

## РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ И ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ОПТИЧЕСКОГО ЭНКОДЕРА НА ЭФФЕКТЕ МУАРА

**В. Д. Забровский, А. Г. Дивин,  
Д. А. Любимова, В. И. Коновалов, Ж. К. Мофу**

*Кафедра «Мехатроника и технологические измерения», miti@tstu.ru;  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** абсолютный оптический энкодер; квазиабсолютное оптический энкодер; фотодатчик; эффект муара.

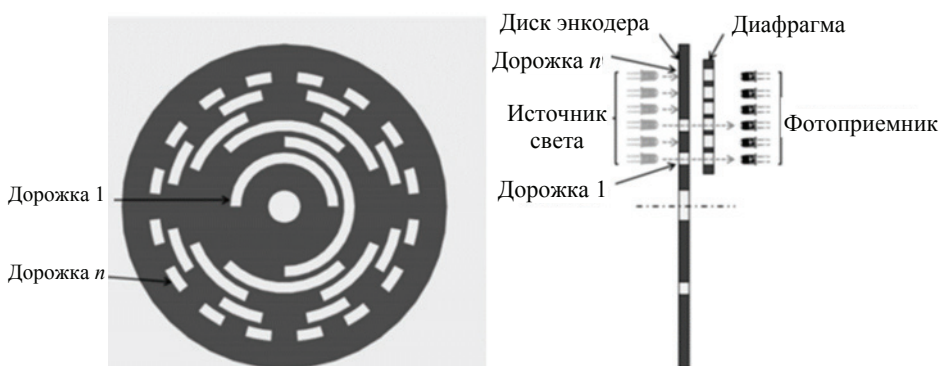
**Аннотация:** Приведены теоретические обоснования возможности создания абсолютного оптического энкодера на эффекте муара, имеющего относительную простоту конструкции и не требующего сложного оборудования для изготовления. Дано описание разработанного опытного образца квазиабсолютного энкодера, на основе которого в дальнейших работах планируется разработать абсолютный энкодер и определить его метрологические характеристики.

---

### Введение

Датчики угла поворота или линейного перемещения (энкодеры) имеют широкое применение в различных областях техники и в первую очередь в мехатронных модулях и агрегатах. Без них невозможно управлять движением рабочего органа робота-манипулятора и других мехатронных систем, так как для решения обратной задачи кинематики необходимо знать в любой момент времени значения обобщенных координат звеньев мехатронных систем, каковыми являются углы поворота и линейные перемещения. Стоимость мехатронных модулей пропорциональна точности используемых в них энкодеров, которая может достигать нескольких сотых и даже тысячных градусов [1]. Однако для многих технологических задач такая точность избыточна, и поэтому в данной статье предложен вариант простого и недорогого оптического энкодера для применения в мехатронных модулях.

Оптические энкодеры по принципу своего действия можно разделить на несколько типов: инкрементальные, абсолютные с кодовым растром, абсолютные и квазиабсолютные на эффекте муара [2]. Инкрементальные энкодеры содержат диск или рейку с оптически прозрачными и непрозрачными областями, светодиод, излучающий свет, проходящий через данные области и фотоприемник, регистрирующий прошедший через них свет [3]. В зарубежной литературе такие энкодеры называются геометрическими [4]. Они применяются в случаях, когда не требуется высокая точность измерения величины угловых или линейных перемещений. Недостаток такого энкодера – относительность его показаний, то есть угол поворота определяется относительно того положения, в котором начал работать энкодер. И это положение каждый раз может быть разным. Данную проблему можно решить, введя дополнительные фотоприемник и метку начального положения. Однако для обнаружения этой метки при включении энкодера потребуются вращать диск (или перемещать рейку) до начального положения, что не всегда



**Рис. 1.** Схематичное изображение диска энкодера с кодовым рисунком [8]

практично. Более высокую точность, близкую к нанометровому диапазону, имеют дифракционные и интерферометрические энкодеры [5, 6], однако они более сложны и имеют высокую стоимость.

Инкрементальный энкодер можно модифицировать таким образом, чтобы сигналы с фотодатчиков были не прямоугольными, а близкими к синусоидальным. Тогда, используя два сигнала (синусный и косинусный) посредством функции арктангенса, можно получить квазиабсолютное угловое положение. Если точность инкрементального энкодера определялась количеством прозрачных областей (прорезей), то в случае модифицированного энкодера точность будет выше, и определяется она, помимо количества прорезей, характеристиками фотоприемников и электронных преобразователей. Но и такой вариант энкодера, по-прежнему, является относительным.

Существуют абсолютные энкодеры, определяющие положение своей подвижной части за счет кодового рисунка (код Грея) [7], в котором закодировано абсолютное положение [8]. Пример такого кода изображен на рис. 1.

Данный энкодер содержит фотоприемник, посредством которого считывается кодовый сигнал. Точность такого энкодера определяется его разрядностью, которая в свою очередь определяется количеством дорожек. Для повышения точности необходимо увеличивать количество кодовых дорожек такого энкодера. А это значит, что в случае компактного диска (или рейки) абсолютного энкодера придется наносить достаточно мелкий кодовый рисунок, который тем меньше, чем выше точность такого энкодера. Для считывания мелкого рисунка нужна соответствующая оптическая система, изготовление которой также может быть не тривиальным. В настоящее время разрешение энкодеров данного типа, имеющих разрядность в 16 бит, может достигать  $0,005^\circ$  [1].

### Концепция квазиабсолютного оптического энкодера

В рамках данной работы предложена концепция квазиабсолютного оптического энкодера (рис. 2), состоящего из трех основных частей: подвижного диска 1 с тремя рядами отверстий, держателей фотодиодов 2 и светодиодов 3. Светодиоды и фотодиоды образуют фотодатчик (оптопару). Число фотодатчиков в данном опытно образце 5 штук.

Общая идея такого энкодера заключается в том, что для каждого ряда отверстий есть несколько оптопар, состоящих из светодиодов 3 и фотосенсоров 2, где последние включены по схеме, показанной на рис. 3 (где  $C_{o.c.}$ ,  $R_{o.c.}$  – емкость и сопротивление обратной связи соответственно,  $V_{\text{вых}}$  – выходное напряжение), и предназначены для формирования периодического электрического сигнала,

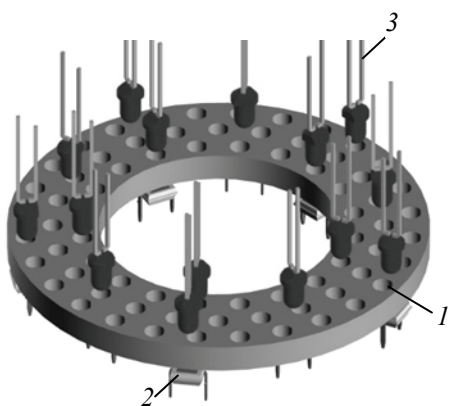


Рис. 2. Концепт оптического энкодера на эффекте муара

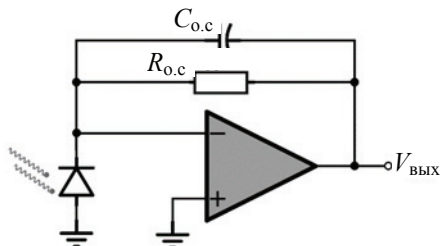


Рис. 3. Схема включения фотодиодов

функционально связанного со значением светового потока, прошедшего через отверстия диска 1.

При вращении диска 1 возникает эффект оптической редукиции, характерный для муаровых преобразователей, когда перемещение подвижного диска на угол  $\alpha = 2\pi/n$  вызывает полный цикл углового перемещения на  $2\pi$  (оптический поворот) максимального сигнала фотодиодов, установленных под диском энкодера равномерно по кругу, с угловым смещением  $\Delta\varphi = 2\pi/N$ , где  $N$  – число фотодиодов,  $n$  – число отверстий в диске.

Таким образом, выходные сигналы фотодиодов внешнего ряда диска 1 (см. рис. 2) будут иметь вид, показанный на рис. 4.

Сигналы с фотодатчиков можно объединить специальным образом, получив при этом синусный  $S(\alpha)$  (1) и косинусный  $C(\alpha)$  (2) сигналы, из которых можно вычислить квазиабсолютное угловое положение  $Y(\alpha)$ :

$$S(\alpha) = \sum_{i=1}^N (\theta_i(\alpha) \sin((i-1)\Delta\varphi)); \quad (1)$$

$$C(\alpha) = \sum_{i=1}^N (\theta_i(\alpha) \cos((i-1)\Delta\varphi)); \quad (2)$$

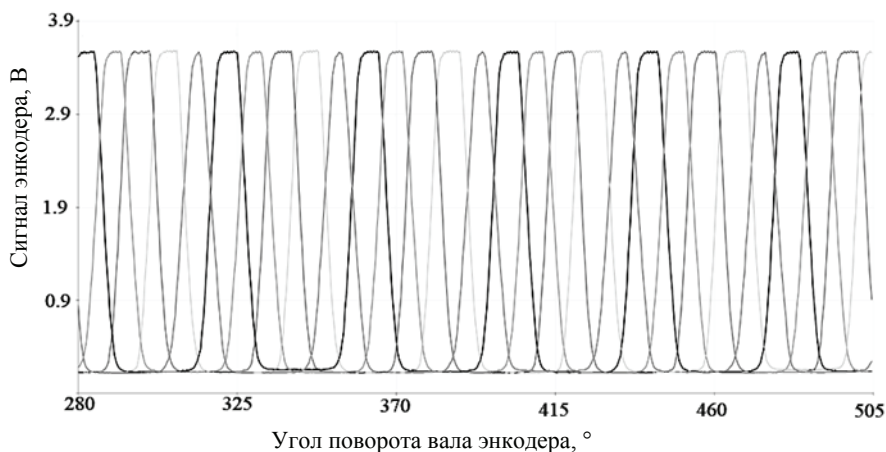


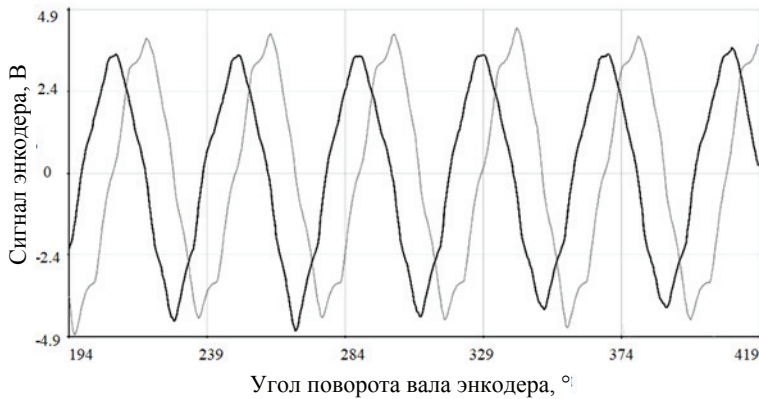
Рис. 4. Экспериментально полученная зависимость сигналов фотодиодов от времени

$$Y(\alpha) = \begin{cases} \left| a \tan 2 \left( \frac{S(\alpha)}{C(\alpha)} \right) + 2\pi, & a \tan 2 \left( \frac{S(\alpha)}{C(\alpha)} \right) < 0; \\ \left| a \tan 2 \left( \frac{S(\alpha)}{C(\alpha)} \right), & a \tan 2 \left( \frac{S(\alpha)}{C(\alpha)} \right) \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

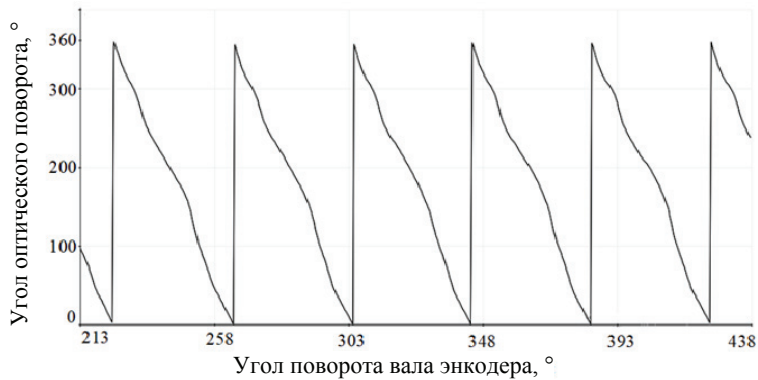
где  $\alpha$  – угол оптического поворота, °;  $\Delta\varphi$  – фазовый сдвиг, рад;  $\theta_i$  – сигнал  $i$ -го фотодиода, В.

На рисунке 5 приведены рассчитанные зависимости для синусного и косинусного сигналов, полученных с применением макета энкодера, с  $n = 9$  и  $N = 5$ .

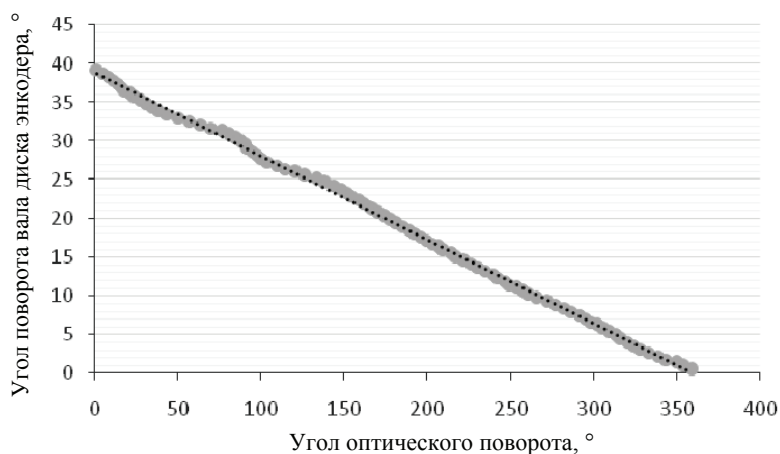
На рисунке 6 показана зависимость  $Y(\alpha)$ , имеющая вид периодического сигнала с  $n$  периодами за полный оборот диска  $l$  (см. рис. 2). Из рисунка 6 очевидно, что одному и тому же показанию энкодера соответствует несколько угловых положений, но определить в каком именно угловом положении находится вал энкодера невозможно. В этом состоит смысл квазиабсолютности – точное положение вала можно определить только в рамках одного периода выходного сигнала квазиабсолютного энкодера. Для получения абсолютного положения необходимо определить, какому именно периоду выходного сигнала соответствует положение вала энкодера. Определить это можно по показанию дополнительного канала квазиабсолютного энкодера, организованного для второго или третьего ряда отверстий подвижного диска (см. рис. 2).



**Рис. 5. Рассчитанные синусные и косинусные сигналы**



**Рис. 6. Зависимость функции  $Y(\alpha)$**



**Рис. 7. Зависимость угла поворота диска энкодера от угла оптического поворота**

Задачей дополнительного канала энкодера является выработка информации, позволяющей определить какому именно периоду основного канала энкодера соответствует реальное угловое положение. При этом необходимо выполнение условия, чтобы каждому угловому положению диска энкодера соответствовала уникальная комбинация из показаний двух его каналов, позволяющая определить номер периода оптического поворота  $n_{\text{изм}}$ . Тогда угловое перемещение выходного вала можно определить по формуле

$$\varphi = (n_{\text{изм}} - 1) \Delta\varphi + Y(\alpha).$$

Таким образом, точность измерения  $\varphi$  определяется погрешностью определения угла поворота  $\varphi$  диска энкодера в пределах  $\Delta\varphi$  по углу  $\alpha$  оптического поворота энкодера. Если зависимость  $\varphi = f(\alpha)$  аппроксимировать линейной зависимостью вида  $\varphi = 0,1084\alpha + 38,881$  (см. рис. 7), то стандартное отклонение результата измерения составит около  $\pm 0,5^\circ$ . Снизить данную погрешность можно увеличением числа отверстий внешнего ряда диска энкодера, оптимизацией конструкции энкодера, применением кусочно-линейной аппроксимации.

### Заключение

В ходе работы предложена общая идея построения абсолютного оптического энкодера на эффекте, аналогичном эффекту муара. Опытный образец созданного квазиабсолютного энкодера показал свою работоспособность. Погрешность измерения положения выходного вала энкодера определяется инструментальной погрешностью, вызванной неточностью изготовления диска и неправильной установкой оптопар. Данная погрешность проявляется в нелинейности характеристики  $Y(\alpha)$ , что в свою очередь определяет ошибку в измерении угла поворота в несколько десятых долей градуса (см. рис. 7). Для повышения точности измерения целесообразно увеличить число отверстий в диске энкодера, а также повысить точность изготовления его деталей.

### Список литературы

1. Принцип работы абсолютного энкодера : MegaSensor. – Текст : электронный. – URL : <https://megasensor.com/products/princip-raboty-absolyutnogo-enskodera> (дата обращения: 03.04.2023).

2. Hagiwara, N. A Method of Improving the Resolution and Accuracy of Rotary Encoders Using a Code Compensation Technique / N. Hagiwara, Y. Suzuki, H. Murase // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 1992. – Vol. 41, No. 1. – doi: 10.1109/19.126640
3. Tarkov V. A. Construction features of positional angle sensors of modern geodesic devices / V. A. Tarkov // *J. Opt. Technol.* – 2011. – Vol. 78, No. 5. – doi: 10.1364/jot.78.000336
4. Incremental Optical Encoder Based on a Sinusoidal Transmissive Pattern / C. H. Lee, H. J. Huang, J. P. Chang, Y. C. Chen // *IEEE Photonics J.* – 2022. – Vol. 14, No. 1. – doi: 10.1109/JPHOT.2021.3129820
5. An Evaluation of a Modulated Laser Encoder / S. Makinouchi, A. Watanabe, M. Takasaki, T. Ohara, J. Ong, S. Wakui // *Precis. Eng.* – 2011. – Vol. 35, No. 2. – doi: 10.1016/j.precisioneng.2010.11.008
6. Diffractive Incremental and Absolute Coding Principle for Optical Rotary Sensors / D. Hopp [et al.] // *Appl. Opt.* – 2011. – Vol. 50, No. 26. – doi: 10.1364/AO.50.005169
7. Absolute Optical Imaging Position Encoder / H. Wang [et al.] // *Meas. J. Int. Meas. Confed.* – 2015. – Vol. 67. – doi: 10.1016/j.measurement.2015.02.028
8. A Novel High-Resolution Optical Encoder with Axially Stacked Coded Disk for Modular Joints: Physical Modeling and Experimental Validation / S. Paul, J. Chang, J. E. Fletcher, S. Mukhopadhyay // *IEEE Sens. J.* – 2018. – Vol. 18, No. 14. – doi: 10.1109/JSEN.2018.2841982

### **Development of a Concept and Proto Sample of an Optical Encoder Based on the Moiré Effect**

**V. D. Zabrovsky, A. G. Divin, D. A. Lyubimova, V. I. Konovalov, J. C. Mofu**

*Department of Mechatronics and Technological Measurements, miti@tstu.ru;  
TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** absolute optical encoder; quasi-absolute optical encoder; photosensor; moiré effect.

**Abstract:** The paper presents the theoretical justification for the possibility of creating an absolute optical encoder based on the moiré effect, which has a relative simplicity of design and does not require complex manufacturing equipment. A description of the developed prototype of a quasi-absolute encoder is given, on the basis of which it is planned to develop an absolute encoder and determine its metrological characteristics.

#### *References*

1. The principle of operation of the absolute encoder: MegaSensor. available at: <https://megasensor.com/products/princip-raboty-absolyutnogo-enskodera> (accessed 04 March 2023).
2. Hagiwara N., Suzuki Y., Murase H. A Method of Improving the Resolution and Accuracy of Rotary Encoders Using a Code Compensation Technique, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1992, vol. 41, no. 1. doi: 10.1109/19.126640
3. Tarkov V.A. Construction features of positional angle sensors of modern geodesic devices, *J. Opt. Technol.*, 2011, vol. 78, no. 5. doi: 10.1364/jot.78.000336
4. Lee C.H., Huang H.J., Chang J.P., Chen Y.C. Incremental Optical Encoder Based on a Sinusoidal Transmissive Pattern, *IEEE Photonics J.*, 2022, vol. 14, no. 1. doi: 10.1109/JPHOT.2021.3129820

5. Makinouchi S., Watanabe A., Takasaki M., Ohara T., Ong J., Wakui S. An evaluation of a modulated laser encoder, *Precis. Eng.*, 2011, vol. 35, no. 2. doi: 10.1016/j.precisioneng.2010.11.008

6. Hopp D. [et al.]. Diffractive incremental and absolute coding principle for optical rotary sensors, *Appl. Opt.*, 2011, vol. 50, no. 26. doi: 10.1364/AO.50.005169

7. Wang H. [et al.]. Absolute optical imaging position encoder, *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 2015, vol. 67. doi: 10.1016/j.measurement.2015.02.028

8. Paul S., Chang J., Fletcher J.E., Mukhopadhyay S. A novel high-resolution optical encoder with axially stacked coded disk for modular joints: Physical modeling and experimental validation, *IEEE Sens. J.*, 2018, vol. 18, no. 14. doi: 10.1109/JSEN.2018.2841982

---

### **Entwicklung des Konzepts und des Prototyps des optischen Encoders auf Basis des Moire-Effektes**

**Zusammenfassung:** Es sind die theoretischen Begründungen für die Möglichkeit der Schaffung eines absoluten optischen Encoders auf Basis des Moire-Effektes vorgestellt, der ein relativ einfaches Design aufweist und keine komplexe Ausrüstung für die Herstellung erfordert. Es ist die Beschreibung des entwickelten Prototyps des Quasi-Absolutwertgebers gegeben, auf dessen Grundlage in zukünftigen Arbeiten die Entwicklung eines absoluten Encoders und die Bestimmung seiner messtechnischen Eigenschaften geplant ist.

---

### **Élaboration du concept et du prototype d'un codeur optique à effet moiré**

**Résumé:** Sont citées les raisons théoriques de la possibilité de créer un codeur optique absolu à effet moiré qui est relativement simple en conception et ne nécessite pas d'équipement complexe pour la fabrication. Est donnée la description du prototype de codeur quasi-absolu à la base de laquelle il est prévu de développer un codeur absolu dans les travaux ultérieurs et de déterminer ses caractéristiques métrologiques.

---

**Авторы:** *Забровский Виктор Дмитриевич* – магистрант; *Дивин Александр Георгиевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Любимова Дарья Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Коновалов Владимир Игоревич* – магистрант; *Мофу Жозель Коко* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.