

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БІЛИЛІВСЬКА ОЛЬГА ПЕТРІВНА

УДК 681.2.08

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОД І БЕЗКОНТАКТНИЙ ЗАСІБ КОНТРОЛЮ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ПРИСТРОЇВ ІЗ
МАГНІТОЧУТЛИВИМИ ТРАНЗИСТОРАМИ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю та
визначення складу речовин
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ О. П. Білилівська

Науковий керівник:

Осадчук Володимир Степанович,
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2018

АНОТАЦІЯ

Білилівська О. П. Метод і безконтактний засіб контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» (Технічні науки). – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2018.

У дисертаційній роботі викладено результати досліджень, які спрямовані на підвищення вірогідності контролю кутових положень шляхом розроблення нового методу і засобу контролю.

Розглянуто питання контролю кутових положень опорно-поворотних пристроїв із врахуванням впливу похибки встановлення кутового положення на точність визначення положення об'єкта радіолокації. З'ясовано, що на сьогодні вірогідність контролю кутових положень опорно-поворотних пристроїв радіолокаційних станцій є низькою, а це обумовлює появу додаткових похибок визначення просторових координат повітряних і наземних об'єктів. Запропоновано класифікацію засобів контролю кутових положень за принципом зчитування, способом отримання інформації, способом кодування, діапазоном вимірюваних кутів та фізичним принципом роботи.

Виявлено, що вимірювання кутового положення опорно-поворотних пристроїв здійснюють засобами на основі потенціометричних сенсорів чи магнітних енкодерів. Встановлено, що потенціометричні прилади контактні і мають великі похибки вимірювання. Разом з тим, основним недоліком фотоелектричних енкодерів, які могли б бути альтернативою в цьому випадку завдяки високій точності, є вплив муфти з'єднання на процес вимірювання (перехідний процес муфти обмежує мінімальне значення вимірюваного кута, а сам спосіб з'єднання не дозволяє встановлювати фотоелектричні прилади у

важкодоступних місцях). Обґрунтовано вибір магнітного класу контрольних вимірювальних методів і засобів, які завдяки безконтактному принципу роботи позбавлені недоліків фотоелектричних енкдерів, але не здатні забезпечити високу вірогідність контролю кутових положень. Проведено огляд гальваномагнітних магніточутливих елементів, який показав, що магніточутливі транзистори мають значно вищу чутливість, ніж інші гальваномагнітні перетворювачі. В результаті аналізу ряду наукових робіт з'ясовано, що підвищити чутливість перетворення і зменшити похибки вимірювання кутових положень можливо шляхом розроблення сенсорів на основі автогенераторних пристроїв.

У результаті математичного моделювання на основі теорії гальваномагнітних методів контролю отримано вирази, які описують просторовий розподіл магнітного поля постійного діаметрально намагніченого магніту й залежність аксіальної складової магнітної індукції від кутового положення досліджуваного об'єкта. Проведено дослідження впливу параметрів постійного магніту та відстані між магнітом і площиною чутливого елемента на складові магнітної індукції. Отримані вирази можуть бути використані для інженерного розрахунку магнітних систем засобів контролю кутових положень.

Для реалізації методу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами запропоновано використати конструкції магнітних систем, що дають можливість компенсувати нелінійний характер залежності магнітної індукції від кутового положення. Обґрунтовано використання опосередкованого методу вимірювання частоти на виходах автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.

Проведено дослідження сенсорів кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, отримано їх функції перетворення та чутливість.

В дисертаційній роботі отримано такі наукові результати:

1. *Вперше запропоновано* метод контролю кутових положень тіл обертання на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими

транзисторами, який відрізняється від відомих безконтактним перетворенням кутового положення в синусний та косинусний частотні сигнали за допомогою автогенераторних пристроїв, у яких магніточутливі транзистори виконують роль і чутливих перетворювачів, і активних елементів, що дозволило підвищити вірогідність контролю кутових положень.

2. *Вперше запропоновано* математичну модель вимірювального перетворення безконтактного засобу контролю кутових положень тіл обертання на основі фізичних процесів, що протікають в автогенераторних пристроях із магніточутливими транзисторами, яка відрізняється від відомих тим, що описує процеси перетворення фізичних величин «кутове положення – магнітна індукція – частота – цифровий код» і є рівнянням перетворення засобу контролю кутових положень.

3. *Теоретично встановлено і експериментально підтверджено* залежності вихідної частоти сенсорів на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами від кутового положення об'єкта (валу обертання), які відрізняються від відомих тим, що магнітна індукція, однозначно пов'язана з кутовим положенням, перетворюється у вихідну частоту автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, що дозволило створити безконтактний засіб контролю кутових положень із підвищеною вірогідністю контролю у порівнянні з іншими магнітними засобами.

У роботі сформульовано рекомендації щодо інженерного проектування безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами. Запропоновано алгоритм контролю кутових положень, який враховує особливості опорно-поворотних пристроїв як об'єкту контролю і дозволяє зробити висновок про відповідність кутового положення заданим допускам при конкретній процедурі контролю, тобто про придатність чи непридатність досліджуваного об'єкту. Здійснено оцінювання статичних характеристик безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами. Виділено основні похибки розробленого засобу контролю.

Запропоновано послідовність калібрувальних операцій для зменшення похибки встановлення і часткової компенсації систематичної похибки засобу контролю кутових положень.

Проведено експериментальні дослідження засобу контролю кутових положень, що підтверджують висунуті теоретичні положення й ефективність запропонованого методу. Шляхом використання критерію серій, що базується на медіані вибірки, і критерію квадратів послідовних різниць проведено перевірку незалежності та стаціонарності ряду спостережень. Підтверджено, що похибка вимірювання кутових положень розподілена за нормальним законом.

Отримано залежність помилок першого і другого роду від середньоквадратичного відхилення похибки вимірювання кутового положення.

Практична цінність роботи полягає в тому, що:

1. Розроблено безконтактний засіб контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, що дозволив підвищити вірогідність контролю.

2. Розроблено сенсори кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із двостоковими і двоколекторними магніточутливими транзисторами, що дозволили підвищити чутливість і зменшити похибку вимірювання кутового положення. Чутливість сенсора кутових положень на основі автогенераторного пристрою із двоколекторним магнітотранзистором складає 462 град^{-1} , що приблизно у 10 разів більше, ніж у відомого магнітного пристрою, а чутливість сенсора із двостоковим магнітотранзистором – $120,2 \text{ град}^{-1}$, (у 2,5 разів більше, ніж у розглянутого енкодера).

3. Розроблено програмне забезпечення для математичного моделювання характеристик сенсорів кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із двостоковими і двоколекторними магніточутливими транзисторами, що може бути використано для інженерного розрахунку функції перетворення та чутливості сенсорів на основі автогенераторних магніточутливих пристроїв.

4. Розроблено схеми електричні принципові та програмне забезпечення безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.

5. Встановлено нормовані значення абсолютної, відносної та зведеної похибок безконтактного засобу контролю кутових положень. Максимальна зведена похибка розробленого засобу складає 0,015%. Розраховано вірогідність контролю кутових положень за допомогою розробленого засобу, що дорівнює 0,98.

Результати роботи впроваджені у Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут «Гелій», а також у навчальний процес кафедри електроніки та наносистем Вінницького національного технічного університету.

Ключові слова: засіб контролю, кутове положення, магніточутливий транзистор, автогенератор, чутливість, мікроконтролер, опорно-поворотний пристрій, вірогідність контролю.

Abstract

Bilylivska O. P. Method and Contactless Instrument for Control of Angular Position based on Self-oscillating Devices with Magnet-sensitive Transistors. – Manuscript copyright.

Candidate of Engineering Science (PhD) thesis in speciality 05.11.13 «Devices and Methods of Control and Determination of Substance Composition» (Technical science). – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsya, 2018.

The thesis presents results of the research on increasing probability of angular position control due to development of new method and instrument for control.

Some features of angular position control of rotary supports have been considered taking into account the effect of the error of angular position adjustment on the radar accuracy. It is revealed that the probability of angular position control of

rotary supports for radar stations is low, which causes additional errors by determining of the spatial coordinates of air and ground objects. A new classification of instruments for angular position control has been proposed. Classification criteria are the output type, the type of contact with the measured medium, measurement range, and physical operating principles.

As founded devices with potentiometric sensors or magnetic encoders are useful for angular position control of rotary support. But potentiometers are contact and have large measurement errors. In this case photoelectric encoders could be an alternative due to the highest accuracy. However, their major disadvantage is the influence of clutch coupling on the measurement process (the transient phenomena of clutch coupling limits the minimum value of the measured angle, and the method of connection does not allow to install photoelectric devices in hard-to-reach places). The choice of magnetic type of the measurement methods and instruments has been explained. Due to the contactless operating principle these instruments do not have such disadvantages as photoelectric encoders, but they can not support high probability of angular position control. A review of galvanomagnetic magnet-sensitive devices has been carried out. It showed that magnet-sensitive transistors have much higher sensitivity than other galvanomagnetic transducers. An analysis of some scientific papers showed that sensors based on self-oscillating devices are capable to enable sensitivity increasing and measurement error reduction.

A mathematical modeling based on the theory of galvanomagnetic methods of control has been fulfilled. Expressions describing the spatial distribution of the magnetic field of the diametrically magnetized permanent magnet and the dependence of axial component of magnetic field induction on the angular position of the object have been derived. The effects of permanent magnet parameters and the distance between magnet and sensor plane on the components of magnetic field induction were investigated. The obtained expressions can be used for engineering calculations of magnetic systems of instruments for angular position control.

Some types of magnetic systems for the method of angular position control based on self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors are proposed. They provide the particular compensation of nonlinear dependence of magnetic field induction on angular position. The application of reciprocal counting method for the digital measurement of the output frequency of sensors based on self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors was justified. A research of angular position sensors based on self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors has been fulfilled. Their conversion function and sensitivity have been derived.

The following new scientific results are obtained in the thesis:

1. The method for angular position control of solids of revolution based on self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors has been *proposed for the first time*. Its major difference from the known methods is contactless conversion of angular position into the sine and cosine frequency signals using self-oscillating devices while magnet-sensitive transistors are sensitive transducers and active elements of the circuit at the same time. The proposed method provides in principle the possibility to increase probability of angular position control.

2. The mathematical model of the measuring transformation of the contactless instrument for angular position control of solids of revolution based on physical processes in self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors has been *proposed for the first time*. This model differ from the known models in that it describe the transformation processes of physical quantities “angular position – magnetic field induction – frequency – digital value” and is a conversion function of the instrument for control of angular position.

3. The dependence of output frequency of sensors based on self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors on angular position of the object (rotation shaft) has been theoretically *established* and experimentally *confirmed*. Obtained equations differ from existing, because magnetic field induction uniquely related to the angular position of the object transforms into output frequencies of self-

oscillating devices with magnet-sensitive transistors, which enabled to make a contactless instrument for control of angular position with increased probability of control compared to other magnetic instruments.

Recommendations for engineering design of contactless instruments for angular position control based on self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors have been formulated. A procedure of angular position control was described, which takes into account the features of rotary supports as a controlling object. This allows deciding whether a measured angular position is in or out of specification tolerance by controlling process (a controlling object is in or out of control).

The static metrological characteristics of measuring channel of instrument for angular position control based on self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors were estimated. Basic errors of the control device have been detected.

The sequence of calibration operations to reduce installation errors and to compensate partial systemic error of instrument for angular position control has been proposed.

The results of an experimental research of instrument for angular position control support theoretical expectations and confirm efficiency of the proposed method. By using a series criterion based on the sample median and square successive difference criterion independence and stationarity of the statistical series of measuring values. It was confirmed, that the law of distributing of measurement error is normal.

The dependence of Type I and Type II errors on the standard deviation of the measurement error of angular position have been estimated.

The practical value of the paper is following:

1. A contactless instrument for control of angular position based on self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors has been developed, which makes it possible to increase the probability of angular position control.

2. Angular position sensors based on self-oscillating devices with dual-drain and dual-collector magnet-sensitive transistors have been developed, which enabled sensitivity increasing and angle measurement error reduction. The sensitivity of angular position sensors based on self-oscillating devices with dual-collector magnet-sensitive bipolar transistors is $462 \text{ LSB}/^\circ$, which is about 10 times greater than that of a known magnetic device, and the sensitivity of the sensor with dual-drain magnetic field effect transistors is $120.2 \text{ LSB}/^\circ$ (2.5 times more than that of the considered encoder).

3. Software for mathematical modeling of angular position sensors based on self-oscillating devices with dual-drain and dual-collector magnet-sensitive transistors have been developed. It can be used for calculation of conversion function and sensitivity of sensors based on self-oscillating magnet-sensitive devices.

4. Circuit diagrams and software for a practical implementation of the instrument for angular position control based on self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors have been developed.

5. Normalized values of absolute, relative and conventional errors of instrument for angular position control based on self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors have been evaluated. The conventional error of the developed device does not exceed 0.015%. It was calculated that the probability of controlling angular position by the developed instrument is 0.98.

The results of the dissertation work have been implemented at the State Enterprise “Research Institute “HELIUM” and into the educational process of the Department of Electronics and Nanosystems of Vinnytsia National Technical University.

Keywords: control device, angular position, magnet-sensitive transistor, self-oscillator, sensitivity, microcontroller, rotary support, probability of control.

Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та О. М. Жагловська, «Огляд гальваномагнітних вимірювачів параметрів магнітного поля», *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Автоматика та приладобудування*, № 8 (982), с. 76–83, 2013.

Автором проведено порівняння та вибір гальваномагнітних вимірювачів параметрів магнітного поля.

2. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стівбчата, «Дослідження параметрів магніточутливого симістора», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 100–103, 2010.

Автором удосконалена математична модель магніточутливого симістора.

3. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стівбчата, та В. В. Мартинюк, «Дослідження повного опору магніточутливого тиристора», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 1, с. 107–110, 2011.

Автором удосконалена математична модель магніточутливого тиристора.

4. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стівбчата, та В. В. Мартинюк, «Мікроелектронний перетворювач магнітної індукції з частотним виходом», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 157–163, 2011.

Автором проведено дослідження залежності повного опору мікроелектронного перетворювача від магнітної індукції.

5. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Вольт-амперна характеристика перетворювача магнітного поля з частотним виходом», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 96–101, 2011.

Автором запропонована еквівалентна двоколекторного магніотранзистора.

6. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Перетворювач магнітного поля з частотним виходом», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 5, с. 149–154, 2011.

Автором розроблена математична модель перетворювача магнітного поля з частотним виходом.

7. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Аналіз конструкцій та класифікація польових магніточутливих елементів», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 3, с. 75–79, 2012.

Автором розроблена класифікація польових магніточутливих елементів.

8. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, та О. П. Білилівська, «Мікроелектронний перетворювач магнітного поля з частотним виходом з магніточутливим елементом Холла», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 1, с. 96–103, 2013.

Автором отримані аналітичні вирази залежності повного опору мікроелектронного перетворювача магнітного поля з елементом Холла від магнітної індукції.

9. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Моделювання статичних характеристик двостокового магніточутливого МОН-транзистора», *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, № 4 (81), с. 64–68, 2013.

Автором виконано дослідження статичних характеристик двостокового магніточутливого МОН-транзистора.

10. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Прилад контролю кутових положень з використанням автогенераторних магніточутливих пристроїв», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 5 (217), с. 110–114, 2014.

Автором розроблена структурна та програмна реалізація приладу контролю кутових положень.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

11. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, та О. П. Стівбчата, «Огляд магнітних сенсорів на основі магнітодіодного ефекту», на *VII междунар. практ. конф. «Бъдещитe изследвания – 2011»*, София, т. 15, с. 28–32.

Автором виконано огляд магнітодіодів, виготовлених на основі гетеропереходів.

12. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, та О. П. Стівбчата, «Сенсори магнітного поля на основі біполярних транзисторів», на *VII mezinár. ved.-prakt. konf. «Vêda a technológic: krok do budoucnosti – 2011»*, Praha, díl 17, s. 54–60.

Автором проведено аналіз структур біполярних магніточутливих транзисторів.

13. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, та О. П. Стівбчата, «Сенсори магнітного поля на основі польових транзисторів», на *VII Międzynar. nauk.-prakt. konf. «Naukowa myśl informacyjnej powieki – 2011»*, Przemysł, vol. 15, s. 38–42.

Автором розглянуті схеми сенсора для вимірювання магнітного поля на основі польового транзистора.

14. В. С. Осадчук та О. П. Білилівська, «Частотний перетворювач магнітного поля на основі біполярного двоколекторного магніточутливого транзистора та елемента Холла», на *I Міжнар. наук. конф. пам'яті проф. Володимира Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах»*, Вінниця, 2011, с. 71.

Автором досліджені характеристик частотного перетворювача магнітного поля.

15. В. С. Осадчук та О. П. Білилівська, «Математична модель двостокового магніточутливого МОН-транзистора», на *II Міжнар. наук. конф. пам'яті проф. Володимира Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах»*, Вінниця, 2013, с. 240.

Автором розроблена математична модель статичних характеристик двостокового магніточутливого МОН-транзистора

16. В. С. Осадчук та О. П. Білилівська, «Прилад контролю кутових положень на основі багатоелектродних магніточутливих транзисторів», на *XII Міжнар. конф. «Контроль і управління в складних системах»*, Вінниця, 2014, с. 61.

Автором запропонований метод контролю кутових положень і структура приладу на основі магніточутливих транзисторів

17. О. П. Білилівська, «Магнітний прилад позиційного контролю з частотним виходом», на *XVI Міждунар. молодіж. форумі «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке»*, Харків, 2012, т.1, с. 55–56.

Автором розроблена структура приладу позиційного контролю з частотним виходом.

18. О. П. Білилівська, «Частотний прилад контролю параметрів магнітного поля», на *8-ій міжнар. молодіж. наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій»*, Севастополь, 2012, с. 293.

Автором запропоновані схемотехнічні рішення для підвищення чутливості частотного приладу контролю.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

19. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стовбчата, «Мікроелектронний пристрій для виміру магнітної індукції», Патент України 59007, Квіт. 26, 2011.

Автором досліджено вплив елемента Холла на роботу пристрою.

20. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стовбчата, «Вимірювач магнітної індукції», Патент України 61609, Лип. 25, 2011.

Автором проведене моделювання вимірювача магнітної індукції.

21. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Мікроелектронний вимірювач магнітної індукції», Патент України 70192, Трав. 25, 2012.

Автором проведене дослідження чутливості мікроелектронного вимірювача магнітної індукції.

22. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. А. Ющенко, та О. П. Білилівська, «Вимірювач магнітної індукції з активним індуктивним елементом», Патент України 70967, Черв. 25, 2012.

Автором проведений розрахунок параметрів активного індуктивного елемента.

23. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, «Мікроелектронний пристрій для вимірювання магнітної індукції з активним індуктивним елементом», Патент України 105402, Трав. 12, 2014.

Автором проведений розрахунок параметрів активного індуктивного елемента.

24. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, «Мікроелектронний пристрій для вимірювання магнітної індукції з частотним виходом», Патент України 105400, Трав. 12, 2014.

Автором виконана програмна перевірка функціонування мікроелектронного пристрою для вимірювання магнітної індукції з частотним виходом.

25. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, «Мікроелектронний пристрій для вимірювання магнітної індукції», Патент України 105401, Трав. 12, 2014.

Автором виконана програмна перевірка функціонування мікроелектронного пристрою для вимірювання магнітної індукції.

26. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Спосіб визначення кутових положень з використанням автогенераторних магніточутливих пристроїв», Патент України 97242, Берез. 10, 2015.

Автором запропонований алгоритм вимірювання кутових положень.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ	30
Особливості об’єкта контролю	30
Загальна характеристика методів і засобів контролю куткових положень.....	34
Механічні та потенціометричні енкодери	36
Електромагнітний контроль куткових положень	37
Ємнісні енкодери.....	38
Фотоелектричні енкодери.....	38
Магнітні методи та засоби контролю куткових положень	40
Огляд магніточутливих пристроїв для контролю куткових положень.....	41
Магніторезистивні прилади	42
Сенсори Холла.....	43
Магнітодіодні прилади	44
Біполярні магнітотранзистори	45
Польові магніточутливі елементи	46
Порівняння гальваномагнітних приладів	49
Автогенераторні магніточутливі пристрої для побудови засобів контролю куткових положень.....	51
Висновки до розділу 1 і формулювання завдань дослідження.....	53
РОЗДІЛ 2 МЕТОД КОНТРОЛЮ КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ПРИСТРОЇВ ІЗ МАГНІТОЧУТЛИВИМИ ТРАНЗИСТОРАМИ	56
Теоретичні основи гальваномагнітних методів контролю кута повороту	56
.....М	
одельовання розподілу магнітного поля постійного магніту з діаметральним намагніченням.....	57

Аналіз систем розташування чутливих елементів.....	17
Розроблення методу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.....	66
Висновки до розділу 2.....	71
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ СЕНСОРІВ КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ПРИСТРОЇВ ІЗ МАГНІТОЧУТЛИВИМИ ТРАНЗИСТОРАМИ.....	76
Магнітореактивний ефект у двостокових та двоколекторних магніточутливих транзисторах	77
Математична модель автогенераторного пристрою із двостоковим МОН-магнітотранзистором.....	78
Математична модель автогенераторного пристрою із двоколекторним магнітотранзистором.....	88
Функція перетворення та чутливість сенсорів кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.....	97
Висновки до розділу 3.....	104
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ПРИСТРОЇВ ІЗ МАГНІТОЧУТЛИВИМИ ТРАНЗИСТОРАМИ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЙОГО МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	110
Розроблення структури засобу контролю кутових положень	112
Схемотехнічна та програмна реалізація засобу контролю кутових положень	112
Оцінювання метрологічних характеристик засобу контролю кутових положень	115
Статичні характеристики засобу контролю кутових положень	122
Оцінювання похибок засобу контролю кутових положень	123
Рекомендації щодо інженерного проектування безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.....	130
Алгоритм контролю кутових положень.....	140
	141

Експериментальні дослідження засобу контролю кутових положень	18
Вірогідність контролю	145
Висновки до розділу 4.....	151
Висновки до розділу 4.....	157
ВИСНОВКИ.....	158
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	161
ДОДАТКИ.....	175
Додаток А Класифікація польових магніточутливих елементів	176
Додаток Б Отримання виразів для моделювання розподілу поля діаметрально намагніченого постійного магніту.....	177
Додаток В Перетворені еквівалентні схеми магніточутливих транзисторів ...	182
Додаток Г Результати дослідження автогенераторного пристрою із двостоковим МОН-магнітотранзистором.....	183
Додаток Д Результати дослідження автогенераторного пристрою із двоколекторним магнітотранзистором	188
Додаток Е Фрагменти лістингів програм для розрахунку параметрів автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.....	193
Додаток Ж Електрична принципова схема безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.....	204
Додаток И Фрагменти програмного забезпечення для мікроконтролера у складі безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.....	205
Додаток К Статистична обробка результатів експериментальних досліджень.....	211
Додаток Л Лістинг програми розрахунку показників вірогідності засобу контролю кутових положень.....	213
Додаток М Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	215
Додаток Н Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію матеріалів дисертації.....	217

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

LSB – *Least Significant Bit* (одиниця молодшого розряду);

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ГМР – гальваноманіторекомбінаційний;

ДКМТ – двоколекторний магнітотранзистор;

ЕРС – електрорушійна сила;

КНІ – «кремній на ізоляторі»;

МДН – метал-діелектрик-напівпровідник;

МОН – метал-оксид-напівпровідник;

ОПП – опорно-поворотний пристрій;

ПЕХ – польовий елемент Холла;

ПК – персональний комп'ютер;

РЛС – радіолокаційна станція;

СКВ – середньоквадратичне відхилення.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Кутові положення підлягають контролю в багатьох галузях промисловості: в металообробці, ліфтовій техніці, фасувальних, пакувальних і розливних автоматах, у друкарській промисловості, випробувальних стендах, а також у роботах та інших машинах, що потребують точного визначення показників руху обертових частин. Засоби вимірювання та контролю кутових положень використовуються для забезпечення зворотного зв'язку між поворотними та статичними елементами сучасних систем точного переміщення, зокрема, в опорно-поворотних пристроях (ОПП). Для таких засобів важливими є не лише висока роздільна здатність і точність, а й діапазон вимірювання, повторюваність позиціювання, низька інерційність, надійність та зручність монтажу.

На сьогодні вірогідність контролю кутових положень опорно-поворотних пристроїв радіолокаційних станцій (РЛС) є низькою, що обумовлює появу додаткових похибок визначення просторових координат повітряних і наземних об'єктів. Тому існує потреба пошуку нових способів зменшення частоти появи помилок у процесі контролю кутових положень.

Більшість поворотних механізмів містять недорогі та прості за своєю конструкцією потенціометричні сенсори, які не забезпечують високу точність вимірювань кутових положень. Серед промислових засобів контролю кутів найвищу точність мають фотоелектричні енкодери. Але їх основним недоліком є наявність механічного контакту сенсора й об'єкта, що обертається. Жорсткість з'єднання між контрольованим елементом (валом) та валом сенсора, а також власна частота коливання з'єднання обмежують смугу пропускання приладу і найменше значення вимірюваного кута [1]. Крім того, використання контактних пристроїв часто неможливе через конструктивні обмеження об'єкта контролю.

Зазначених недоліків позбавлені безконтактні сенсори. Зокрема, протягом останніх років інтерес користувачів викликають магнітні прилади, оскільки їх швидкодія, термін служби і максимальна кількість циклів переміщення є набагато вищими. Магнітні вимірювання забезпечують безконтактне перетворення малих значень фізичних величин в електричні сигнали, можливість безконтактної комутації та повної електричної розв'язки вхідних і вихідних кіл апаратури, стійкість роботи приладів у газоподібних, рідких, агресивних, токсичних, а також забруднених і в'язких середовищах. Крім того, чутливі елементи можуть бути встановлені таким чином, щоб сторонні магнітні поля входили до просторової складової магнітного поля, яка не вимірюється (для елементів Холла, наприклад, це паралельна складова) [2].

На ринку сенсорної техніки представлені засоби контролю кутових положень різних типів та конструкцій, проте важливу роль у цій галузі відіграють гальваноманітні сенсори, тому що вони мають невеликі габарити, низьку ціну, споживають малу потужність та прості в експлуатації [3].

Серед зарубіжних фірм, що займаються розробленням та промисловим застосуванням засобів контролю кутових положень, слід виділити «Honeywell» (США), «Analog Devices» (США), «Freescale Semiconductor» (США), «NXP Semiconductors» (Нідерланди), «Infineon Technologies» (ФРН), «Siemens» (ФРН), «Avago Technologies» (Сінгапур), «Alps Electric» (Японія), «Murata Electronics» (Японія), «Multi Dimension Technology» (Китай), «Renishaw» (Великобританія), «Ams» (Австрія), «Melexis» (Бельгія), Micronas (Швейцарія) та ін., а серед вчених – Хомерікі О. К. [4], Бутурліна А. І., Аша Ж., Віглеба Г., Егіазаряна Г. А. [5], Новицького П. В., Кремлівського П. П., Стафеева В. І. [5]–[7]. Україна також займає далеко не останню позицію з розроблення та застосування сенсорів фізичних величин, насамперед завдяки роботам відомих українських науковців Вікуліна І. М. [6]–[8], Готри З. Ю. [9], Глаубермана М. А., Голяки Р. Л., Кошового М. Д., Костенка В. Л., Поджаренка В. О., Кухарчука В. В. [10], [11], Осадчука В. С. та

Осадчука О. В. [12]–[18], Кучерука В. Ю., Кулакова П. І., Романова В. О., Яненко О. П., Якименка Ю. І., Скрипника Ю. О. та інших.

Відомо велику кількість методів контролю кутових положень з використанням зміни значення просторових складових вектора індукції магнітного поля, створеного рухомим магнітом. Однак сенсори, які використовуються на сьогодні для діагностики технічного стану об'єктів, мають низьку чутливість і роздільну здатність, обмежений кутовий діапазон, результат вимірювань суттєво залежить від температури [19]. А прецизійні прилади через високу вартість можуть використовуватись тільки в лабораторних умовах і відповідальних промислових комплексах, які менш чутливі до ціни їх комплектуючих.

Перспективним напрямком в області контролю кутових положень є використання фізичних явищ, що виникають у напівпровідниках при одночасній дії електричних і магнітних полів, для побудови засобів на основі багатоклекторних та багатостокових транзисторів. Протягом останніх десятиліть вітчизняними й зарубіжними науковцями представлені різні види реалізації магніточутливих транзисторів, проведені їх експериментальні дослідження, описані основні принципи роботи таких приладів [20]–[24]. Однак математичні моделі як польових, так і біполярних магнітотранзисторів розроблені недостатньо, що значно ускладнює процес проектування та пошук методів підвищення вірогідності засобів контролю на їх основі. Крім того, аналіз ряду наукових робіт [12]–[18], [25]–[28] показує, що використання транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором та реактивних властивостей напівпровідникових приладів дозволяє підвищити чутливість перетворення і зменшити похибки вимірювання фізичних величин. При цьому з'являється можливість відмовитись від введення до складу систем контролю аналогово-цифрових перетворювачів та підсилювальної апаратури. Але постає проблема відсутності ґрунтовних досліджень реактивних властивостей багатоклекторних і багатостокових магніточутливих транзисторів.

Тому формування теоретичної бази методу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, а також розроблення схем і конструкцій, їх експериментальне дослідження їх параметрів, розроблення безконтактного засобу контролю кутових положень та впровадження його у виробництво є актуальними науково-прикладними завданнями.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалась згідно з госпдоговірними та держбюджетними науково-дослідними роботами: 32-Д-316 «Розробка математичних моделей мікроелектронних частотних перетворювачів магнітного поля на основі транзисторних структур з від'ємним опором» (2010–2012 р.р.), номер державної реєстрації 0110U002160; 32-Д-348 «Розробка радіовимірювальних перетворювачів температури на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур» (2013–2014 р.р.), номер державної реєстрації 0113U002287С; 32-Д-354 «Розробка радіовимірювальних пристроїв на основі транзисторних структур з від'ємним опором» (2013–2014 р.р.), номер державної реєстрації 0113U003133.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є підвищення вірогідності контролю кутових положень за рахунок методу безконтактного перетворення кутового положення в синусний та косинусний частотні сигнали за допомогою автогенераторних пристроїв, у яких магніточутливі транзистори виконують роль і чутливих перетворювачів, і активних елементів.

Об'єктом дослідження є процес вимірювального контролю кутових положень.

Предметом дослідження є метод та безконтактний засіб контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно виконати такі *завдання*:

1) провести аналіз методів і засобів контролю кутових положень та обґрунтувати переваги засобів на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами у порівнянні з аналогами (враховуючи властивості об'єкта контролю);

2) розробити метод контролю кутових положень, який базується на безконтактному перетворенні кутового положення в синусний та косинусний частотні сигнали за допомогою автогенераторних пристроїв, у яких магніточутливі транзистори виконують роль і чутливих перетворювачів, і активних елементів; розробити структурну схему методу;

3) розробити сенсори кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, які б забезпечили перетворення індукції магнітного поля, пов'язаного із кутовим положенням об'єкта, у частотні сигнали з високою чутливістю, для реалізації методу та засобу контролю кутових положень; провести моделювання характеристик сенсорів кутових положень на основі автогенераторних пристроїв для визначення залежності частотних сигналів від кутового положення;

4) розробити безконтактний засіб контролю кутових положень та математичну модель вимірювального перетворення, яка б дозволила отримати функціональну залежність між вхідними та вихідними величинами;

5) провести експериментальні дослідження сенсорів кутових положень і засобу контролю кутових положень для перевірки розроблених математичних моделей;

б) здійснити оцінювання метрологічних характеристик та пронормувати похибки розробленого засобу контролю кутових положень.

Методи дослідження

Методи дослідження базуються на використанні рівнянь математичної фізики при аналізі розподілу магнітного поля постійного магніту та

розробленні математичних моделей автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами і засобу контролю кутових положень на їх основі; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл з використанням методу вузлових потенціалів для визначення повного опору магніточутливих транзисторів та автогенераторних пристроїв; основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функцій перетворення та рівнянь чутливості автогенераторних пристроїв; теорії вимірювань і похибок для оцінювання метрологічних характеристик запропонованого засобу контролю кутових положень; теорії планування експерименту та комп'ютерного моделювання для експериментальної перевірки отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих результатів

В дисертаційній роботі отримано такі наукові результати:

1. Вперше запропоновано метод контролю кутових положень тіл обертання на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, який відрізняється від відомих безконтактним перетворенням кутового положення в синусний та косинусний частотні сигнали за допомогою автогенераторних пристроїв, у яких магніточутливі транзистори виконують роль і чутливих перетворювачів, і активних елементів, що дозволило підвищити вірогідність контролю кутових положень.

2. Вперше запропоновано математичну модель вимірювального перетворення безконтактного засобу контролю кутових положень тіл обертання на основі фізичних процесів, що протікають в автогенераторних пристроях із магніточутливими транзисторами, яка відрізняється від відомих тим, що описує процеси перетворення фізичних величин «кутове положення – магнітна індукція – частота – цифровий код» і є рівнянням перетворення засобу контролю кутових положень.

3. Теоретично встановлено і експериментально підтверджено залежності вихідної частоти сенсорів на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами від кутового положення об'єкта (валу обертання), які відрізняються від відомих тим, що магнітна індукція,

однозначно пов'язана з кутовим положенням, перетворюється у вихідну частоту автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, що дозволило створити безконтактний засіб контролю кутових положень із підвищеною вірогідністю контролю у порівнянні з іншими магнітними засобами.

Практичне значення отриманих результатів

Практична цінність роботи полягає в тому, що:

1. Розроблено безконтактний засіб контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, що дозволив підвищити вірогідність контролю.

2. Розроблено сенсори кутових положень на основі автогенераторних пристроїв з двостоковими і двоколекторними магніточутливими транзисторами, що дозволили підвищити чутливість і зменшити похибку вимірювання кутового положення. Чутливість сенсора кутових положень на основі автогенераторного пристрою із двоколекторним магнітотранзистором складає 462 град^{-1} , що приблизно у 10 разів більше, ніж у відомого магнітного пристрою, а чутливість сенсора із двостоковим магнітотранзистором – $120,2 \text{ град}^{-1}$, (у 2,5 разів більше, ніж у розглянутого енкодера).

3. Розроблено програмне забезпечення для математичного моделювання характеристик сенсорів кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із двостоковими і двоколекторними магніточутливими транзисторами, що може бути використано для інженерного розрахунку функції перетворення та чутливості сенсорів на основі автогенераторних магніточутливих пристроїв.

4. Розроблено схеми електричні принципів та програмне забезпечення безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.

5. Встановлено нормовані значення абсолютної, відносної та зведеної похибок безконтактного засобу контролю кутових положень. Максимальна зведена похибка розробленого засобу складає 0,015%. Розраховано вірогідність

контролю кутових положень за допомогою розробленого засобу, що дорівнює 0,98.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи впроваджено у Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут «Гелій» (м. Вінниця, акт від 13 вересня 2016 р.) у вигляді методу та засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, а також у навчальний процес кафедри електроніки та наносистем Вінницького національного технічного університету при вивченні дисциплін «Електронні сенсори», «Прилади з від'ємним опором», «Електронні сенсори та перетворювальні прилади» для студентів спеціальностей 6.050801 – «Мікро- та наноелектроніка», 6.050802 – «Електронні пристрої та системи» (акт від 15 вересня 2016 р.).

Особистий внесок здобувача

Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно у Вінницькому національному технічному університеті. В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: [3] – порівняння та вибір гальваномагнітних вимірювачів параметрів магнітного поля; [29] – удосконалена математична модель магніточутливого симістора; [30] – удосконалена математична модель магніточутливого тиристора; [31] – дослідження залежності повного опору мікроелектронного перетворювача від магнітної індукції; [32] – еквівалентна схема двоколекторного магнітотранзистора; [33] – математична модель перетворювача магнітного поля з частотним виходом; [34] – розроблення класифікації польових магніточутливих елементів; [35] – аналітичні вирази залежності повного опору мікроелектронного перетворювача магнітного поля з елементом Холла від магнітної індукції; [36] – дослідження статичних характеристик двостокового магніточутливого МОН-транзистора; [37] – структурна та програмна реалізація приладу контролю кутових положень; [38] – огляд магнітодіодів, виготовлених на основі гетеропереходів; [39] – аналіз структур біполярних магніточутливих

транзисторів; [40] – розгляд схеми сенсора для вимірювання магнітного поля на основі польового транзистора; [41] – дослідження характеристик частотного перетворювача магнітного поля; [42] – математична модель статичних характеристик двостокового магніточутливого МОН-транзистора; [43] – метод контролю кутових положень і структура приладу на основі магніточутливих транзисторів; [46] – дослідження впливу елемента Холла на роботу пристрою; [47] – моделювання вимірювача магнітної індукції; [48] – дослідження чутливості пристроїв; [49], [50] – розрахунок параметрів активного індуктивного елемента; [51], [52] – програмна перевірка функціонування пристроїв; [53] – алгоритм вимірювання кутових положень.

Апробація матеріалів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи було апробовано на науково-технічних конференціях:

1. VII Міжнародна практична конференція «Бъдещите изследвания – 2011», м. Софія, 2011 [38].
2. VII Міжнародна науково-практична конференція «Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2011», м. Прага, 2011 [39].
3. VII Міжнародна науково-практична конференція «Naukowa myśl informacyjnej powieki – 2011», м. Перемишль, 2011 [40].
4. I Міжнародна наукова конференція пам'яті професора Володимира Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС – 2011), м. Вінниця, 18–20.10.2011 [41].
5. II Міжнародна наукова конференція пам'яті професора Володимира Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС – 2013), м. Вінниця, 29–30.10.2013 [42].
6. XII Міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах» (КУСС – 2014), м. Вінниця, 14–16.10.2014 [43].
7. XVI Міжнародний молодіжний форум «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке», м. Харків, 17–19.04.2012 [44].

8. 8-а Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій» (РТ – 2012), м. Севастополь, 23–27.04.2012 [45].

Публікації

Результати теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано у 26 наукових працях. Серед них 10 статей у фахових виданнях зі списку ВАК України (3 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних), 3 статті у матеріалах конференцій, 5 тез доповідей, отримано 5 патентів України на корисні моделі та 3 патенти України на винаходи.

Обсяг і структура дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 12 додатків. Загальний обсяг дисертації – 220 сторінок, з яких основний зміст викладений на 145 сторінках друкованого тексту, містить 57 рисунків, 3 таблиці. Список використаних джерел складається зі 141 найменування. Додатки містять додаткові результати розрахунків та моделювання, схеми, фрагменти програмного забезпечення, таблиці, акти впровадження результатів роботи, список публікацій за темою дисертації.

Автор вдячний д. т. н., професору Осадчуку О. В. за консультації під час виконання дисертаційної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] T. Wyatt. (2011, July). What to Consider When Choosing a Rotary Encoder [Online]. Available: http://www.heidenhain.com/fileadmin/redakteure/com/Automation_Newsletter_July2011_01.pdf. [Accessed June 10, 2014].
- [2] E. Eitel. (2014, May 7). Basics of rotary encoders: overview and new technologies [Online]. Available: <http://machinedesign.com/sensors/basics-rotary-encoders-overview-and-new-technologies-0>. [Accessed June 10, 2014].
- [3] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та О. М. Жагловська, «Огляд гальваномагнітних вимірювачів параметрів магнітного поля», *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Автоматика та приладобудування, № 8 (982), с. 76–83, 2013.
- [4] О. К. Хомерики, *Применение гальваномагнитных датчиков в устройствах автоматизации и измерений*. Москва, СССР: Энергия, 1971.
- [5] Г. А. Егiazарян и В. И. Стафеев, *Магнитодиоды, магниторезисторы и их применение*. Москва, СССР: Радио и связь, 1987.
- [6] И. М. Викулин и В. И. Стафеев, *Полупроводниковые датчики*. Москва, СССР: Советское радио, 1975.
- [7] И. М. Викулин и В. И. Стафеев, *Физика полупроводниковых приборов*. Москва, СССР: Советское радио, 1980.
- [8] И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, и В. И. Стафеев, «Магниточувствительные транзисторы», *Физика и техника полупроводников*, т. 35, №1, с. 3–10, 2001.
- [9] В. Вуйцік, З. Ю. Готра, В. В. Григор'єв, В. Каліта, О. М. Мельник, та Є. Потенцкі, *Мікроелектронні сенсори фізичних величин*, т. 1. Львів, Україна: Ліга-Прес, 2002.
- [10] В. В. Кухарчук, *Елементи теорії контролю динамічних параметрів електричних машин*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998.

- [11] В. В. Кухарчук та М. Й. Білінська. «Оптико-електронний засіб вимірювань кута повороту і кутової швидкості», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с.111–112, 2005.
- [12] В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, *Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999.
- [13] В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, *Напівпровідникові перетворювачі інформації*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2004.
- [14] В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, *Сенсори тиску і магнітного поля*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.
- [15] О. В. Осадчук, *Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000.
- [16] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та В. В. Мартинюк, «Дослідження частотного перетворювача магнітної індукції на основі двох біполярних транзисторів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с.111–112, 2003.
- [17] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та В. В. Мартинюк, «Частотний магнітний сенсор», Патент України 7409, Черв. 15, 2005.
- [18] В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, «Пристрій для вимірювання переміщень», Патент України 76529, Серп. 15, 2006.
- [19] *К вопросу о точности угловых энкодеров*. Renishaw, 2005. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-933.pdf>. [Дата обращения: Июнь 10, 2014].
- [20] R. S. Popovic, *Hall effect devices*, 2nd ed. Bristol, UK: Institute of Physics Publishing, 2004.
- [21] T. Ytterdal, Y. Cheng, and T. A. Fjeldly, *Device Modeling for Analog and RF CMOS Circuit Design*. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [22] Jr. Kalb and C. Jeffrey, «Triple drain magneto field effect transistor with high conductivity central drain», U. S. Patent 5757055, May 26, 1998.

- [23] W. Kordalski, M. Polowczyk, and M. Panek, «Horizontally-split-drain MAGFET – a highly sensitive magnetic field sensor», *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical sciences*, vol. 55, no. 3, pp. 325–329, 2007.
- [24] M. Daricek, M. Donoval, and A. Satka, «Behavior of various geometry MagFET structures» presented at the Circuit Theory and Design, European Conference on, Antalya, Turkey, Aug. 23-27, 2009, doi: 10.1109/ECCTD.2009.5275146.
- [25] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та Н. С. Кравчук, *Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007.
- [26] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та В. В. Мартинюк, «Магнітний частотний сенсор», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 4, с. 128–131, 2005.
- [27] В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, «Мікроелектронний частотний перетворювач магнітного поля з активним індуктивним елементом», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2, с. 92–96, 2007.
- [28] В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, «Мікроелектронний сенсор для виміру магнітної індукції», Патент України 77810, Січ. 15, 2007.
- [29] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стівбчата, «Дослідження параметрів магніточутливого симістора», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 100–103, 2010.
- [30] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стівбчата, та В. В. Мартинюк, «Дослідження повного опору магніточутливого тиристора», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 1, с. 107–110, 2011.
- [31] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стівбчата, та В. В. Мартинюк, «Мікроелектронний перетворювач магнітної індукції з частотним виходом», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 157–163, 2011.
- [32] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Вольт-амперна характеристика перетворювача магнітного поля з частотним виходом»,

Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, № 2, с. 96–101, 2011.

- [33] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Перетворювач магнітного поля з частотним виходом», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 5, с. 149–154, 2011.
- [34] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Аналіз конструкцій та класифікація польових магніточутливих елементів», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 3, с. 75–79, 2012.
- [35] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, та О. П. Білилівська, «Мікроелектронний перетворювач магнітного поля з частотним виходом з магніточутливим елементом Холла», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 1, с. 96–103, 2013.
- [36] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Моделювання статичних характеристик двостокового магніточутливого МОН-транзистора», *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, № 4 (81), с. 64–68, 2013.
- [37] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Прилад контролю кутових положень з використанням автогенераторних магніточутливих пристроїв», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 5 (217), с. 110–114, 2014.
- [38] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, та О. П. Стовбчата, «Огляд магнітних сенсорів на основі магнітодіодного ефекту», на *VII междунар. практ. конф. «Бъдещитe изследвания – 2011»*, София, т. 15, с. 28–32.
- [39] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, та О. П. Стовбчата, «Сенсори магнітного поля на основі біполярних транзисторів», на *VII mezinár. ved.-prakt. konf. «Vêda a technolôgie: krok do budoucnosti – 2011»*, Praha, díl 17, s. 54–60.
- [40] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, та О. П. Стовбчата, «Сенсори магнітного поля на основі польових транзисторів», на *VII*

Międzynar. nauk.-prakt. konf. «Naukowa myśl informacyjnej powieki – 2011», Przemysł, vol. 15, s. 38–42.

- [41] В. С. Осадчук та О. П. Білилівська, «Частотний перетворювач магнітного поля на основі біполярного двоколекторного магніточутливого транзистора та елемента Холла», на *I Міжнар. наук. конф. пам'яті проф. Володимира Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах»*, Вінниця, 2011, с. 71.
- [42] В. С. Осадчук та О. П. Білилівська, «Математична модель двостокового магніточутливого МОН-транзистора», на *II Міжнар. наук. конф. пам'яті проф. Володимира Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах»*, Вінниця, 2013, с. 240.
- [43] В. С. Осадчук та О. П. Білилівська, «Прилад контролю кутових положень на основі багатоелектродних магніточутливих транзисторів», на *XII Міжнар. конф. «Контроль і управління в складних системах»*, Вінниця, 2014, с. 61.
- [44] О. П. Білилівська, «Магнітний прилад позиційного контролю з частотним виходом», на *XVI Междунар. молодеж. форумі «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке»*, Харків, 2012, т.1, с. 55–56.
- [45] О. П. Білилівська, «Частотний прилад контролю параметрів магнітного поля», на *8-ій міжнар. молодіж. наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій»*, Севастополь, 2012, с. 293.
- [46] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стовбчата, «Мікроелектронний пристрій для виміру магнітної індукції», Патент України 59007, Квіт. 26, 2011.
- [47] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стовбчата, «Вимірювач магнітної індукції», Патент України 61609, Лип. 25, 2011.
- [48] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Мікроелектронний вимірювач магнітної індукції», Патент України 70192, Трав. 25, 2012.

- [49] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. А. Ющенко, та О. П. Білилівська, «Вимірювач магнітної індукції з активним індуктивним елементом», Патент України 70967, Черв. 25, 2012.
- [50] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, «Мікроелектронний пристрій для вимірювання магнітної індукції з активним індуктивним елементом», Патент України 105402, Трав. 12, 2014.
- [51] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, «Мікроелектронний пристрій для вимірювання магнітної індукції з частотним виходом», Патент України 105400, Трав. 12, 2014.
- [52] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, «Мікроелектронний пристрій для вимірювання магнітної індукції», Патент України 105401, Трав. 12, 2014.
- [53] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Спосіб визначення кутових положень з використанням автогенераторних магніточутливих пристроїв», Патент України 97242, Берез. 10, 2015.
- [54] *Оптоэлектронные преобразователи угловых перемещений*. ОАО «СКБ ИС». [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.skbis.ru/index.php?p=14>. [Дата обращения: Июнь 10, 2014].
- [55] *Датчики угла поворота – энкодеры, датчики угла наклона – инклинометры*. BG electric. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.germany-electric.ru/1>. [Дата обращения: Июнь 10, 2014].
- [56] Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенский, и Ю. Д. Ульяницкий, *Радиотехнические системы*. Москва, СССР: Высшая школа, 1990.
- [57] В. Г. Баунин и Б. В. Новоселов, «Проблемы проектирования и производства управляемых опорно-поворотных устройств антенн радиосвязи», *Известия ТулГУ. Технические науки*, вып. 5, ч. 1, с. 21–30, 2011.

- [58] И. Могилевский. Система управления поворотным устройством с интерфейсом RS232. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.tularadio.ru/?pg=content/kontroler-povorotki>. [Дата обращения: Июнь 10, 2014].
- [59] AS5040 Rotary Sensor. AMS. [Online]. Available: <http://ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Angle-Position-On-Axis/AS5040>. [Accessed June 10, 2014].
- [60] А. Л. Комаров, «Система позиционирования и контроля углового положения устройства поворота», на *VII Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, посвящ. 50-лет. первого полета человека в космос*, Красноярск, 2011. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2011/section03.html>. [Дата обращения: Июнь 10, 2014].
- [61] Н. В. Гусев и В. Г. Букреев, *Системы цифрового управления многокоординатными следящими электроприводами*. Томск, РФ: Издательство Томского политехнического университета, 2007.
- [62] С. Сысоева, «Концепции применения потенциометров для автомобильных задач измерения положения», *Компоненты и технологии*, №6, с. 46–54, 2007.
- [63] А. В. Кирьянов и В. П. Кирьянов, «Способ повышения точности измерения угла поворота», патент РФ 2433413, Нояб. 10, 2011.
- [64] С. Сысоева, «Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 14. Итоговый сравнительный анализ, выводы и обновление», *Компоненты и технологии*, №7, с. 40–53, 2006.
- [65] С. Сысоева, «Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 11. Емкостные датчики – новые устройства на автомобильном рынке», *Компоненты и технологии*, №4, с. 14–24, 2006.

- [66] В. В. Кухарчук, «Математична модель вимірювального перетворювача пускового моменту електричних машин», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 5–9, 1995.
- [67] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, «Аналіз та практична реалізація мікропроцесорного засобу вимірювання кутової швидкості обертання електричних машин», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2, с. 12–16, 1995.
- [68] А. Борисов, «Современные АМР-датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей», *Компоненты и технологии*, №7, с. 56–60, 2006.
- [69] К. Б. Клаасен, *Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике*. Москва, РФ: Постмаркет, 2000.
- [70] *Three-Axis Magnetic Sensor HMC1043*. Honeywell, 2012. [Online]. Available: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Honeywell%20PDFs/HMC1043.pdf>. [Accessed June 10, 2014].
- [71] S. Tumanski, *Thin Film Magnetoresistive Sensors*. Bristol, UK: Institute of Physics Publishing, 2001.
- [72] М. Л. Бараночников, *Микромагнитоэлектроника*, т.1. Москва, РФ: ДМК Пресс, 2001.
- [73] А. Гауф и А. Гусева, «Магнитные датчики угла поворота (энкодеры) EcoTurn», *Компоненты и технологии*, №1, с. 38–41, 2012.
- [74] А. Щерба, «Магнитные энкодеры производства austriamicrosystems. Позиционирование магната над корпусом микросхемы», *Компоненты и технологии*, №7, с. 50–52, 2008.
- [75] *AS5048A High-Resolution Position Sensor*. AMS. [Online]. Available: <http://ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Angle-Position-On-Axis/AS5048A>. [Accessed June 10, 2014].
- [76] G.M. Sung, «Error correction for transformed concave and convex MAGFETs with dc supply voltage», *Sensors and Actuators*, A117. – pp. 41–49, 2005.

- [77] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стівбчата, «Сенсор магнітного поля з частотним виходом», Патент України 62366, Серп. 25, 2011.
- [78] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стівбчата, «Вимірювач магнітного поля з частотним виходом», Патент України 62367, Серп. 25, 2011.
- [79] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стівбчата, «Вимірювач магнітного поля», Патент України 66031, Груд. 26, 2011.
- [80] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стівбчата, «Сенсор магнітного поля», Патент України 66045, Груд. 26, 2011.
- [81] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. А. Ющенко, та О. П. Білилівська, «Мікроелектронний сенсор магнітного поля», Патент України 70968, Черв. 25, 2012.
- [82] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Мікроелектронний частотний сенсор магнітного поля», Патент України 71878, Лип. 25, 2012.
- [83] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Частотний вимірювач магнітної індукції», Патент України 72254, Серп. 10, 2012.
- [84] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Сенсор магнітного поля з активним індуктивним елементом», Патент України 72255, Серп. 10, 2012.
- [85] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, «Сенсор магнітного поля з активним індуктивним елементом», Патент України 86606, Січ. 10, 2014.
- [86] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, «Вимірювач індукції магнітного поля з активним індуктивним елементом», Патент України 90926, Черв. 10, 2014.
- [87] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Мікроелектронний перетворювач магнітної індукції», Патент України 76463, Січ. 10, 2013.
- [88] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, «Сенсор магнітного поля на базі магніторезистора й елемента Холла», Патент України 86604, Січ. 10, 2014.

- [89] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, «Сенсор магнітного поля на базі магнітрезистора», Патент України 86605, Січ. 10, 2014.
- [90] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, «Вимірювач індукції магнітного поля», Патент України 90927, Черв. 10, 2014.
- [91] О. А. Агеев, В. М. Мамиконова, В. В. Петров, В. Н. Котов, и О. Н. Негоденко, *Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин*. Таганрог, РФ: ТРТУ, 2000.
- [92] В. И. Чечерников, *Магнитные измерения*. Москва, СССР: Изд-во Моск. ун-та, 1969.
- [93] E. P. Furlani, *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*. New York, USA: Academic Press, 2001.
- [94] В. А. Буравихин, В. Н. Шелковников, и В. П. Карабанова, *Практикум по магнетизму*. – Москва, СССР: Высшая школа, 1979.
- [95] Ю. Ф. Лазарев, *Начала программирования в среде MatLAB*. Киев, Украина: НТУУ «КПИ», 2003.
- [96] U. Ausserlechner, «A Theory of magnetic angle sensors with hall plates and without fluxguides», *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 49, pp. 77–106, 2013.
- [97] C. Steele and S. Rossmann, «An Ultraminiature Rotary Encoder, Based on Magnetic Microsystems Technology», *Sensor. Technology and Design*, 2012. [Online]. Available: <http://archives.sensorsmag.com/articles/0902/rotary/main.shtml>. [Accessed June 10, 2014].
- [98] А. М. Бурбаев, *Методы и средства испытаний, контроля и юстировки оптических приборов*. Санкт-Петербург, РФ: СПб ГУ ИТМО, 2007.
- [99] Р. Г. Варламов, С. Д. Додик, А. И. Иванов-Цыганов и др., *Справочник по радиоэлектронным устройствам*, т. 2. Москва, СССР: Энергия, 1978.
- [100] Г. Я. Мирский, *Электронные измерения*. Москва, СССР: Радио и связь, 1986.

- [101] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, та В. В. Грабко, *Основи метрології та електричних вимірювань*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2012.
- [102] В. И. Нефедов, А. С. Сигов, В. К. Битюков, и В. И. Хахин, *Метрология и радиоизмерения*, 2-е изд. Москва, РФ: Высшая школа, 2006.
- [103] І. А. Большакова, Р. Л. Голяка, А. П. Мороз, В. Е. Єрашок, та Т. А. Марусенкова, «Сенсорні пристрої магнітного поля на сенсорах Холла з розщепленою структурою», *Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка»*, № 646, с. 38–45, 2009.
- [104] E. Yosry, W. Fikry, A. El-henawy, and M. Marzouk, «Compact Model of Dual-Drain MAGFETs Simulation», *International Journal of Electronics, Communications and Computer Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 112–116, 2009.
- [105] В. Д. Разевиг, *Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ*, вып. 2. Москва, РФ: Радио и связь, 1992.
- [106] J. Heremans, «Solid state magnetic field sensors and applications», *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 26, no 8, pp. 1149–1168, 1993.
- [107] Д. С. Дьюб, *Электроника: схемы и анализ*. Москва, РФ: Техносфера, 2008.
- [108] K. Hess, *Advanced theory of semiconductor device*. New York, USA: Wiley-IEEE Press, 1999.
- [109] R. Rodriguez-Torres, R. Klima, and S. Selberherr, «Three-Dimensional Analysis of a MAGFET at 300 K and 77 K», in *Proc. 32nd Europ. Solid-State Device Research Conf.*, Firenze, Italy, 2002, pp. 151–154.
- [110] В. Д. Разевиг, *Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7*. Москва, РФ: Горячая линия – Телеком, 2003.
- [111] А. Ф. Трутко, *Методы расчёта транзисторов*. Москва, СССР: Энергия, 1971.

- [112] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та С. В. Барабан, *Радіовимірвальні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором для неруйнівного теплового контролю*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2015.
- [113] V. S. Osadchuk and A. V. Osadchuk, «The Microelectronic Radiomeasuring Transducers of Magnetic Field with a Frequency Output», *Electronics and Electrical Engineering*, no. 4 (110), pp. 67–70, 2011.
- [114] А. В. Белов, *Конструирование устройств на микроконтроллерах*. Санкт-Петербург, РФ: Наука и Техника, 2005.
- [115] M. A. Covington, «Single-Chip Frequency Converter», *Radio-Electronics*, pp. 49–52, Apr. 1990.
- [116] Р. Д. Точки и Н. С. Уидмер, *Цифровые системы*, 8-е изд. Теория и практика. Москва, РФ: Издательский дом «Вильямс», 2004.
- [117] К. Рапроcki, *Mikrokontrolery STM32 w praktyce*. Legionowo, Polska: BTC, 2009.
- [118] STMicroelectronics, «Medium-density performance line ARM®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces», STM32F103x8, STM32F103xB datasheet, Aug. 2013 [Revised 2016].
- [119] STMicroelectronics, «STM32F4 high-performance discovery board», STM32F4DISCOVERY datasheet, Sept. 2011 [Revised 2011].
- [120] Г. Шилдт, *Полный справочник по C#*. Москва, РФ: Издательский дом «Вильямс», 2004.
- [121] Ч. Петцольд, *Программирование для Microsoft Windows на C#*, т. 1. Москва, РФ: Русская редакция, 2002.
- [122] А. В. Фролов и Г. В. Фролов, *Язык C#. Самоучитель*. Москва, РФ: Диалог-Мифи, 2003.
- [123] ГСИ. *Нормируемые метрологические характеристики средств измерений*, ГОСТ 8.009-84, 1984.
- [124] М. Дорожовець, *Опрацювання результатів вимірювань*. Львів, Україна: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2007.

- [125] Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, та Г. Б. Сердюк, *Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю*. Вінниця, Україна: ВДГУ, 2001.
- [126] ГСИ. *Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров*, МИ 1317-86, 1986.
- [127] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. П. Долгополов, та Л. В. Грузинська, *Метрологія та вимірювальна техніка*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004.
- [128] М. Н. Селиванов, А. Э. Фридман, и Ж. Ф. Кудряшова, *Качество измерений*. Ленинград, СССР: Лениздат, 1987.
- [129] Дж. Тейлор, *Введение в теорию ошибок*. Москва, СССР: Мир, 1985.
- [130] Bomatec, «Data sheet for Magnet used with austriamicrosystems AS5000-Series magnetische Rotary Encoder Familie», BMN-35H datasheet, Apr. 2007 [Revised 2007].
- [131] Fairchild Semiconductor Corporation, «3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator», MC78XX/LM78XX/MC78XXA datasheet, Feb. 2001 [Revised 2001].
- [132] S. Johansson, «New Frequency Counting Principle Improves Resolution», in *Proc. 37th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*, Vancouver, Canada, Aug. 2005, pp. 628-635.
- [133] Б. Б. Дунаев, *Точность измерений при контроле качества*. Киев, СССР: Техніка, 1981.
- [134] В. П. Шевчук, *Расчет динамических погрешностей интеллектуальных измерительных систем*. Москва, РФ: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
- [135] H. Kronmüller and S. Parkin, Eds., *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials*. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [136] С. А. Айвазян, И. С. Енюков, и Л. Д. Мешалкин, *Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных*. Москва, СССР: Финансы и статистика, 1983.

- [137] В. Д. Фрумкин и Н. А. Рубичев, *Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике*. Москва, СССР: Машиностроение, 1987.
- [138] Е. С. Венцель и Л. А. Овчаров, *Теория случайных процессов и ее инженерные приложения*. Москва, СССР: Наука, 1991.
- [139] Р. И. Ивановский, *Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad*. Санкт-Петербург, РФ: БХВ-Петербург, 2008.
- [140] Л. Н. Большев и Н. В. Смирнов, *Таблицы математической статистики*. Москва, СССР: Наука. Главная редакция физико-математическом литературы, 1983.
- [141] В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, та В. В. Усов, «Оцінка невизначеності вимірювального каналу кутових положень крокових двигунів», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, №1, с. 233–238, 2008.

