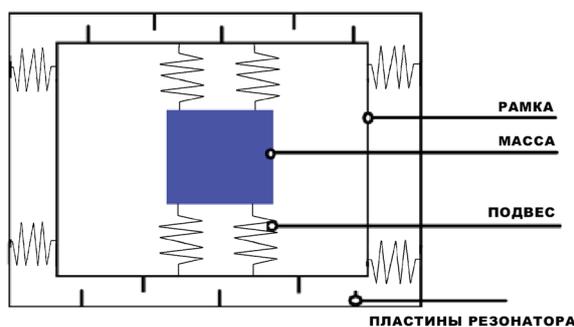


Рис. 2. Схематическое изображение вибрационного гироскопа

Technical Systems, Epson Europe Electronics GmbH, Honeywell Sensing and Internet of Things, InnaLabs Ltd, LORD MicroStrain Sensing Systems, MEMSIC, Inc., Sensor AS, Xsens Technologies B. V. Однако, несмотря на распространенность технологии и множество производителей, в литературе существует крайне мало сравнительных анализов инерциальных измерительных модулей, подходящих для сбора данных двигательной активности человека.

Целью статьи является сравнение существующих инерциальных измерительных модулей для сбора двигательной активности человека, выбор наиболее подходящей модели для создания системы сбора двигательной активности всего тела.

Инерциальные измерительные модули. Инерциальные измерительные модули в основном используются в устройствах для измерения ускорения, ориентации и силы тяжести. Существуют три основных способа измерения положения тела и углового ускорения: лазерный гироскоп, оптоволоконные гироскопы, микроэлектромеханические акселерометры и гироскопы. Лазерные и оптоволоконные гироскопы не будут рассматриваться в данной статье из-за высокой стоимости и крупногабаритности. Поэтому в статье рассматриваются только микроэлектромеханические инерциальные измерительные модули. Микроэлектромеханические инерциальные измерительные модули обычно состоят из нескольких датчиков, включающих в себя акселерометр, гироскоп, магнетометр, барометр, а также другие, менее распространенные типы датчиков [8].

Микроэлектромеханические акселерометры представляют собой тело фиксированной массы, закреплённое в упругом подвесе, а также конденсаторных обкладок. При наличии ускорения масса движется относительно изначального положения и изменяет емкость конденсатора, величина изменения емкости несет информацию о величине этого ускорения, измеряемого в m/c^2 или g [9, 10]. Схе-

матическое изображение подобного гироскопа представлено на рис. 1.

Микроэлектромеханические гироскопы измеряют угловую скорость с помощью эффекта Кориолиса. Они используют вибрирующую массу, закрепленную на упругих подвесах. Основной физический принцип состоит в том, что вибрирующий объект имеет тенденцию продолжать вибрировать в той же плоскости, даже если его опора вращается. Эффект Кориолиса заставляет объект оказывать силу на его опору, и путем измерения этой силы можно определить скорость вращения. Скорость вращения измеряется в рад/с. Чтобы измерить силу, рама, содержащая резонирующую массу, соединена с подложкой пружинами под углом 90° относительно резонирующей пластины. Резонирующие элементы обычно используют пьезоэлектрические материалы [11]. Схематическое изображение вибрационного гироскопа представлено на рис. 2.

Гироскопы с вибрирующей структурой проще и дешевле, чем обычные вращающиеся гироскопы с аналогичной точностью. Недорогие гироскопы с вибрирующей структурой, изготовленные по технологии MEMS, широко используются в смартфонах, игровых устройствах, камерах и многих других приложениях [12].

Оба датчика обычно имеют три степени свободы для измерения трех пространственных осей. Впоследствии к акселерометрам и гироскопам добавился магнитометр. Магнитометр представляет собой устройство для измерения интенсивности (индукции) магнитного поля, измеряемого в мкТ. Принцип работы магнитометра основан на эффекте Холла. В микроэлектромеханических магнитометрах применяются пермаллоевые пленки, которые изменяют свое сопротивление в зависимости от ориентации протекающего через нее тока и направления вектора намагниченности. Для построения датчика соединяются четыре одинаковые пермаллоевые пленки по мостовой схеме и образуют плечи моста.

Сравнение инерциальных измерительных модулей. В этом разделе будет проводиться сравнение существующих инерциальных измерительных модулей для сбора двигательной активности человека, выбор наиболее подходящей модели для создания системы сбора двигательной активности всего тела. Будут оцениваться такие параметры, как цена, точность, энергопотребление, способы подключения и взаимодействия с устройствами.

В коммерческом секторе существует множество реализаций инерциальных измерительных модулей. Условно можно разделить на следующие категории:

- сенсоры с 6-ю степенями свободы;
- сенсоры с 9-ю степенями свободы;
- сенсоры с 10-ю и более степенями свободы.

Сенсоры с 6-ю степенями свободы, стандартные, являются наиболее простыми среди микроэлектромеханических датчиков движения. Они не отличаются высокой точностью и защитой внешних помех. Поскольку эта категория сенсоров склонна к накоплению ошибки в выходных данных со временем, связанным с вращением Земли и вибрационными помехами, она не рассматривается в данном сравнении [13–15]. Сенсоры с 10 и более степенями свободы предоставляют наиболее точные данные о положении тела в пространстве, но в большинстве случаев имеют достаточно большое энергопотребление и габариты, которые будут мешать выполнению повседневной активности, также цена этих датчиков значительно выше остальных кате-

Таблица 1

Инерциальные измерительные модули с 9-ю степенями свободы

Название	Диапазон измеряемых значений ускорения, <i>g</i>	Диапазон измеряемых значений угловой скорости, рад/с	Диапазон измеряемых значений магнетометра, мкТ	Потребляемая мощность, Вт	Габариты, мм	Масса, gram	Стоимость, \$
Adafruit 9-DOF Absolute Orientation IMU Fusion Breakout - BNO055	16	± 34,90659	± 2500	0,1 Вт	30×20×8	15	32,13
KOOBOOK 9 Axis IMU L3GD20 LSM303D Module 9DOF IMU Breakout board	16	± 34,90659	± 800	0,13 Вт	43×35×7	27	8,49
SparkFun IMU Breakout - MPU-9250 9 degrees of freedom MEMS sensor	16	± 34,90659	± 4800	0,085 Вт	20×20×6	8,5	14,95
CHENBO SPI/IIC GY-9250 MPU9250/6500 9 DOF Sensor Module for Arduino	16	± 34,90659	± 4800	0,105 Вт	15×25×4	16	9,50
Seedstudio - Grove - IMU 9DOF v2.0	16	± 34,90659	± 4800	0,1 Вт	40×20×5	10	12,90
9 Axis IMU L3GD20 LSM303D Module 9DOF Sensor Module for Arduino	16	± 34,90659	± 1600	0,18 Вт	10×20×2	26	22,36
Yoochin MPU-9250 GY-9250 9-axis Sensor Module	16	± 34,90659	± 4800	0,12 Вт	15×25×4	18	16,34
Moligh doll GY-85 9DOF 9axis IMU Sensor Module ITC3200/ITG320?5 ADXL345 HMC5883L	16	± 34,90659	± 4800	0,13 Вт	22×17×5	35	14,73

горий. Поскольку целью работы является создание мобильной и дешевой по сравнению с существующими аналогами системы, эта категория датчиков не удовлетворяет предъявляемым критериям в полной мере. Эта категория датчиков подходит в наибольшей степени для создания системы, поскольку обладает достаточно низкой стоимостью, небольшими габаритами и повышенной (в сравнении с более ранними версиями датчиков) точностью и низким энергопотреблением.

В коммерческом секторе существует множество инерциальных измерительных модулей с 9-ю степенями свободы.

Большая часть модулей, представленных на рынке и подходящих для снятия двигательной активности человека, использует следующие версии чипов для определения ускорения, наклона и направления магнитного поля: L3GD20, LSM303D, LSM303, MPU9250/6500, BMG250, ADXL32(XXX), KX023(XXX), IIS2DHTR, H3LIS200DLTR, SCA3100-XXX, и подобные [16]. В табл. 1 представлены инерционные измерительные модули с 9-ю степенями свободы, использующие перечисленные выше чипы. Выбор нижеописанных модулей обусловлен доступностью исходного кода для их настройки, использованием различных чипов, диапазоном цен, а так-

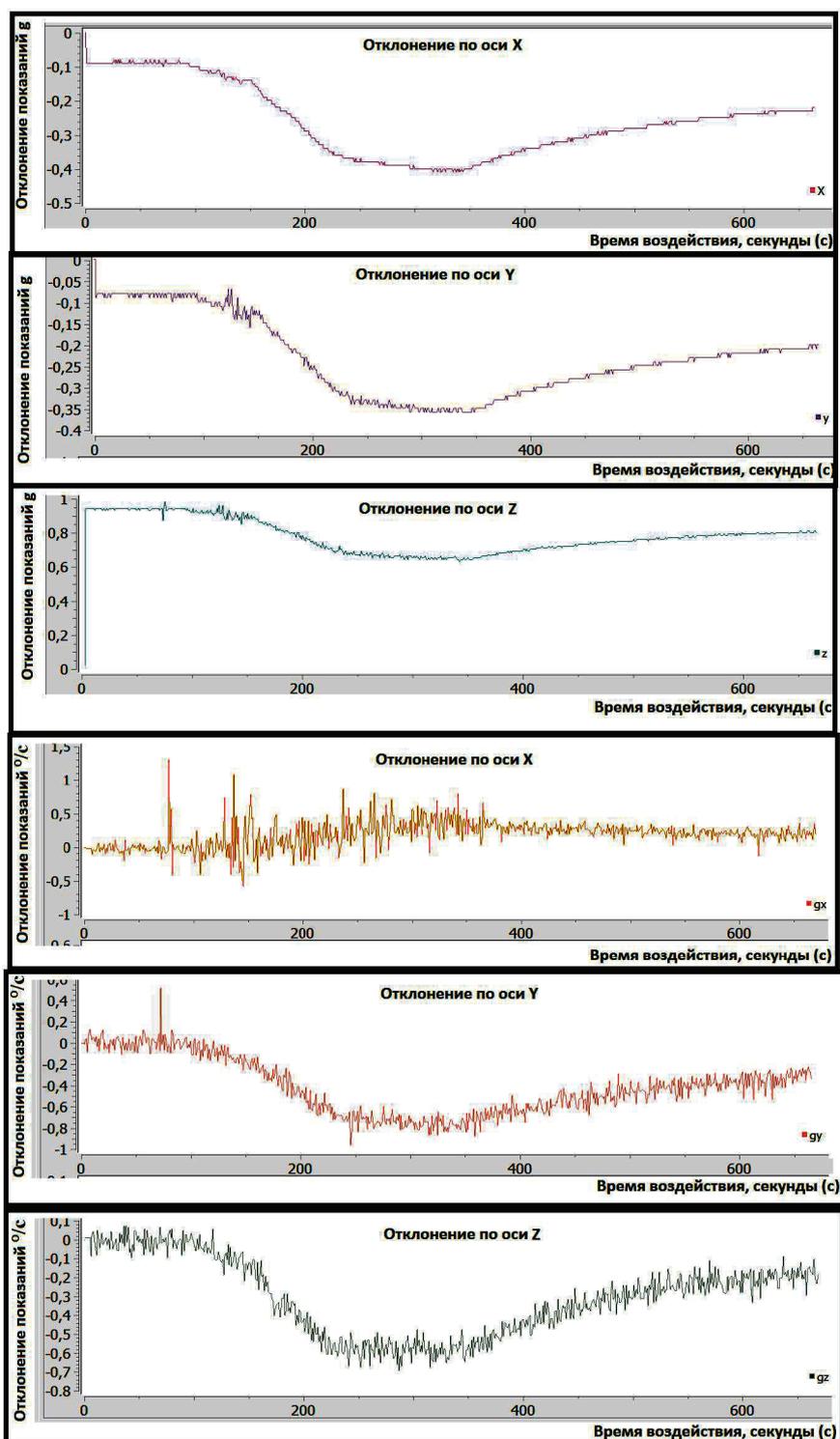


Рис. 3. Изменение нормированных показаний акселерометра и гироскопа при изменении температуры датчика от 23 °С до 60 °С

же производительность модулей, удовлетворяющей предъявляемые к системе параметры.

Все представленные датчики используют стандартный протокол связи IIC/SPI для передачи данных на периферийные устройства. И хотя эти сенсоры выглядят достаточно схоже, различные производители, различные архитектуры акселерометров и гироскопов означают, что на практике разные сенсоры предоставляют разное качество данных.

В ходе сравнения были проведены тесты, направленные на выявление стандартного отклонения датчиков в состоянии покоя, смещении данных при изменении температурного режима, смещение данных при вибрационном воздействии, сравнение чувствительности магнетометров и их устойчивости к воздействию сильных магнитных полей.

Стандартное отклонение акселерометра по осям определялось путем расположения датчика, на стационарной платформе выровненной относительно гравитационного вектора. Все оси акселерометра поочередно выравнивались по отношению к гравитационному вектору и оставались в состоянии покоя на пятиминутный интервал. Стоит отметить, что стандартное отклонение датчиков прежде всего обусловлено разницей между ожидаемыми теоретическими данными и данными, получаемыми от физического датчика, в литературе это отклонение также называется ошибкой измерения или погрешностью измерения. Выделение отклонений датчика от истинных значений в состоянии покоя

необходимо для выявления изменений этих отклонений при помещении датчика в экстремальные условия.

При оценке изменения отклонения после вибрационного воздействия датчики перезагружались и оставались в состоянии покоя на период, равный пяти минутам. По истечении времени датчики подвергались вибрационному воздействию с последующим замером показаний осей, не выровненных с гравитационным вектором. Частота вибрации во время тестирования изменялась случайным образом в диапазоне от 10 до 300 Гц. Частота снятия показаний составляла 20 Гц.

При тестировании датчиков путем изменения температурного режима датчики подвергались воздействию температуры в предполагаемых диапазонах использования системы снятия показаний двигательной активности, от -20 до 60 ° Цельсия [17–20]. Датчики находились в стационарном состоянии. Изменение температуры происходило последовательно, с увеличением или уменьшением на пять градусов за шаг.

Изначальная температура датчика составляла 23 ° Цельсия. Также рассматривалась ситуация резкого изменения температурного режима, при котором температура изменялась от комнатной (23 °C) до максимальной предполагаемой (60 °C). На рис. 3 продемонстрировано отклонение в показаниях датчика SparkFun IMU Breakout-MPU-9250 System in Package (SiP) при резком изменении температурных условий.

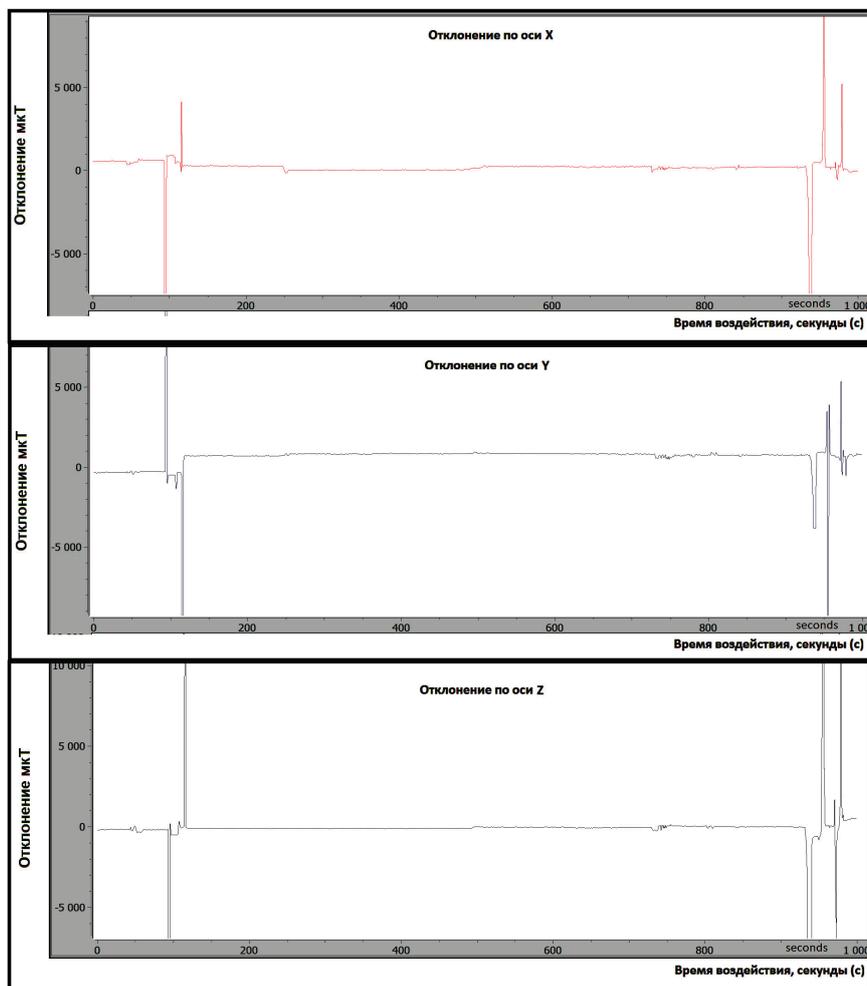


Рис. 4. Отклонение показаний магнетометра при воздействии на него магнитного поля

Таблица 2

Отклонения по осям датчиков

Название	Стандартное отклонение показаний акселерометра при вибрационном воздействии, g	Изменение среднего отклонения показаний акселерометра при вибрационном воздействии, g	Изменение среднего отклонения показаний гироскопа при вибрационном воздействии, Рад/с	Изменение среднего отклонения показаний гироскопа при тепловом воздействии, Рад/с	Изменение среднего отклонения показаний акселерометра при тепловом воздействии, g	Изменение среднего отклонения показаний магнетометра после воздействия магнитного поля, мкТ
Adafruit 9-DOF Absolute Orientation IMU Fusion Breakout - BNO055	X - 0,01 Y - 0,01 Z - 0,01	X - 0,013 Y - 0,017 Z - 0,011	X - 0,00041887902 Y - 0,00038397244 Z - 0,00040142573	X - 0,0226893 Y - 0,0366519 Z - 0,0296706	X - 1,57 Y - 1,84 Z - 1,45	X - 7,6 Y - 6,7 Z - 8,8
KOOWOOK 9 Axis IMU L3GD20 LSM303D Module 9DOF IMU Breakout board	X - 0,01 Y - 0,01 Z - 0,01	X - 0,026 Y - 0,035 Z - 0,028	-	-	X - 2,47 Y - 3,43 Z - 1,78	X - 15,3 Y - 18,7 Z - 14,4
SparkFun IMU Breakout - MPU-9250 9 degrees of freedom MEMS sensor	X - 0,02 Y - 0,02 Z - 0,02	X - 0,014 Y - 0,016 Z - 0,018	X - 0,00071558499 Y - 0,00061086524 Z - 0,00099483767	X - 0,0261799 Y - 0,020944 Z - 0,0191986	X - 4,16 Y - 3,87 Z - 7,65	X - 17,8 Y - 14,1 Z - 15,3
CHENBO SPI/IIC GY-9250 MPU9250/6500 9 DOF Sensor Module for Arduino	X - 0,01 Y - 0,02 Z - 0,01	X - 0,018 Y - 0,021 Z - 0,024	X - 0,00041887902 Y - 0,0004363231 Z - 0,0009250245	X - 0,0436332 Y - 0,0296706 Z - 0,0401426	X - 4,53 Y - 2,67 Z - 3,51	X - 25,4 Y - 21,8 Z - 31,4
Seeedstudio - Grove - IMU 9DOF v2.0	X - 0,01 Y - 0,01 Z - 0,01	X - 0,014 Y - 0,011 Z - 0,015	X - 0,00055850536 Y - 0,0005235988 Z - 0,00097738438	X - 0,0244346 Y - 0,0366519 Z - 0,0314159	X - 3,56 Y - 4,81 Z - 5,26	X - 6,4 Y - 5,8 Z - 7,6
9 Axis IMU L3GD20 LSM303D Module 9DOF Sensor Module for Arduino	X - 0,01 Y - 0,01 Z - 0,01	X - 0,011 Y - 0,016 Z - 0,012	X - 0,00054105207 Y - 0,00041887902 Z - 0,00036651914	X - 0,0401426 Y - 0,0436332 Z - 0,0191986	X - 1,73 Y - 1,94 Z - 1,31	X - 8,9 Y - 9,4 Z - 7,1
Yoochin MPU-9250 GY-9250 9-axis Sensor Module	X - 0,01 Y - 0,01 Z - 0,01	X - 0,014 Y - 0,012 Z - 0,015	X - 0,00062831853 Y - 0,0004712389 Z - 0,00050614548	X - 0,0575959 Y - 0,0418879 Z - 0,0296706	X - 4,75 Y - 3,88 Z - 2,14	X - 7,6 Y - 8,7 Z - 5,3
Moligh doll GY-85 9DOF 9axis IMU Sensor Module ITG3200/ITG320?5 ADXL345 HMC5883L	X - 0,02 Y - 0,02 Z - 0,02	X - 0,028 Y - 0,023 Z - 0,024	X - 0,00048869219 Y - 0,0004712389 Z - 0,00040142573	X - 0,0226893 Y - 0,0296706 Z - 0,0593412	X - 2,25 Y - 4,31 Z - 2,76	X - 11,7 Y - 14,8 Z - 15,3

Сравнение показаний магнетометра проводилось по средствам поднесения к сенсору неодимовых магнитов с магнитной индукцией 1,17 Т, как показано на рис. 4. Сенсор выравнивался относительно магнитного поля Земли для изоляции отдельных осей. Измерялось среднее отклонение показаний магнетометра по осям до воздействия магнитного поля неодимового магнита и после. Сравнение показаний датчиков и их отклонений от теоретических значений до внешнего воздействия и после проводилось с целью выявить наиболее стойкие и надежные по отношению к внешнему воздействию датчики среди представленных.

Средние значения отклонения по осям указаны в табл. 2.

Заключение. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что протестированные инерциальные измерительные модули имеют схожие характеристики. Все рассмотренные датчики демонстрируют хорошую устойчивость к вибрационному воздействию. Это выражается в отсутствии значительной разницы в стандартном отклонении датчика в состоянии покоя до воздействия и после. Наибольшее отклонение по осям датчиков наблюдается при тепловом воздействии. Среди представленных датчиков «Adafruit 9-DOF Absolute Orientation IMU Fusion Breakout-BNO055» в наибольшей степени подходит для реализации системы снятия двигательной активности человека.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-31-90150).

Библиографический список

- Walilko T. J., Viano D. C., Bir C. A. Biomechanics of the head for Olympic boxer punches to the face // *British Journal of Sports Medicine*. 2005. Vol. 39 (10). P. 710–719.
- Yeadon M., King M., Wilson C. Modelling the maximum voluntary joint torque/angular velocity relationship in human movement // *Journal of Biomechanics*. 2005. Vol. 39, Issue 3. P. 476–482. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2004.12.012.
- Enoka R. M. *Neuromechanics of Human Movement*. Human Kinetics. 3rd ed. 2001. 556 p. ISBN 9780736002516.
- Fujii S., Kudo K., Ohtsuki T. [et al.]. Tapping performance and underlying wrist muscle activity of non-drummers, drummers, and the world's fastest drummer // *Neuroscience Letters*. 2009. Vol. 459, Issue 2. P. 69–73. DOI: 10.1016/j.neulet.2009.04.055.
- Wearable Health Devices — Vital Sign Monitoring, Systems and Technologies, Duarte Dias, Joro Paulo Silva Cunha. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6111409> (дата обращения: 01.03.2020).
- Gait Analysis Systems. URL: <https://www.tekscan.com/gait-analysis-systems> (дата обращения: 01.03.2020).
- Xsens 3D motion tracking. URL: <https://www.xsens.com/research/published-papers-2/> (дата обращения: 01.03.2020).
- Iosa M., Picerno P., Paolucci S. [et al.]. Wearable inertial sensors for human movement analysis // *Expert Review of Medical Devices*. 2016. Vol. 13 (7). P. 641–659. DOI: 10.1080/17434440.2016.1198694.
- Mohn-Yasin F., Korman C. E., Nagel D. J. Measurement of noise characteristics of MEMS accelerometers // *Solid-State Electronics*. 2003. Vol. 47. P. 357–360.

10. Busch-Vishniac I. J. *Electromechanical Sensors and Actuators*. 1st ed. NY: Springer, 1999. 343 p. ISBN 978-0-387-98495-7.

11. Nasiri S. A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status. 2010. URL: <https://web.archive.org/web/20101206122853/http://invensense.com/mems/gyro/documents/whitepapers/MEMSGyroComp.pdf> (дата обращения: 01.03.2020).

12. Acar C., Shkel A. MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness. 2008. P. 8. ISBN 978-0-387-09536-3.

13. Guerriero L., Guerriero G., Grelle G. [et al.]. Brief Communication: A low-cost Arduino®-based wire extensometer for earth flow monitoring // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2017. Vol. 17. P. 881–885. DOI: 10.5194/nhess-17-881-2017.

14. Kourepenis A., Borenstein J., Connely J. [et al.]. Performance of mems inertial sensors // *Proc. of the IEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium*. 1998. P. 1–8. DOI: 10.1109/PLANS.1998.669861.

15. Chau K. H. L., Lewis S. R., Zhao Y. [et al.]. An integrated Force-balanced capacitive accelerometer for low-G applications // *Sensors and Actuators. A: Physical*. 1996. Vol. 54, Issue 1–3. P. 472–476. DOI: 10.1016/S0924-4247(97)80006-4.

16. Haeffer D. K. MEMS Inertial Sensors: A Tutorial Overview // *IEEE Communications Magazine*. 2013. Vol. 51, Issue 4. P. 100–109. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6495768.

17. Liu G., Yang F., Bao X., Jang T. Robust Optimization of a MEMS Accelerometer Considering Temperature Variations // *Sensors*. 2015. Vol. 15, Issue 3. P. 6342–6359. DOI: 10.3390/s150306342.

18. Dai G., Li M., He X. [et al.]. Thermal drift analysis using a multiphysics model of bulk silicon MEMS capacitive accelerometer // *Sensors and Actuators. A: Physical*. 2011. Vol. 172, Issue 2. P. 369–378. DOI: 10.1016/j.sna.2011.09.016.

19. Wang Q., Li Y., Niu X. Thermal Calibration of Low-cost Inertial Measurement Units // *The Journal of Navigation*. 2016. Vol. 69, Issue 2. P. 373–390. DOI: 10.1017/S0373463315000600.

20. Niu X., Li Y., Zhang H. [et al.]. Fast Thermal Calibration of Low-Grade Inertial Sensors and Inertial Measurement Units // *Sensors*. 2013. Vol. 13, Issue 9. P. 12192–12217. DOI: 10.3390/s130912192.

ФОФАНОВ Григорий Алексеевич, аспирант кафедры «Комплексная защита информации».

SPIN-код: 6117-3854

AuthorID (РИНЦ): 944407

ORCID: 0000-0002-3881-4072

AuthorID (SCOPUS): 57203587740

ResearcherID: I-4810-2017

Адрес для переписки: saret_01@mail.ru

Для цитирования

Фофанов Г. А. Сравнительный анализ микроэлектромеханических инерциальных измерительных модулей различных производителей для снятия двигательной активности человека // *Омский научный вестник*. 2020. № 3 (171). С. 121–127. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-121-127.

Статья поступила в редакцию 05.03.2020 г.

© Г. А. Фофанов