

УДК 621.3: 62-791.2

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.10

ВИЗНАЧЕННЯ КУТА НАХИЛУ ПРИЛАДУ ДО ГОРИЗОНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО СЕНСОРА MPU6050

Я. В. ЗНАМЕНЩИКОВ¹, Ю. О. ШКИРЯ¹, С. С. НЕКРАСОВ², А. Ю. ДОВГОПОЛОВ^{2*}

¹ кафедра електроніки і комп'ютерної техніки, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

² кафедра технології машинобудування верстатів та інструментів, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

*e-mail: d_a_u_@ukr.net

АНОТАЦІЯ У теперішній час широке розповсюдження отримали мікроелектромеханічні системи. Яскравими прикладами мікроелектромеханічної системи є акселерометри та гіроскопи. В даній статті розглядається можливість використання вимірювальної системи на основі мікроелектромеханічного сенсорного модуля MPU6050 для визначення кута нахилу приладу по відношенню до горизонту. Даний модуль може використовуватись для цифрового рівня, в різних пристроях для стабілізації положення, для визначення швидкості нахилу і т.і. Основною перевагою мікроелектромеханічного сенсора MPU6050 перед всіма іншими є його дешевизна і широкі можливості вимірювання величин, дані з якого отримуються у цифрових значеннях. MPU6050 дозволяє вимірювати прискорення та частоту обертання, і можливість прямого вимірювання кута нахилу відсутня. Для вимірювання ж кута нахилу використовується «побічна дія», через яку змінюється значення прискорення вільного падіння при зміні кута нахилу до горизонту. Основною проблемою при використанні зазначеного модуля, є те, що покази мають сильний шум, що обмежує його можливість використання для точних вимірів та при необхідності отримання результатів вимірювань при великих швидкостях руху. Але використовуючи математичну обробку результатів вимірювань стає можливим отримувати статичні значення з точністю до 0.05 градуси, що дозволяє ставити сенсор MPU6050 в один ряд з іншими сенсорами призначеними для вимірювання кута нахилу. Наведена авторами методика обробки дозволяє значно знизити цифровий шум, що виникає при статичному положенні сенсора. Зниження цифрового шуму стало можливим завдяки тому, що мікроелектромеханічний сенсор MPU6050 дозволяє вимірювати кутову швидкість, відповідно кут нахилу по відношенню до горизонту не може змінюватись при статичному положенні сенсора, тобто коли кутова швидкість навколо відповідної вісі дорівнює нулю. І навпаки коли з'являється кутова швидкість, то відповідно і з'являється зміна кута нахилу сенсора, більш того чим більше значення кутової швидкості, тим швидше мають змінюватись значення кута нахилу, що і враховано в математичній моделі розрахунку кута нахилу.

Ключові слова: акселерометр; гіроскоп; кут нахилу; MEMS; MPU6050; мікроконтролер; STM8

DETERMINATION OF THE ANGLE OF THE DEVICE INCLINATION RELATIVE TO THE HORIZON USING A MEASURING SYSTEM BASED ON THE MPU6050 MICROELECTROMECHANICAL SENSOR

Y. ZNAMENSHCHYKOV¹, Yu. SHKYRYA¹, S. NEKRASOV², A. DOVHOPOLOV^{2*}

¹ Department of Electronics and Computer Technology, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

² Department of Technology of machine building, machine tools and tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

ABSTRACT At present time microelectromechanical systems have become widely used. Accelerometers and gyroscopes are prominent examples of a microelectromechanical system. In this article we consider the possibility of using a measuring system based on the microelectromechanical sensor module MPU6050 for determination the angle of device inclination relative to the horizon. This module can be used for the digital protractors, in various devices to stabilize the position, to determine the speed of inclination, etc. The main advantage of the microelectromechanical sensor MPU6050 over all others sensors are its low cost and wide possibilities of parameters measurement, as well as the possibility to obtain digital data output. The MPU6050 allows to measure acceleration and rotation speed, however the ability of direct measurement of the inclination angle is not provided. To measure the inclination angle a "side effect" is used, which changes the value of the acceleration of free fall when changing the inclination angle relative to the horizon. The main problem related to application of this module is a strong noise in output values. This limits the ability of using of this sensor for accurate measurements and measurements at high movement speeds. But using of mathematical processing of measurement results makes it possible to obtain static values with an accuracy of 0.05 degrees, which allows using the MPU6050 sensor analogously to other sensors designed for measurement of the inclination angle. The processing technique given by the authors allows to significantly reduce the digital noise that occurs when the sensor is in a static position. The reduction of digital noise is achieved due to the fact that the microelectromechanical sensor MPU6050 allows to measure the angular velocity, consequently the inclination angle relative to the horizon cannot be changed at static position of the sensor, i.e. when the angular velocity around the axis is equal to zero. Conversely, when the angular velocity is not equal to zero, the inclination

angle of the sensor changes. Moreover, the greater the value of the angular velocity leads to the faster change the of inclination angle values, this phenomenon is taken into account in the mathematical model of inclination angle calculation.

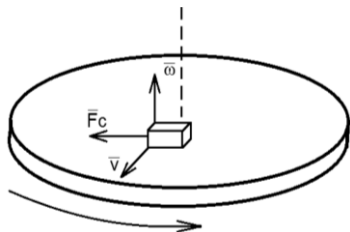
Keywords: accelerometer; gyroscope; MEMS; inclination angle; MPU6050; microcontroller; STM8

Вступ. Принцип роботи

Широке використання мікроелектромеханічних систем стало можливим завдяки їх мініатюрності, більшій функціональності, високій надійності, низького енергоспоживання та низької вартості. Типовими прикладами мікроелектромеханічних систем є акселерометри та гіроскопи які є в будь якому смартфоні, планшеті і т. д. Акселерометри використовуються для вимірювання лінійних прискорень, а гіроскопи – для вимірювання кутових швидкостей. Спільне використання акселерометра та гіроскопу дозволяє визначити параметри руху тіла у просторі [1,2].

Мікроелектромеханічні пристрої виготовляють на кремнієвій підкладці аналогічно технології виробництва однокристальних інтегральних мікросхем, тому їх розміри змінюються в діапазоні від декількох десятків мікрометрів до декількох міліметрів [3,4].

Існує декілька різновидів мікроелектромеханічних гіроскопів [5], що розрізняються внутрішньою будовою, але їх всіх об'єднує те, що їх робота ґрунтується на використанні сили Коріоліса. В кожному з них є робоче тіло, що здійснює зворотно-поступальний рух. Якщо обертати підкладку, на якій знаходиться це тіло, то на нього починає діяти сила Коріоліса, що спрямована перпендикулярно осі обертання та напрямку руху тіла [6]. На рис. 1 наведено механізм дії цієї сили.



$\vec{\omega}$ - вектор кутової швидкості, \vec{V} - вектор лінійної швидкості, \vec{F}_c - сила Коріоліса

Рис. 1 – Механізм роботи сили Коріоліса

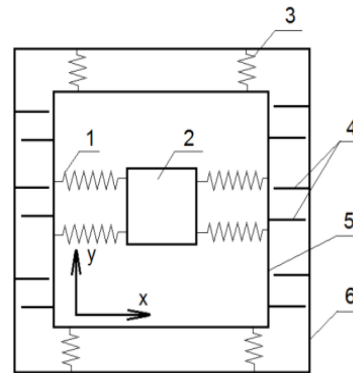
Знаючи лінійну швидкість та силу Коріоліса можна визначити кутову швидкість.

Одна з можливих реалізацій гіроскопу має наступну структуру: закріплена на гнучких підвісах рамка, всередині якої здійснює поступові коливальні рухи маса. Структура такого сенсора наведена на рис. 2.

Коливання робочої маси відбуваються вздовж вісі X та генеруються електростатично, а коливання внутрішньої рамки можливі лише вздовж вісі Y. Між внутрішньою рамкою та підкладкою розташовані обкладки плоских конденсаторів, таким чином,

вимірюючи їх ємність, можна фіксувати рух рамки відносно підкладки [7].

На рис. 3 наведена структура гіроскопу при його обертанні в площині XY за годинниковою стрілкою [8].



1 – кріплення маси, 2 – робоча маса, 3 – кріплення внутрішньої маси, 4 – сенсори переміщення внутрішньої рамки, 5 – внутрішня рамка, 6 – підкладка

Рис. 2 – Внутрішня структура гіроскопу

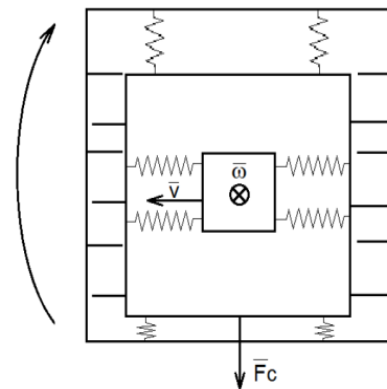


Рис. 3 – Структура гіроскопу при обертанні

Але коливання внутрішньої рамки можуть бути викликані не лише силою Коріоліса, але й лінійними прискореннями, що діють вздовж вісі Y. Проблема вирішується шляхом розміщення на одній підкладці двох рамок, в кожній з яких знаходиться робоча маса. Обидві маси коливаються в протифазі, відповідно, в конкретний момент часу сила Коріоліса, що діє на першу масу, спрямована протилежно силі, що діє на іншу [9,10]. Сигнали, що генеруються силою Коріоліса, будуть додаватись, а синфазна складова, що створюється лінійними прискореннями – відніматись.

Кут нахилу модулю можна отримати за даними акселерометра визначається за формулою 1:

$$\theta = \arctg \frac{a_y}{a_x} \quad (1)$$

де a_x, a_y – проекції прискорення на повздовжню та вертикальну вісі в системі координат, що зв'язана з центром мас модуля.

Вимірювання акселерометра мають суттєві викиди та спотворення, що обумовлені дією бокових прискорень.

Кут нахилу може бути отриманий також інтегруванням відповідних проекцій кутової швидкості, що отримані від гіроскопу, однак при цьому можливе накопичення похибки інтегрування. До того ж, для мікроелектронічних гіроскопів характерна незначна зміщення кутової швидкості. Відповідно, потрібно провести фільтрацію вимірювань акселерометру та гіроскопу, що поєднує переваги обох датчиків [6].

Мета роботи

Розробка математичної моделі визначення кута нахилу приладу по відношенню до горизонту з використанням мікроелектромеханічного сенсору MPU6050.

Викладення основного матеріалу

Структура вимірювальної системи

На рис. 4 представлена структурна схема системи для вимірювання кута, система складається з передаючої і приймальної частини. До складу передаючої частини входять: модуль MPU6050, плата мікроконтролера STM8 та модуль бездротової передачі даних (бездротовий передавач). Приймаюча частина складається з модуля бездротової передачі даних (бездротовий приймач), мікроконтролера STM8, перетворювача інтерфейсів UART/USB. Приймальна частина за допомогою інтерфейсу USB підключається до комп'ютера для збору даних.

У модуль MPU 6050 інтегровано трьохосьовий акселерометр, трьохосьовий гіроскоп та цифровий процесор для первинної обробки вимірювань. В модулі MPU 6050 передбачено аналоговий вхід для зовнішнього компасу, що дозволяє забезпечувати вимірювання орієнтації трьох кутів Ейлера. Вбудовані в модуль аналогово-цифрові перетворювачі (3 АЦП – для акселерометра та 3 – для гіроскопу) забезпечують

вимірювання на виході модуля в цифровому вигляді. Для обміну даними з мікроконтролером застосовується інтерфейс I²C.

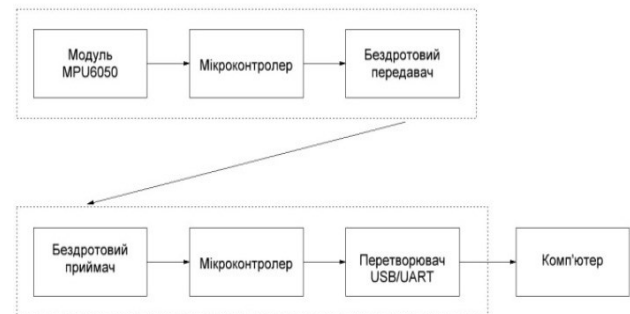


Рис. 4 – Структурна схема вимірювальної системи

Математична модель вимірювального модуля

Оскільки вимірювання кутової швидкості гіроскопом на малому інтервалі часу має достатню високу точність, його можна використовувати для корегування вимірювання акселерометром. Для цього було запропоновано рівняння 2:

$$\alpha_n = K(\theta_n - \alpha_{(n-1)}) + \alpha_{(n-1)} \quad (2)$$

де K – коефіцієнт який має залежати від кутової швидкості

Тобто, запропоноване рівняння має враховувати зміну кута нахилу лише тоді коли змінюється кутова швидкість, якщо ж такої зміни немає, то відповідно немає й причин для зміни кута нахилу. Отже, коефіцієнт K має розраховуватись за формулою 3:

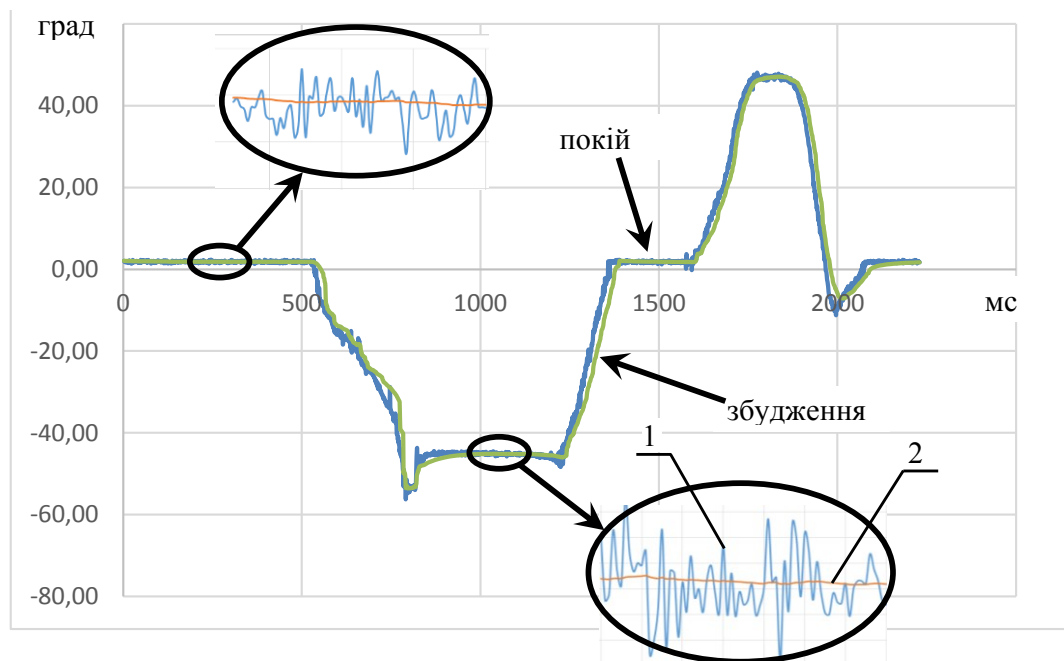
$$K = A + B|\omega_n - \omega_{(n-1)}| \quad (3)$$

де A та B коефіцієнти чутливості, які були визначені емпірично та склали $A=0.015$; $B=0.0002$.

Отже кінцева залежність, що враховує рух буде мати залежність 4:

$$\alpha_n = \left(0.015 + 0.0002|\omega_n - \omega_{(n-1)}|\right)(\theta_n - \alpha_{(n-1)}) + \alpha_{(n-1)} \quad (4)$$

Графік цієї залежності отриманий з модулю MPU 6050 наведено на рис. 5.



1 – діаграма прямого розрахунку кута нахилу, 2 – діаграма кута нахилу з математичною обробкою

Рис. 5 – Діаграма зміни кута нахилу в залежності від часу

Як видно з отриманої діаграми, запропонована математична модель визначення кута нахилу дозволяє значно знизити коливання кута нахилу під час знаходження вимірювального пристрою в покою.

Висновки

Показана можливість визначення кута нахилу приладу по відношенню до горизонту з використанням мікроелектромеханічного сенсору MPU 6050 за рахунок визначення зміни значення прискорення, в залежності від кута нахилу, що дозволило розширити межі використання мікроелектромеханічного сенсору MPU 6050.

Запропонована методика обробки даних, що отримані з мікроелектромеханічного сенсору MPU 6050 значно підвищити точність отримуваних результатів вимірювання кутів нахилу. При розрахунку кута нахилу враховується швидкість обертання приладу, що дозволило знизити шуми при знаходженні сенсору у спокої.

Список літератури

1. Deng L., Fang Y., Wang D., Wen Z. A MEMS based piezoelectric vibration energy harvester for fault monitoring system. *Microsyst Technol*, 2018. № 4. P. 3637 – 3644. doi: 10.1007/s00542-018-3784-7.
2. Acciari G., Caruso M., Miceli R., Riggi L., Romano P., Schettino G., Viola F. Piezoelectric rainfall energy harvester performance by an advanced Arduino-based measuring system. *IEEE Trans Ind Appl*, 2018. № 54 (1). P. 458 – 468. doi:10.1109/tia.2017.2752132.
3. Iacono F. L., Navarra G., Oliva M. Structural monitoring of “Himera” viaduct by low-cost MEMS sensors: characterization and preliminary results. *Meccanica*, 2018 № 52 (13). P. 3221 – 3236. doi:10.1007/s11012-017-0691-4.
4. Yan Y., Liu Y., Chávez J. P., Zonta F., Yusupov A. Proof-of-concept prototype development of the self-propelled capsule system for pipeline inspection. *Meccanica*, 2017 № 5. P. 1 – 16. doi. 10.1007/s11012-017-0801-3.
5. Gravina R., Parastoo A., Ghasemzadeh H., Giancarlo F. Multi-sensor fusion in body sensor networks: state-of-the-art and research challenges. *Inf Fusion*, 2017. № 35. P. 68 – 80. doi: 10.1016/j.inffus.2016.09.005.
6. Bengherbia B., Zmiria M. O., Toubala A., Guessoum A. FPGA-based wireless sensor nodes for vibration monitoring system and fault diagnosis. *Measurement*, 2017. № 101. P. 81 – 92. doi: 10.1016/j.measurement.2017.01.022.
7. Son J. D., Ahn B. H., Ha J. M., Choi B. K. An availability of MEMS-based accelerometers and current sensors in machinery fault diagnosis. *Measurement*, 2016. № 94. P. 680 – 691. doi: 10.1016/j.measurement.2016.08.035.
8. Varanis M., Silva A. L., Brunetto P. H. A., Gregolin R. F. Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2016. № 38 (1). P. 1301. doi: 10.1590/s1806-11173812063.
9. Varanis M., Silva A. L., Mereles A., de Oliveira C., Balthazar J. M. Instrumentation of a nonlinear pendulum using Arduino microcontroller. In Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American congress on computational methods in engineering. 2016. doi: 10.26512/ripe.v2i27.14447.
10. Duc T. T., Le Anh T., Dinh H. V. Estimating modal parameters of structures using Arduino platform. In:

International conference on advances in computational mechanics. *Springer, Singapore*, 2017. P. 1095 – 1104
doi:10.1007/978-981-10-7149-2_76.

References (transliterated)

1. Deng L., Fang Y., Wang D., Wen Z. A MEMS based piezoelectric vibration energy harvester for fault monitoring system. *Microsyst Technol*, 2018, no. 4, pp. 3637 – 3644, doi: 10.1007/s00542-018-3784-7.
2. Acciari G., Caruso M., Miceli R., Riggi L., Romano P., Schettino G., Viola F. Piezoelectric rainfall energy harvester performance by an advanced Arduino-based measuring system. *IEEE Trans Ind Appl*, 2018, no. 54 (1), pp. 458 – 468, doi:10.1109/tia.2017.2752132.
3. Iacono F. L., Navarra G., Oliva M. Structural monitoring of “Himera” viaduct by low-cost MEMS sensors: characterization and preliminary results. *Meccanica*, 2018, no. 52 (13), pp. 3221 – 3236, doi: 10.1007/s11012-017-0691-4.
4. Yan Y., Liu Y., Chávez J. P., Zonta F., Yusupov A. Proof-of-concept prototype development of the self-propelled capsule system for pipeline inspection. *Meccanica*, 2017, no. 5, pp. 1 – 16, doi: 10.1007/s11012-017-0801-3.
5. Gravina R., Parastoo A., Ghasemzadeh H., Giancarlo F. Multi-sensor fusion in body sensor networks: state-of-the-art and research challenges. *Inf Fusion*, 2017, no. 35, pp. 68 – 80, doi: 10.1016/j.inffus.2016.09.005.
6. Bengherbiaa B., Zmiria M. O., Toubala A., Guessoumb A. FPGA-based wireless sensor nodes for vibration monitoring system and fault diagnosis. *Measurement*, 2017, no. 101, pp. 81 – 92, doi: 10.1016/j.measurement.2017.01.022.
7. Son J. D., Ahn B. H., Ha J. M., Choi B. K. An availability of MEMS-based accelerometers and current sensors in machinery fault diagnosis. *Measurement*, 2016, no. 94, pp. 680 – 691, doi: 10.1016/j.measurement.2016.08.035.
8. Varanis M., Silva A. L., Brunetto P. H. A., Gregolin R. F. Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2016, no. 38 (1), pp. 1301, doi: 10.1590/s1806-11173812063.
9. Varanis M., Silva A. L., Mereles A., de Oliveira C., Balthazar J. M. Instrumentation of a nonlinear pendulum using Arduino microcontroller. In Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American congress on computational methods in engineering, 2016, doi: 10.26512/riape.v2i27.14447.
10. Duc T. T., Le Anh T., Dinh H. V. Estimating modal parameters of structures using Arduino platform. In: International conference on advances in computational mechanics. *Springer, Singapore*, 2017, pp. 1095 – 1104, doi:10.1007/978-981-10-7149-2_76.

Відомості про авторів (About authors)

Знаменщиков Ярослав Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, старший викладач, кафедра Електроніки та комп'ютерної техніки (ЕКТ), Сумський державний університет, м. Суми, Україна; e-mail: yaroslav.znamenshchikov@gmail.com.

Yaroslav Znamenshchikov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Lecturer, Department of Electronics and Computer Technology, Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: yaroslav.znamenshchikov@gmail.com.

Шкиря Юрій Олегович – студент, кафедра Електроніки та комп'ютерної техніки (ЕКТ), Сумський державний університет, м. Суми, Україна; e-mail: rocketyaria@gmail.com.

Yuriy Shkyrya – Student, Department of Electronics and Computer Technology, Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: rocketyaria@gmail.com.

Некрасов Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, доцент кафедри Технологія машинобудування верстати та інструменти (ТМБІ), м. Суми, Україна; e-mail: nekrasovss@gmail.com.

Sergii Nekrasov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy, Ukraine, e-mail: nekrasovss@gmail.com.

Довгополов Андрій Юрійович – кандидат технічних наук, викладач, Сумський державний університет, кафедра Технологія машинобудування верстати та інструменти (ТМБІ), м. Суми, Україна; e-mail: d_a_y_@ukr.net.

Andrii Dovhopolov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), lecturer, Sumy State University, postgraduate Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy, Ukraine; e-mail: d_a_y_@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Знаменщиков Я. В., Шкиря Ю. О., Некрасов С. С., Довгополов А. Ю. Визначення кута нахилу приладу до горизонту з використанням виміральної системи на основі мікроелектромеханічного сенсора MPU6050. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 65-70. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.10.

Please cite this article as:

Znamenshchikov Y., Shkyrya Yu., Nekrasov S., Dovhopolov A. Determination of the angle of the device inclination relative to the horizon using a measuring system based on the MPU6050 microelectromechanical sensor. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 65-70, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.10.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Знаменщиков Я. В., Шкиря Ю. О., Некрасов С. С., Довгополов А. Ю. Определение угла наклона прибора к горизонту с использованием измерительной системы на основе микроэлектромеханического сенсора MPU6050. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 65-70. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.10.

АННОТАЦИЯ В настоящее время широкое распространение получили микроэлектромеханические системы. Яркими примерами микроэлектромеханических систем являются акселерометры и гироскопы. В данной статье рассматривается возможность использования измерительной системы на основе микроэлектромеханического сенсорного модуля MPU 6050 для определения угла наклона прибора по отношению к горизонту. Данный модуль может использоваться для цифрового уровня, в различных устройствах для стабилизации положения, для определения скорости наклона и т.д. Основным преимуществом микроэлектромеханического сенсора MPU6050 перед всеми другими является его дешевизна и широкие возможности измерения величин, данные из которого получаются в цифровых значениях. MPU6050 позволяет измерять ускорение и частоту вращения, и возможность прямого измерения угла наклона отсутствует. Для измерения же угла наклона используется «побочное действие», под влиянием которой меняется значение ускорения свободного падения при изменении угла наклона к горизонту. Основной проблемой при использовании указанного модуля является то, что показания имеют сильный шум, что ограничивает его возможность использования для точных измерений и при необходимости получения результатов измерений при больших скоростях движения. Но используя математическую обработку результатов измерений становится возможным получать статические значения с точностью до 0.05 градуса, что позволяет ставить сенсор MPU6050 в один ряд с другими сенсорами предназначенными для измерения угла наклона. Приведенная авторами методика обработки позволяет значительно снизить цифровой шум, возникающий при статическом положении сенсора. Снижение цифрового шума стало возможным благодаря тому, что микроэлектромеханический сенсор MPU6050 позволяет измерять угловую скорость, соответственно угол наклона по отношению к горизонту не может изменяться при статическом положении сенсора, то есть когда угловая скорость вокруг соответствующей оси равна нулю. И наоборот когда появляется угловая скорость, то соответственно и появляется изменение угла наклона сенсора, более того, чем больше значение угловой скорости, тем быстрее должны меняться значение угла наклона, что и учтено в математической модели расчета угла наклона.

Ключевые слова: акселерометр; гироскоп; угол наклона; МЭМС; MPU6050; микроконтроллер; STM8

Надійшла (received) 21.11.2020