

**ПРОБЛЕМАТИКА УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛА**

С. В. БАЙДЕНКО

*НИТИ „Авангард“, Санкт-Петербург, Россия
thesergio@yandex.ru*

Аннотация. Проанализированы проблемы и ограничения, связанные с улучшением параметров точности, разрешающей способности, показателей надежности, а также с уменьшением значений массогабаритных характеристик фотоэлектрических преобразователей угла в изделиях с высокой степенью надежности. Систематизируются степень влияния и причинно-следственные взаимоотношения факторов, препятствующих улучшению основных параметров датчиков угла поворота, а также дается заключение о возможных направлениях снижения их воздействия в целях улучшения характеристик преобразователей.

Ключевые слова: фотоэлектрический цифровой преобразователь угла, энкодер, датчик углового положения, преобразователь угол-код, точность, надежность, разрешающая способность

Ссылка для цитирования: Байденко С. В. Проблематика улучшения характеристик фотоэлектрических преобразователей угла // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 132—139. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-132-139.

**PROBLEM OF IMPROVING THE CHARACTERISTICS
OF PHOTOELECTRIC ANGLE CONVERTERS**

S. V. Baidenko

*SRTI Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
thesergio@yandex.ru*

Abstract. The current problems and limitations associated with improving the accuracy parameters, resolution, reliability indicators, as well as reducing the mass and size characteristics of photoelectric digital angle converters in products with a high degree of reliability, are analyzed. The degree of influence and causal relationships of factors preventing the improvement of the main parameters of the rotation angle sensors are systematized, and a conclusion on possible directions of reducing their impact to improve the characteristics of the converters is given.

Keywords: photoelectric digital angle converter, encoder, angular position sensor, angle-code converter, accuracy, reliability, resolution

For citation: Baidenko S. V. Problem of improving the characteristics of photoelectric angle converters. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 132—139 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-132-139.

Фотоэлектрические цифровые преобразователи угла (ФЦПУ) — это группа измерительных устройств из класса преобразователей угловых и линейных перемещений, принцип работы которых основан на трансформации модулированного угловым перемещением вала потока излучения в электрические сигналы, однозначно соответствующие определенному угловому положению [1].

Задача подсчета числа импульсов при угловом или линейном перемещении, на первый взгляд, достаточно тривиальна. Но более чем за 60-летнюю историю развития данного направления появилось множество уникальных вариантов конструкций и сложных технических решений [2—7]. Совершенствование характеристик ФЦПУ в образцах техники с повышенными требованиями к надежности определяется необходимостью непрерывного повышения точности и разрешающей способности, а также уменьшения размеров в целях улучшения так-

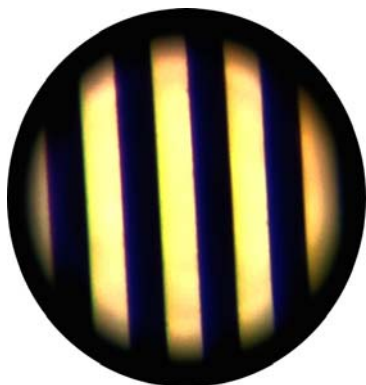
тико-технических характеристик основного изделия [8]. Каждая из этих задач имеет собственные трудности и ограничения по возможности дальнейшего совершенствования.

Повышение точности преобразователей сопряжено с улучшением нескольких взаимосвязанных характеристик. Рассмотрим трудности и ограничения улучшения параметров и характеристик фотоэлектрических преобразователей угла, связанные с оптико-механической частью изделия.

Так, повышение разрешающей способности преобразователя непосредственно связано с увеличением числа щелей (штрихов) на кодovém диске (КД), достичь которого возможно, уменьшив площадь щели. Но этот процесс имеет физические ограничения, связанные с предельным числом щелей, которые возможно нанести для конкретного диаметра. Высокоточные кодовые структуры фотоэлектрических преобразователей угла, выполненные на стеклянной подложке, имеют погрешность нанесения щелей порядка 0,4 мкм (3" для диаметра 50 мм). В то же время при использовании в качестве материала диска металлических пластин и применении метода химического травления или лазерной резки это значение возрастает до десятков микрометров.

На рис. 1, *а* приведена кодовая структура с периодом 12 мкм, выполненная в НИТИ „Авангард“ методом фотолитографии, а на рис. 1, *б* — часть кодовой шкалы, выполненная с применением лазерной резки на металлическом диске, с наименьшим периодом дорожки 350 мкм.

а)



б)



Рис. 1

Большое число нанесенных щелей (штрихов) снижает количество пропускаемого света, поскольку ширина щели уменьшается прямо пропорционально увеличению их числа. Это может повлечь за собой сложности, связанные с существенным ослаблением мощности сигнала вследствие aberrаций оптической системы [9], что с течением времени и при воздействии температуры приведет к снижению надежности.

На точность измерений ФЦПУ влияет как однородность изготовления рисунка кодирующих структур, так и эксцентриситет их градуировки [10]. Для достижения высокой точности измерений такие ошибки должны быть устранены, минимизированы или исправлены при последующей обработке сигналов.

Ввиду физических ограничений [9] последующее увеличение разрешающей способности будет связано с интерполяцией гармонических сигналов. Оптимизация методов интерполяции является приоритетным направлением в повышении разрешающей способности преобразователей угла. Хорошо известным и проверенным методом электронной интерполяции является использование схемы компарирования синусно-косинусных сигналов [11]. С помощью этого метода возможна стабильная 16-кратная интерполяция на существующей элементной компонентной базе (ЭКБ) для применения в изделиях с повышенными требованиями к надежности.

В свою очередь, методы интерполяции, основанные на применении алгоритма последовательного приближения для оценки тригонометрических и гиперболических функций

CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer) [12, 13] и его улучшенных модификаций демонстрируют высокий коэффициент интерполяции в сочетании с низкой погрешностью. Максимально достижимая точность ограничена числом бит в „механизме“ CORDIC [14]. Так, например, устройство CORDIC серии микроконтроллеров STM32G4 поддерживает 16- и 32-битные входные и выходные данные и имеет внутреннюю разрядность 24 бита. Максимальная остаточная погрешность вычислений после 24 итераций равна $1,9 \cdot 10^{-6}$ для 32-битных входных данных, что соответствует 19-битной точности.

Для обеспечения высокого качества измерений и надежности при эксплуатации ФЦПУ кодовый диск и вал преобразователей должны быть установлены в высокоточном подшипниковом узле. Механическая стабильность любого преобразователя определяется конструкцией подшипникового узла, а общая точность вращения складывается из точности при малом угловом смещении и точности в полном угловом диапазоне вращения. В первом случае основными источниками возникновения погрешности являются дефекты кодовой структуры, изменения в чувствительных компонентах схемы и несовершенство коррекции сигнала при обработке данных измерения. Во втором случае основные источники погрешности — эксцентриситет установки кодового диска (вала) и биение подшипников [10].

Эксцентриситет вала определяется точностью изготовления самой детали, тогда как эксцентриситет установки кодового диска может быть устранен благодаря оптической и/или электронной юстировке. К оптической юстировке можно прибегнуть при центрировании дисков преобразователей с низкой точностью либо при предварительной установке КД прецизионных устройств.

На рис. 2 показан пример установки, используемой при электронной юстировке кодового диска ФЦПУ (1). Вал преобразователя равномерно вращается и сигналы диаметрально противоположно установленных считывателей (2, 3) отображаются на экране осциллографа (4). На основании данных о разнице фаз со считывателей пьезоактуатор (5) в определенные моменты времени смещает кодовый диск, устраняя тем самым эксцентриситет его установки. При помощи этого метода можно уменьшить погрешность установки Δe до субмикронных значений. Эксцентриситет градуировки и радиальное биение подшипников являются причинами остаточной погрешности [15].

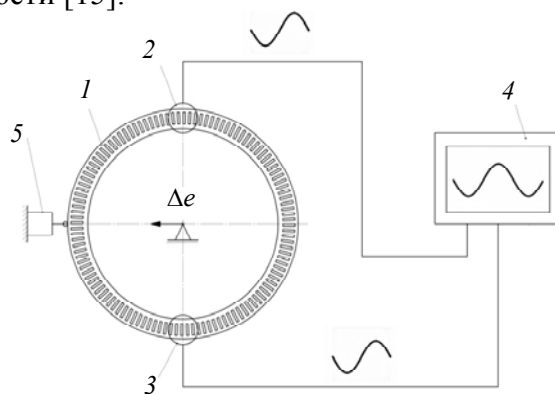


Рис. 2

Биение подшипников может существенно снизить точность вращения вала преобразователя, а следовательно и точность измерений, что делает выбор подходящего подшипника важной частью процесса разработки. Радиальное биение содержит как периодически повторяющуюся, так и неповторяющуюся составляющие, которые могут быть отнесены к недостаткам подшипниковых систем (люфт, несовершенство тел и дорожки качения, эксцентриситет).

В связи с этим карты ошибок, используемые для устранения циклической погрешности, должны быть построены на основании достаточного большого числа оборотов вала преобразователя [10].

Погрешность, вносимая радиальным биением подшипника, определяется по формуле:

$$\Delta\varphi = \pm 412,5 \frac{e}{D}, \quad (1)$$

где D — диаметр дорожки кодового диска (в миллиметрах), $\Delta\varphi$ — погрешность преобразователя (в угловых секундах), e — величина радиального биения подшипника (в микрометрах) [16].

Согласно формуле (1), для кодовой шкалы диаметром 46 мм при использовании подшипников с $e=3$ мкм погрешность, вносимая биением, составляет $\sim 27''$. Эту погрешность можно в значительной степени снизить благодаря установке диаметрально противоположных пар считывающих элементов [10]. В определенном случае эксцентриситет вала преобразователя, обусловленный несовершенством подшипников, и эксцентриситет рисунка кодовой шкалы могут компенсироваться.

На итоговое значение погрешности преобразователя, установленного в основное изделие, существенное влияние также оказывают соосность установки и параметры сопрягающей муфты, ее точность и конструкция. Между нагрузкой на подшипник и его сроком службы существует связь [17], выражаемая формулой $n = (C/P)^3$, где n — срок службы подшипника (обороты), C — динамическая грузоподъемность (Н), P — нагрузка на подшипник (Н). Из данной формулы видно, что при увеличении нагрузки на подшипник на m Н срок его службы уменьшается в m^3 раз.

При рассмотрении показателей надежности элементной компонентной базы в контексте ФЦПУ пристальное внимание должно быть уделено надежности оптоэлектронных компонентов, в особенности источникам и приемникам излучения. Эти компоненты наиболее чувствительны к воздействию внешних воздействующих факторов (ВВФ), а также высокоэнергетических частиц (ВЭЧ): протоны, электроны, ионы. Их резервирование сложно, а в некоторых случаях невозможно заложить на уровне преобразователя с сохранением прежних массогабаритных и точностных характеристик. Отказ любой пары излучатель—приемник является достаточным условием для нарушения монотонности и информационной емкости выходного кода датчика углового положения, приводящего к неработоспособности. Для минимизации отказов комплектующих оптоэлектронных изделий и увеличения времени наработки ФЦПУ в условиях воздействия ВВФ необходимо использовать определенные типы и материалы полупроводниковых структур; типы кодовых структур с исправлением одиночных ошибок [18]; учитывать влияние ВЭЧ на материалы пассивных оптических компонентов (покровные стекла, линзы и т.п.); располагать достоверными параметрами и характеристиками рабочей среды, при необходимости подвергать изделия непосредственному воздействию ВЭЧ при проведении испытаний, не полагаясь на оценочные/расчетные данные.

В качестве примера необходимости детальной проработки всех сформулированных моментов можно привести отказ оптопар, которые использовались в одной из частей схемы управления маневровыми двигателями космического корабля Торех/Poseidon после 2,5 лет эксплуатации [19]. Радиационные испытания этих оптопар не проводились: разработчики ограничились полученными из теоретической модели значениями общей дозы ионизирующего излучения, которые не учитывали плотность потока частиц (флюенс) Φ в рабочей среде. Также разработчиками не была учтена крайняя чувствительность оптопар к дефектам смещения от протонов в кристаллической решетке полупроводников. Тем не менее часть схемы, непосредственно связанной с двигателями, продолжала работать, так как в ее проектировании разработчики использовали ультраконсервативный подход при реализации своей части конструкции.

Так, одним из наиболее устойчивых к радиационному повреждению типов структуры для применения в источниках излучения, согласно [19], является двойной гетеропереход. Устройства, основанные на структуре этого типа, могут работать при уровнях излучения примерно на два порядка выше, чем у устройств с амфотерными примесями [19], дегради-

рующих при относительно низких уровнях излучения, что может вызвать серьезные проблемы в случае применения в условиях космоса. На рис. 3 показано сравнение деградации партий светодиодов различных типов и различных производителей, каждая из которых состоит из 30 устройств (F — световой поток, Φ — плотность потока протонов).

Радиационное повреждение в гораздо меньшей степени влияет на фотоотклик кремниевых $p-i-n$ -детекторов, чем обычных $p-n$ -фотодиодов (рис. 4, S — фоточувствительность), поэтому их применение в космической технике является одним из наиболее предпочтительных вариантов. Также в [20] отдельное внимание уделяется фотоприемникам на основе перспективных структур „металл—полупроводник—металл“.

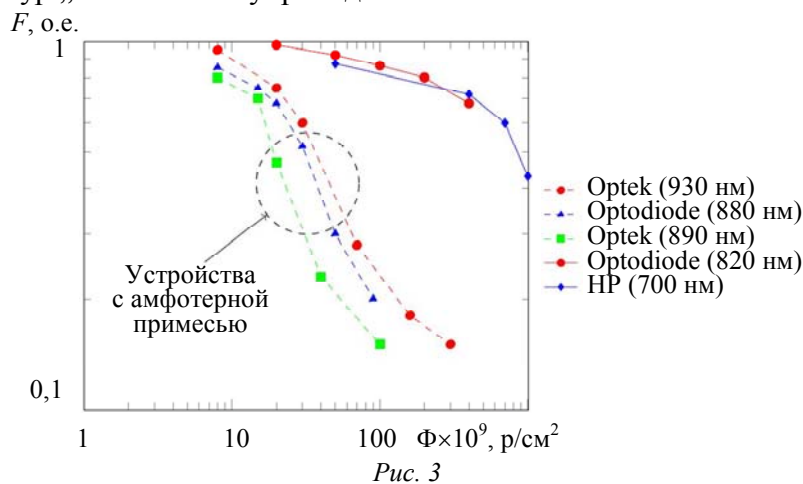


Рис. 3

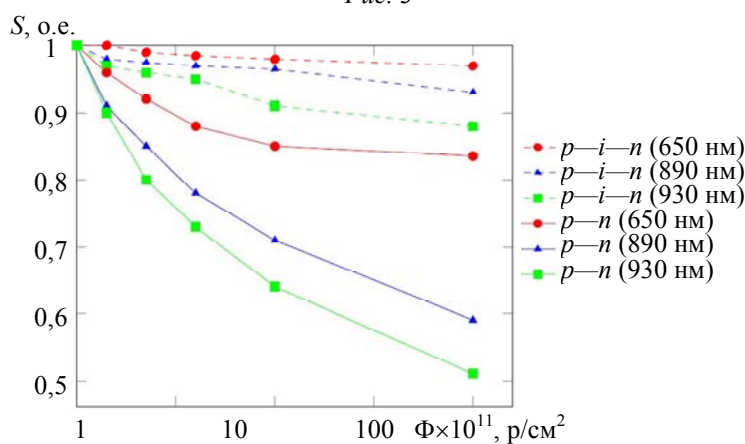


Рис. 4

При условии наличия всей необходимой информации для разработки ФЦПУ разработчик также может столкнуться с отсутствием определенных типов компонентов по функциональным, технологическим или конструктивным параметрам, поскольку вся номенклатура ЭКБ, разрешенная для применения при разработке, модернизации, производстве и эксплуатации изделий с высокими требованиями к надежности, подпадает под действие ограничительных перечней.

Так, например, ФЦПУ производства Codechamp (Франция) FPCOA09-01, упомянутый в Техническом досье Европейского космического агентства [21], при схожих точностных характеристиках ($\pm 40''$ для 16 бит) и области применения с образцами отечественного производства имеет практически в два раза меньшие размеры ($\varnothing 22,5$, h22), в основном за счет применения более совершенных комплектующих, в том числе позволяющих использовать иные конструкторские решения [22]. А при сравнении преобразователей по критерию габаритных размеров, например, с FPCOA23-03 ($\varnothing 57$, h74) превосходит в четыре раза по точности ($\pm 7''$ для 18—19 бит).

Исходя из рассмотренных трудностей и ограничений, связанных с улучшением параметров и характеристик ФЦПУ, можно сделать следующие выводы:

Повышение разрешающей способности ФЦПУ без увеличения их массогабаритных характеристик в большей степени связано с разработкой новых и оптимизацией существующих алгоритмов интерполяции ввиду физических ограничений при изготовлении кодирующих структур.

Уменьшение погрешности преобразователей, вносимой механической частью, должно быть основано на использовании прецизионных деталей в составе оптико-механического блока, изготовленных из сертифицированных высококачественных материалов, и подшипников высокой точности (не ниже 2-го класса), дополнительно подвергнутых процедуре комплекования [23], а также использовании высокоточных измерительных систем на всех стадиях производства.

Также для увеличения точности и уменьшения погрешности следует использовать методы коррекции ошибок значений выходного кода, как единичных случайных, так и носящих периодический характер: в том числе, возможно рассмотреть создание адаптивных систем с самоопределением эксцентриситета [24] и самокалибровкой.

Для улучшения показателей надежности преобразователей (безотказности, долговечности, ремонтпригодности) необходимо обладать исчерпывающей информацией как при формировании технического задания, так и при разработке изделий, которая учитывает все нюансы параметров рабочих режимов, сред и т.п. Не следует всецело руководствоваться результатами расчетных способов получения данных при определении показателей надежности и принимать их достоверность эквивалентной результатам испытаний. Также представляется необходимым рассмотреть возможность применения программных алгоритмов для повышения показателей безотказности и ремонтпригодности.

Уменьшение массогабаритных характеристик ФЦПУ зависит от наличия современной отечественной ЭКБ и устранения отставания в развитии этого направления по определенным позициям, в том числе изделиям оптоэлектроники. Использование в разработке современной ЭКБ также предоставит возможности для применения новых конструктивных решений и развитию других типов преобразователей угловых и линейных перемещений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домрачев В. Г., Мейко Б. С. Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля. М.: Энергоатомиздат, 1984. 328 с.
2. Пат. СССР 1619398. Преобразователь угол-код / И. В. Меськин, Л. Н. Мальцев, Ю. А. Сторожук, А. А. Ожиганов. Заявл. 24.11.1987, опубл. 07.01.1991.
3. Пат. РФ 79360U1. Преобразователь угол-код / А. А. Ожиганов. Заявл. 28.07.2008, опубл. 27.12.2008.
4. Пат. РФ 2553079C1. Инверсно-сопряженная кодовая шкала / К. М. Ростовский, П. А. Прибыткин, А. А. Ожиганов. Заявл. 15.11.2013, опубл. 10.06.2015.
5. Pat. US20190170539. Inductive position detector / M. A. Howard, D. Kreit. Publ. 2019-06-06.
6. Pat. US10823550. Optical position measuring device / K. Sändig, W. Huber. Publ. 2020-11-03.
7. Pat. WO2021116660. Rotary encoder / F. J. Evans, J. R. Henshaw. Publ 2021-06-17.
8. Асиновский Э. Н. и др. Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Под ред. А. А. Ахметжанова. М.: Энергоатомиздат, 1986. 128 с.
9. Riedl M. Optical Design Fundamentals for Infrared Systems. Bellingham, WA: SPIE Press, 2001. 202 p.
10. Renishaw Plc. The accuracy of rotary encoders. 2019 [Электронный ресурс]: <<https://resources.renishaw.com/en/details/white-paper-the-accuracy-of-angle-encoders--113122>>. (дата обращения: 18.08.2021)
11. Востоков С. Б. Интерполяционные цифровые преобразователи угла. Л.: ЦНИИ „Румб“, 1987. 62 с.

12. Volder J. E. The CORDIC trigonometric computing technique // IRE Trans. Electron. Comput. 1959. EC-8, is 3. P. 330—334.
13. Калачев А. В. Быстрая тригонометрия: математический ускоритель CORDIC в микроконтроллерах STM32G4 [Электронный ресурс]: <<https://www.compel.ru/lib/140072>>. (дата обращения: 21.08.2021)
14. STMicroelectronics. Getting started with the CORDIC accelerator using STM32CubeG4 MCU Package [Электронный ресурс]: <<https://www.st.com>>. (дата обращения: 11.08.2021)
15. Smirnov N. V., Latyev S. M., Theska R. Adjustment and evaluation of incremental optical rotary encoders // Shaping the Future by Engineering. 2014. Vol. 58, N 4. P. 4.
16. Celera motion. How does scale eccentricity or bearing runout affect angular error? [Электронный ресурс]: <<https://www.celeramotion.com/microe/support/faqs/how-does-scale-eccentricity-or-bearing-runout-affect-angular-error/>>. (дата обращения: 26.08.2021)
17. NSK Europe Ltd. Bearing life – Calculating the basic fatigue life expectancy of rolling bearings [Электронный ресурс]: <https://www.nskeurope.com/content/dam/nskcmsr/downloads/literature_bearing/P_TI-0102_EN.pdf>. (дата обращения: 22.08.2021)
18. Ожиганов А. А., Прибыткин П. А. Исправление одиночных ошибок в цифровых преобразователях угла на основе рекурсивных шкал // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 7. С. 620—625.
19. Johnston A. Optoelectronic devices with complex failure modes [Электронный ресурс]: <<https://trs.jpl.nasa.gov/handle/2014/15609>>.
20. Marshall C., Marshall P. Proton Effects and Test Issues for Satellite Designers: Displacement Effects [Электронный ресурс]: <<https://ntrs.nasa.gov/citations/19990099117>>. (дата обращения: 19.08.2021)
21. European Space Agency. Position sensor: European space technology harmonization technical dossier, 2009 [Электронный ресурс]: <<https://www.sme4space.org/wp-content/uploads/harmonisationbrochure2016finale1.pdf>>.
22. Pat. US20090084945. Photodiode array for an optical encoder, photodiode detection system, and optical encoder / R. E. Franklin. Publ. 2010-03-16.
23. Королев А. А., Королев А. В., Тюрин А. В., Мухина Е. В. Комплектование шариковых подшипников по критериям минимальной нагрузки на тела качения и требуемой величины зазора. М.: ИНФРА-М, 2021. 248 с.
24. Li X., Ye G., Liu H., Ban Y., Shi Y., Yin L., Lu B. A novel optical rotary encoder with eccentricity self-detection ability // Review of Scientific Instruments. 2017. Vol. 88, N 11. P. 115005.

Сведения об авторе

Сергей Викторович Байденко — АО НИТИ „Авангард“, ведущий инженер; E-mail: thesergio@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.10.2021; одобрена после рецензирования 29.10.2021; принята к публикации 30.12.2021.

REFERENCES

1. Domrachev V.G., Meiko B.S. *Tsifrovyye preobrazovateli ugla: printsipy postroyeniya, teoriya tochnosti, metody kontrolya* (Digital Angle Transducers: Principles of Construction, Theory of Accuracy, Control Methods), Moscow, 1984, 328 p. (in Russ.)
2. Patent USSR 1619398, *Preobrazovatel' ugol-kod* (Angle-Code Converter), I.V. Meskin, L.N. Maltsev, Yu.A. Storozhuk, A.A. Ozhiganov, Priority 24.11.1987, Published 07.01.1991. (in Russ.)
3. Patent RU 79360U1, *Preobrazovatel' ugol-kod* (Angle-Code Converter), A.A. Ozhiganov, Priority 28.07.2008, Published 27.12.2008. (in Russ.)
4. Patent RU 2553079C1, *Inversno-sopryazhennaya kodovaya shkala* (Inverse Conjugate Code Scale), K.M. Rostovskiy, P.A. Pribytkin, A.A. Ozhiganov, Priority 15.11.2013, Published 10.06.2015. (in Russ.)
5. Patent US2019017053, *Inductive position detector*, M.A. Howard, D. Kreit, Published 2019-06-06.
6. Patent US10823550, *Optical position measuring device*, K. Sändig, W. Huber, Published 2020-11-03.
7. Patent WO2021116660, *Rotary encoder*, F.J. Evans, J.R. Henshaw, Published 2021-06-17.
8. Asinovsky E.N. et al. *Vysokotochnyye preobrazovateli uglovykh peremeshcheniy* (High-Precision Angular Displacement Transducers), Moscow, 1986, 128 p. (in Russ.)
9. Riedl M. *Optical Design Fundamentals for Infrared Systems, Second Edition*, Bellingham, WA, SPIE Press, 2001, 202 p.
10. Renishaw Plc. *The accuracy of rotary encoders*, 2019, <https://resources.renishaw.com/en/details/white-paper-the-accuracy-of-angle-encoders-113122>.
11. Vostokov S.B. *Interpolyatsionnyye tsifrovyye preobrazovateli ugla* (Interpolating Angle Digitizers), Leningrad, 1987, 62 p. (in Russ.)
12. Volder J.E. *IRE Trans. Electron. Comput.*, 1959, no. 3(EC-8), pp. 330—334.

13. <https://www.compel.ru/lib/140072>. (in Russ.)
14. STMicroelectronics. *Getting started with the CORDIC accelerator using STM32CubeG4 MCU Package*, <https://www.st.com>.
15. Smirnov N.V., Latyev S.M., Theska R. *Shaping the Future by Engineering*, 2014, no. 4(58), pp. 4.
16. Celeramotion. *How does scale eccentricity or bearing runout affect angular error?* <https://www.celeramotion.com/microe/support/faqs/how-does-scale-eccentricity-or-bearing-runout-affect-angular-error>.
17. NSK Europe Ltd. *Bearing life – Calculating the basic fatigue life expectancy of rolling bearings*, https://www.nsk-europe.com/content/dam/nskcmsr/downloads/literature_bearing/P_TI-0102_EN.pdf.
18. Ozhiganov A.A., Pribytkin P.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 7(63), pp. 620–625. (in Russ.)
19. Johnston A. *Optoelectronic devices with complex failure modes*, <https://trs.jpl.nasa.gov/handle/2014/15609>.
20. Marshall C., Marshall P. *Proton Effects and Test Issues for Satellite Designers: Displacement Effects*, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19990099117>.
21. European Space Agency. *Position sensor: European space technology harmonization technical dossier*, 2009, <https://www.sme4space.org/wp-content/uploads/harmonisationbrochure2016finale1.pdf>.
22. Patent US20090084945, *Photodiode array for an optical encoder, photodiode detection system, and optical encoder*, R.E. Franklin, Published 2010-03-16.
23. Korolev A.A., Korolev A.V., Tyurin A.V., Mukhina E.V. *Komplektovaniye sharikovykh podshipnikov po kriteriyam minimal'noy nagruzki na tela kacheniya i trebuyemoy velichiny zazora* (Completion of Ball Bearings According to the Criteria of the Minimum Load on the Rolling Elements and The Required Clearance), Moscow, 2021, 248 p. (in Russ.)
24. Li X., Ye G., Liu H., Ban Y., Shi Y., Yin L., Lu B. *Review of Scientific Instruments*, 2017, no. (88), pp. (11), p. 115005.

Data on author

Sergey V. Baidenko — SRTI Avangard JSC; Leading Engineer; E-mail: thesergio@yandex.ru

The article was submitted 11.10.2021; approved after reviewing 29.10.2021; accepted for publication 30.12.2021.