

УДК 53.082.5

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК УГЛА НАКЛОНА НА ОСНОВЕ
ФОТОПРИЕМНИКА С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ****Дорофеев Дмитрий Вячеславович,**

инженер-электронщик кафедры Электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, e-mail: watson213@yandex.ru

Кострин Дмитрий Константинович,

д.т.н., профессор кафедры Электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, e-mail: dkkostrin@mail.ru

Аннотация

Электронные датчики угла наклона широко применяются во многих областях науки и техники, их принцип действия заключается в измерении направления ускорения свободного падения в системе координат, связанной с целевым объектом, что позволяет вычислить углы отклонения вертикальной оси объекта от идеального положения. В работе рассматривается конструкция простого по исполнению опτικο-электронного датчика угла наклона, принцип действия которого основан на анализе положения пятна света, полученного в результате прохождения излучения через пузырьковый уровнемер, на поверхности фотоприемника с зарядовой связью при изменении угла наклона. Разработанный прототип устройства позволяет измерять углы наклона в диапазоне от 0 до 4° с достаточной для большинства применений точностью.

Ключевые слова: электронный датчик, угол наклона, измерение, фотоприемник с зарядовой связью, оптическое излучение.

**OPTOELECTRONIC TILT ANGLE SENSOR BASED ON A CHARGE-
COUPLED PHOTODETECTOR****Dorofeev Dmitri Vyacheslavovich,**

Electronics Engineer, Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, e-mail: watson213@yandex.ru

Kostrin Dmitri Konstantinovich,

D.Sc. (Eng.), Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, e-mail: dkkostrin@mail.ru

ABSTRACT

Electronic tilt angle sensors are widely used in many fields of science and technology. Their principle of operation is to measure the direction of acceleration of gravity in the coordinate system associated with the target object, which makes it possible to calculate the angles of deviation of the vertical axis of the object from its ideal position. The paper considers the design of a simple optoelectronic tilt angle sensor, the principle of operation of which is based on the analysis of the position of a spot of light obtained as a result of radiation passing through a bubble level gauge on the surface of a charge-coupled photodetector when the angle of inclination changes. The developed prototype of the device allows measuring tilt angles in the range from 0 to 4° with sufficient accuracy for most applications.

Keywords: electronic sensor, tilt angle, measurement, charge-coupled photodetector, optical radiation.

Введение

Электронные датчики угла наклона широко применяются во многих областях науки и техники, например для балансировки строительных кранов, измерения угла бурения, контроля наклона транспортных средств [1–7]. Такие датчики можно разделить по принципу действия: емкостные, резистивные, индуктивные, магнитные, оптические, тепловые и жидкостные [8–10].

Принцип действия датчика угла наклона заключается в измерении направления ускорения свободного падения в системе координат, связанной с целевым объектом, что позволяет вычислить углы отклонения вертикальной оси объекта от идеального положения. Современные электронные датчики угла наклона могут обеспечивать точность измерения угла до 0.1°.

Оптические средства измерения привлекают внимание благодаря своей невосприимчивости к электромагнитным помехам и способности функционировать в экстремальных условиях эксплуатации [11–15]. Существенным недостатком большинства оптико-электронных датчиков угла наклона является их высокая стоимость.

Цель исследования

В данной работе рассматривается разработка конструкции достаточно простого по исполнению оптико-электронного датчика угла наклона, принцип действия которого основан на анализе положения пятна света на поверхности фотоприемника с зарядовой связью при изменении угла наклона.

Материалы и методы исследования

Уровни пузырькового типа имеют высокую чувствительность к наклону и служат основой для установления истинной горизонтали или вертикали для оптико-электронных измерительных приборов. Они позволяют мгновенно визуально оценивать направление и величину наклона. Их недостатком является невозможность преобразования направления и величины наклона в электрический сигнал и, как следствие, невозможность использования их в средствах автоматизации.

Для получения электронного сигнала можно использовать фотоприемник с зарядовой связью, на поверхность которого поступает прошедшее через пузырьковый уровнемер излучение от точечного источника. В данном случае формируется пятно света, перемещающееся по поверхности фотоприемника при изменении угла наклона. Благодаря применению в датчиках фотоприемников с зарядовой связью или набора фотодиодов можно получить устройство с достаточно низким энергопотреблением.

На этапе исследования и первичного конструирования для упрощения работы был использован модуль фотоприемного устройства от спектрометра ISM3600, разработанного на кафедре электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета [16, 17]. Фрагмент конструкции прототипа оптико-электронного датчика угла наклона на основе фотоприемника с зарядовой связью представлен на рис. 1.

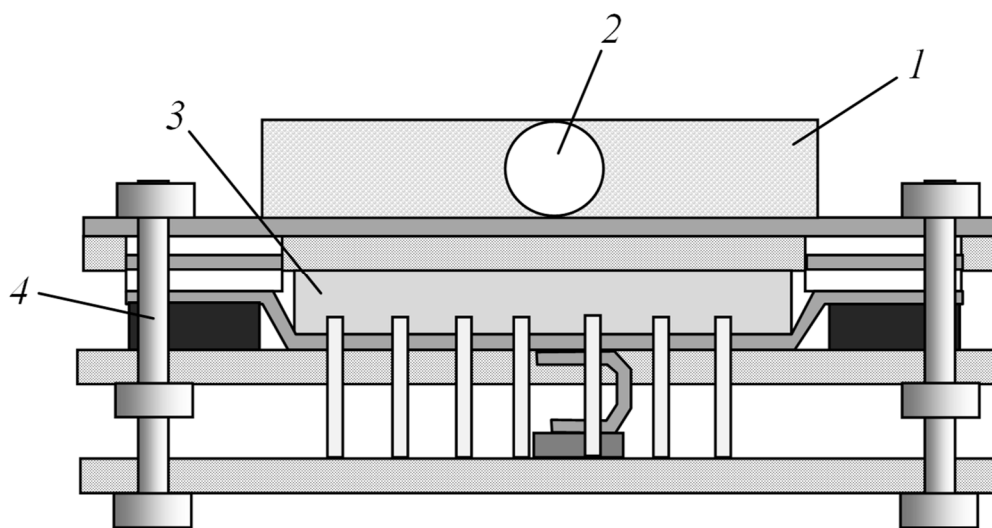


Рис. 1. Фрагмент конструкции прототипа опико-электронного датчика угла наклона: 1 – пузырьковый уровнемер; 2 – пузырек воздуха; 3 – фотоприемник с зарядовой связью; 4 – устройство фиксации фотоприемника, включающий печатные платы с электронными компонентами и систему термостатирования

Поскольку показатель преломления и поглощения газа и жидкости различны, при прохождении потока излучения от точечного источника через жидкость с пузырьком газа на поверхности фотоприемника формируются зона света и тени с изображением пузырька. При наклоне датчика пузырек смещается в сторону и световое пятно на поверхности фотоприемника двигается вместе с ним. Чем больше засвечиваются пиксели фотоприемника, тем больший сигнал формируется на выходе устройства. Информация о модуле величины угла и направлении наклона получается в результате анализа распределения уровня сигнала по пикселям фотоприемника.

Результаты и их обсуждение

Регистрация и математическая обработка графиков освещенности фотоприемника с зарядовой связью производились в программе Aspect 2010 [18]. Измерения при разных углах наклона проводились с шагом в 1° . Фотоприемник содержит 3600 пикселей при длине чувствительной области в 35 мм и размере отдельного пикселя $8 \text{ мкм} \times 200 \text{ мкм}$.

На рис. 2 приведен график уровня освещенности пикселей фотоприемника (или коэффициента пропускания) в разработанном прототипе датчика угла наклона. Для обработки данных использовался медианный фильтр. С увеличением угла наклона графики смещаются по оси влево или вправо, в зависимости от направления наклона.

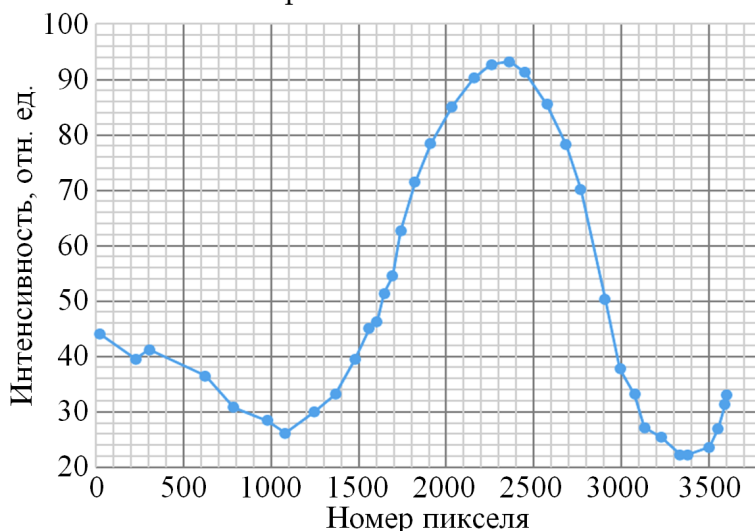


Рис. 2. График уровня освещенности пикселей фотоприемника

На рис. 3 приведена зависимость измеряемого угла наклона от номера пикселя, соответствующего максимуму графика интенсивности.

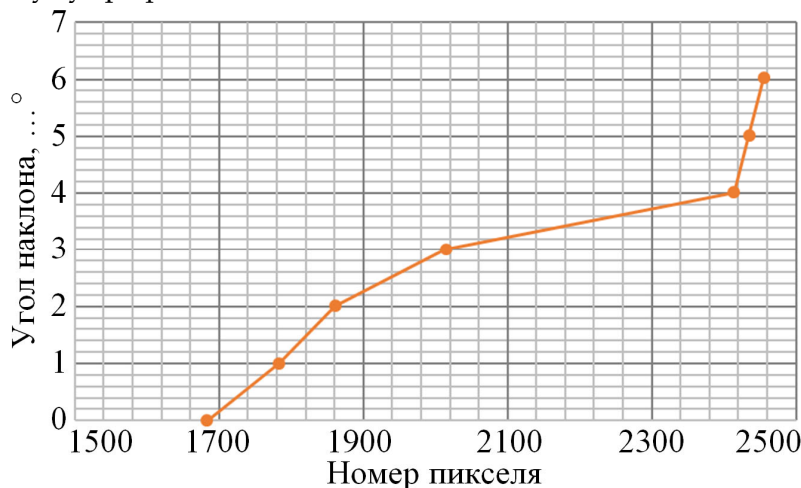


Рис. 3. График зависимости измеряемого угла наклона от номера пикселя

Можно сказать, что при углах наклона от 0 до 3° зависимость близка к линейной, далее происходит резкое смещение пика интенсивности при переходе к углу в 4°. При дальнейшем увеличении угла наклона изменение характеристики незначительно и не может быть использовано для измерения. Данный эффект связан с конструкцией пузырькового уровнемера, который способен измерять углы наклона до 4°. Несмотря на это такой датчик угла наклона можно использовать для высокоточных измерений при небольших углах наклона. Можно отметить, что на 1° изменения угла наклона приходится порядка 100 пикселей, что позволяет с применением простейшего микроконтроллера рассчитать угол с достаточно высокой точностью.

Заключение

В работе рассмотрен оптико-электронный датчик угла наклона, основными узлами которого являются фотоприемник с зарядовой связью, точечный источник излучения и пузырьковый уровнемер. Принцип действия устройства основан на анализе сигнала фотоприемника, регистрирующего пятно света при перемещении пузырька воздуха в колбе с жидкостью при изменении угла наклона. Разработанный прототип устройства позволяет измерять углы наклона в диапазоне от 0 до 4° с достаточной для большинства применений точностью.

Список литературы:

1. A Wireless MEMS-Based Inclinometer Sensor Node for Structural Health Monitoring // D.W. Ha, H.S. Park, S.W. Choi, Y. Kim // *Sensors*. 2013. Vol. 13, № 12. P. 16090–16104.
2. Sensor fusion for structural tilt estimation using an acceleration-based tilt sensor and a gyroscope / C. Liu, J.-W. Park, B.F. Spencer Jr. et al. // *Smart Materials and Structures*. 2017. Vol. 26, № 10. P. 105005.
3. Базанов П., Вербов И. Датчики положения в современных системах автоматизации в примерах и иллюстрациях // *Компоненты и технологии*. 2006. № 7. С. 74–77.
4. A Liquid-Surface-Based Three-Axis Inclination Sensor for Measurement of Stage Tilt Motions / Y. Shimizu, S. Kataoka, T. Ishikawa et al. // *Sensors*. 2018. Vol. 18, № 2. P. 398.
5. Jeng C.J., Yo Y.Y., Zhong K.L. Interpretation of slope displacement obtained from inclinometers and simulation of calibration tests // *Natural Hazards*. 2017. Vol. 87, № 2. P. 623–657.

6. Биндер Я.И., Падерина Т.В., Розенцвейн В.Г. Высокопроизводительная прецизионная иклинотрическая съемка скважин малого диаметра. Результаты практического внедрения // Гироскопия и навигация. 2009. № 1. С. 52–62.
7. Арсланов И.Г., Ягафарова Х.Н. Особенности применения непрерывных гироскопических инклинометров // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2018. № 5. С. 16–19.
8. Кострин Д.К. Современные электронные датчики угла наклона: обзор основных физических принципов функционирования и перспективных разработок // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 6. С. 5–23.
9. Kumar A.S.A., George B., Mukhopadhyay S.C. Technologies and Applications of Angle Sensors: A Review // IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21, № 6. P. 7195–7206.
10. Luczak S., Ekwinska M. Electric-Contact Tilt Sensors: A Review // Sensors. 2021. Vol. 21, № 4. P. 1097.
11. Zhong Z., Zhao L., Lin H. Development and investigation of an optical tilt sensor // Optics Communications. 2006. Vol. 261, № 1. P. 23–28.
12. Das S. A Simple, Low Cost Optical Tilt Sensor // International Journal of Electronics and Electrical Engineering. 2014. Vol. 2, № 3. P. 235–241.
13. Optical sensors for real-time measurement of motorcycle tilt angle / M. Norgia, I. Boniolo, M. Tanelli et al. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Vol. 58, № 5. P. 1640–1649.
14. Pei H.-F., Yin J.-H., Jin W. Development of novel optical fiber sensors for measuring tilts and displacements of geotechnical structures // Measurement Science and Technology. 2013. Vol. 24, № 9. P. 095202.
15. The Omni-Directional Electronic Level Structure and Measuring Analysis Principle / C.-T. Wang, E.-H. Yang, J.-G. Zhang et al. // Journal of Scientific Instrument. 2006. Vol. 27, № 2. P. 183–185.
16. Ухов А.А., Кострин Д.К. Оптимизация системы регистрации многоканального оптического спектрометра // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 4. С. 8–12.
17. Кострин Д.К., Ухов А.А. Аппаратно-программный спектрометрический комплекс для исследования параметров светоизлучающих диодов // Биотехносфера. 2013. № 3. С. 21–25.
18. Особенности анализа состава плазмы с помощью малогабаритного оптического спектрометра / А.А. Ухов, Д.К. Кострин, В.А. Герасимов, Л.М. Селиванов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 3. С. 7–10.

References:

1. A Wireless MEMS-Based Inclinator Sensor Node for Structural Health Monitoring // D.W. Ha, H.S. Park, S.W. Choi, Y. Kim // Sensors. 2013. Vol. 13, № 12. P. 16090–16104.
2. Sensor fusion for structural tilt estimation using an acceleration-based tilt sensor and a gyroscope / C. Liu, J.-W. Park, B.F. Spencer Jr. et al. // Smart Materials and Structures. 2017. Vol. 26, № 10. P. 105005.
3. Bazanov P., Verbov I. Position sensors in modern automation systems in examples and illustrations // Components and Technologies. 2006. № 7. P. 74–77.

4. A Liquid-Surface-Based Three-Axis Inclination Sensor for Measurement of Stage Tilt Motions / Y. Shimizu, S. Kataoka, T. Ishikawa et al. // *Sensors*. 2018. Vol. 18, № 2. P. 398.
5. Jeng C.J., Yo Y.Y., Zhong K.L. Interpretation of slope displacement obtained from inclinometers and simulation of calibration tests // *Natural Hazards*. 2017. Vol. 87, № 2. P. 623–657.
6. Binder Ya.I., Paderina T.V., Rosenzweig V.G. High-performance precision inclinometric survey of small diameter wells. The results of practical implementation // *Gyroscopy and Navigation*. 2009. № 1. P. 52–62.
7. Arslanov I.G., Yagafarova H.N. Application features of continuous gyroscopic inclinometers // *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. 2018. № 5. P. 16–19.
8. Kostrin D.K. Modern electronic tilt angle sensors: an overview of the basic physical principles of operation and promising developments // *LETI Transactions on Electrical Engineering and Computer Science*. 2024. Vol. 17, № 6. P. 5–23.
9. Kumar A.S.A., George B., Mukhopadhyay S.C. Technologies and Applications of Angle Sensors: A Review // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, № 6. P. 7195–7206.
10. Luczak S., Ekwinska M. Electric-Contact Tilt Sensors: A Review // *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 4. P. 1097.
11. Zhong Z., Zhao L., Lin H. Development and investigation of an optical tilt sensor // *Optics Communications*. 2006. Vol. 261, № 1. P. 23–28.
12. Das S. A Simple, Low Cost Optical Tilt Sensor // *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*. 2014. Vol. 2, № 3. P. 235–241.
13. Optical sensors for real-time measurement of motorcycle tilt angle / M. Norgia, I. Boniolo, M. Tanelli et al. // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2009. Vol. 58, № 5. P. 1640–1649.
14. Pei H.-F., Yin J.-H., Jin W. Development of novel optical fiber sensors for measuring tilts and displacements of geotechnical structures // *Measurement Science and Technology*. 2013. Vol. 24, № 9. P. 095202.
15. The Omni-Directional Electronic Level Structure and Measuring Analysis Principle / C.-T. Wang, E.-H. Yang, J.-G. Zhang et al. // *Journal of Scientific Instrument*. 2006. Vol. 27, № 2. P. 183–185.
16. Uhov A.A., Kostrin D.K. Optimization of the registration system of a multichannel optical spectrometer // *LETI Transactions on Electrical Engineering and Computer Science*. 2013. № 4. P. 8–12.
17. Kostrin D.K., Uhov A.A. Hardware and software spectrometric complex for studying the parameters of light-emitting diodes // *Biotechnosphere*. 2013. № 3. P. 21–25.
18. Features of plasma composition analysis using a small-sized optical spectrometer / A.A. Uhov, D.K. Kostrin, V.A. Gerasimov, L.M. Selivanov // *LETI Transactions on Electrical Engineering and Computer Science*. 2015. № 3. P. 7–10.