

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**БІЛИЛІВСЬКА ОЛЬГА ПЕТРІВНА**

УДК 681.2.08

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

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення  
складу речовин

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Осадчук Володимир Степанович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
професор кафедри радіотехніки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Мартинюк Валерій Володимирович**,  
Хмельницький національний університет,  
завідувач кафедри телекомунікацій і  
комп'ютерно-інтегрованих технологій;

доктор технічних наук, професор  
**Сучков Григорій Михайлович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри комп'ютерних та  
радіоелектронних систем контролю та  
діагностики.

Захист відбудеться «20» квітня 2018 р. о 9<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «16» березня 2018 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор

О. М. Васілевський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Засоби вимірювання і 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 позиціонування, 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.

Серед промислових засобів контролю кутів найвищу точність мають фотоелектричні енкодери. Але їх основним недоліком є наявність механічного контакту сенсора й об'єкта, який обертається, що обмежує смугу пропускання приладу і найменше значення вимірюваного кута. Крім того, використання контактних пристроїв часто неможливе через конструктивні обмеження об'єкта контролю.

Зазначених недоліків позбавлені безконтактні сенсори. Важливу роль у цій галузі відіграють гальваноманітні прилади, тому що вони мають невеликі габарити, низьку ціну, споживають малу потужність та прості в експлуатації. Проте сенсори, які використовуються на сьогодні для діагностики технічного стану об'єктів, мають низьку чутливість і роздільну здатність, обмежений кутовий діапазон. А прецизійні прилади через високу вартість можуть використовуватись тільки в лабораторних умовах і відповідальних промислових комплексах, які менш чутливі до ціни їх комплектуючих.

Усунення цих недоліків можливе завдяки побудові сенсорів на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами. Однак математичні моделі як польових, так і біполярних магнітотранзисторів розроблені недостатньо, що значно ускладнює процес проектування засобів контролю на їх основі. Крім того, постає проблема відсутності ґрунтовних досліджень реактивних властивостей багатоколекторних 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, експериментальне дослідження їх параметрів, розроблення нового безконтактного засобу контролю кутових положень та впровадження його у виробництво є актуальними науково-прикладними завданнями.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась у Вінницькому національному технічному університеті відповідно до госпдоговірних та держбюджетних науково-дослідних робіт: 32-Д-316 «Розробка математичних моделей мікроелектронних частотних перетворювачів магнітного поля на основі транзисторних структур з від'ємним опо-

ром» (2010–2012 рр.), номер державної реєстрації 0110U002160; 32-Д-348 «Розробка радіовимірювальних перетворювачів температури на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур» (2013–2014 рр.), номер державної реєстрації 0113U002287С; 32-Д-354 «Розробка радіовимірювальних пристроїв на основі транзисторних структур з від'ємним опором» (2013–2014 рр.), номер державної реєстрації 0113U003133.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної 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.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити 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;

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

*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.

**Методи дослідження** базуються на використанні рівнянь математичної фізики при аналізі розподілу магнітного поля постійного магніту та розроблені 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 одержаних результатів.** В дисертаційній роботі отримано наукові результати, що наведені нижче.

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** 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  $462 \text{ град}^{-1}$ , 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 при використанні 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: [1] – порівняння та вибір гальваноманітних вимірювачів параметрів магнітного поля; [2] – удосконалена математична модель магніточутливого симістора; [3] – удосконалена математична модель магніточутливого тиристора; [4] – дослідження залежності повного опору мікроелектронного перетворювача від магнітної індукції; [5] – еквівалентна схема двоколекторного магнітотранзистора; [6] – математична модель перетворювача магнітного поля з частотним виходом; [7] – розроблення класифікації польових магніточутливих елементів; [8] – аналітичні вирази залежності повного опору мікроелектронного перетворювача магнітного поля з елементом Холла від магнітної індукції; [9] – дослідження статичних характеристик двостокового магніточутливого МОН-транзистора; [10] – структурна та програмна реалізація приладу контролю кутових положень; [11] – огляд магнітодіодів, виготовлених на основі гетеропереходів; [12] – аналіз структур біполярних магніточутливих транзисторів; [13] – розгляд схеми сенсора для вимірювання магнітного поля на основі польового транзистора; [14] – дослідження характеристик частотного перетворювача магнітного поля; [15] – математична модель статичних характеристик двостокового магніточутливого МОН-транзистора; [16] – метод контролю кутових положень і структура приладу на основі магніточутливих транзисторів; [19] – дослідження впливу елемента Холла на роботу пристрою; [20] – моделювання вимі-

рювача магнітної індукції; [21] – дослідження чутливості пристроїв; [22], [23] – розрахунок параметрів активного індуктивного елемента; [24], [25] – програмна перевірка функціонування пристроїв; [26] – алгоритм вимірювання кутових положень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на VII міжнародній практичній конференції «Бъдещите изследвания – 2011» (София, 2011); VII міжнародній науково-практичній конференції «Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2011» (Praha, 2011); VII міжнародній науково-практичній конференції «Naukowa myśl informacyjnej rowieki – 2011» (Przemyśl, 2011); I Міжнародній науковій конференції пам'яті професора Володимира Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (Вінниця, 2011); XVI Міжнародному молодіжному форумі «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке» (Харків, 2012); 8-й міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій» (Севастополь, 2012); II Міжнародній науковій конференції пам'яті професора Володимира Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (Вінниця, 2013); XII Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» (Вінниця, 2014), а також на регіональних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (Вінниця, 2010 – 2014).

**Публікації.** Результати теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано у 26 наукових працях. Серед них 10 статей у фахових виданнях 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.

**Структура і обсяг роботи.** 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** наведено обґрунтування вибору теми дослідження, зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, подано інформацію про впровадження результатів роботи, особистий внесок здобувача, апробацію роботи і публікації.

**У першому розділі** розглянуто питання контролю кутових положень опорно-поворотних пристроїв із врахуванням впливу похибки встановлення кутового положення на точність визначення положення об'єкта радіолокації, проаналізовано існуючі методи та засоби контролю кутових положень. Запропоновано класифікацію засобів контролю кутових положень за принципом зчиту-

вання, 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, фотоелектричних чи магнітних енкoderів. Встановлено, що потенціометричні прилади контактні і мають великі похибки вимірювання, а основним недоліком фотоелектричних енкoderів, точність яких найвища, є вплив муфти з'єднання (перехідний процес муфти і неможливість монтажу у важкодоступних місцях). Обґрунтовано вибір магнітного класу контрольно-вимірювальних методів і засобів, які завдяки безконтактному принципу роботи характеризуються високою швидкістю і стабільністю роботи протягом великої кількості циклів переміщення. Шляхом аналізу ряду наукових робіт з'ясовано, що використання сенсорів на основі автогенераторних пристроїв перетворення фізичних величин дозволяє підвищити чутливість перетворення і зменшити похибки вимірювання. Проведено огляд гальваноманітних магніточутливих пристроїв для контролю кутових положень, який показав, що магніточутливі транзистори мають значно вищу чутливість, ніж інші гальваноманітні перетворювачі. Отримані результати дозволили визначити подальший напрямок досліджень.

**У другому розділі** дисертації запропоновано метод контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами й обґрунтовано особливості його реалізації.

В результаті математичного моделювання на основі теорії гальваноманітних методів контролю отримано вирази, які описують просторовий розподіл магнітного поля постійного діаметрально намагніченого магніту. Відповідно, радіальна, тангенціальна (азимутальна) та аксіальна складові магнітної індукції в циліндричних координатах визначаються за виразами:

$$B_r(r, \phi, z) = \frac{\mu_0 M_s R}{2N_\phi} \sum_{n=0}^{N_\phi} \sum_{k=1}^2 (-1)^{(k+1)} S_\phi(n) \cos(\phi'(n)) \times \\ \times [r - R \cos(\phi - \phi'(n))] I(r, \theta, z; R, \phi'(n), z_k), \quad (1)$$

$$B_\phi(r, \phi, z) = \frac{\mu_0 M_s R^2}{2N_\phi} \sum_{n=0}^{N_\phi} \sum_{k=1}^2 (-1)^{(k+1)} S_\phi(n) \cos(\phi'(n)) \times \\ \times \sin(\phi - \phi'(n)) I(r, \phi, z; R, \phi'(n), z_k), \quad (2)$$

$$B_z(r, \phi, z) = \frac{\mu_0 M_s R}{2N_\phi} \sum_{n=0}^{N_\phi} S_\phi(n) \sum_{k=1}^2 (-1)^k \cos(\phi'(n)) g(r, \phi, z; R, \phi'(n), z_k), \quad (3)$$

де  $M_s$  – намагнічення у заданому напрямку;  $N_\phi$  – кількість членів за методом Сімпсона, тобто  $\phi'(n) = 2\pi n/N_\phi$  ( $n = 0, 1, 2, \dots, N_\phi$ );  $S_\phi$  – коефіцієнт, який визначається як

$$S_\phi(n) = \begin{cases} 1/3 & (n = 0); \\ 4/3 & (n = 1, 3, 5, \dots); \\ 2/3 & (n = 2, 4, 6, \dots); \\ 1/3 & (n = N_\phi). \end{cases}$$



Функція  $I$  у виразі (1) залежить від співвідношення між координатами точки поля  $(r, \phi, z)$  та початкової точки  $(r', \phi', z')$  і набуває значень

$$I \equiv \begin{cases} \frac{(z - z_k)g(r, \phi, z; r', \phi', z_k)}{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\phi - \phi')}, & \text{якщо } r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\phi - \phi') \neq 0; \\ \frac{-1}{2(z - z_k)^2}, & \text{якщо } r = r', \cos(\phi - \phi') = 1, z \neq z_k, \end{cases}$$

$$\text{де } g(r, \phi, z; r', \phi', z') = (r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\phi - \phi') + (z - z')^2)^{-1/2}.$$

На основі виразів (1) – (3) проведено комп'ютерне моделювання залежностей радіальної, тангенціальної та аксіальної складових магнітної індукції поля від кута повороту постійного магніту з діаметральним намагніченням (радіус  $R = 6 \text{ мм}$ , висота  $h = 6 \text{ мм}$ , намагнічення  $M_s = 2,4 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ ) на відстані  $r = 3 \text{ мм}$  від центра магніту та  $z = 2 \text{ мм}$  від поверхні магніту. Результати моделювання у програмному пакеті для науково-технічних розрахунків MatLab, наведені на рис. 1, а, підтвердили, що просторові складові магнітної індукції лінійно пов'язані з кутовою координатою лише у вузькому діапазоні її значень, характер залежностей близький до синусоїдного. Багатостокові та багатокolleкторні магнітотранзистори чутливі до складової магнітного поля, яка перпендикулярна до площини сенсора, тому проведено моделювання просторового розподілу аксіальної складової магнітної індукції (рис. 1, б).

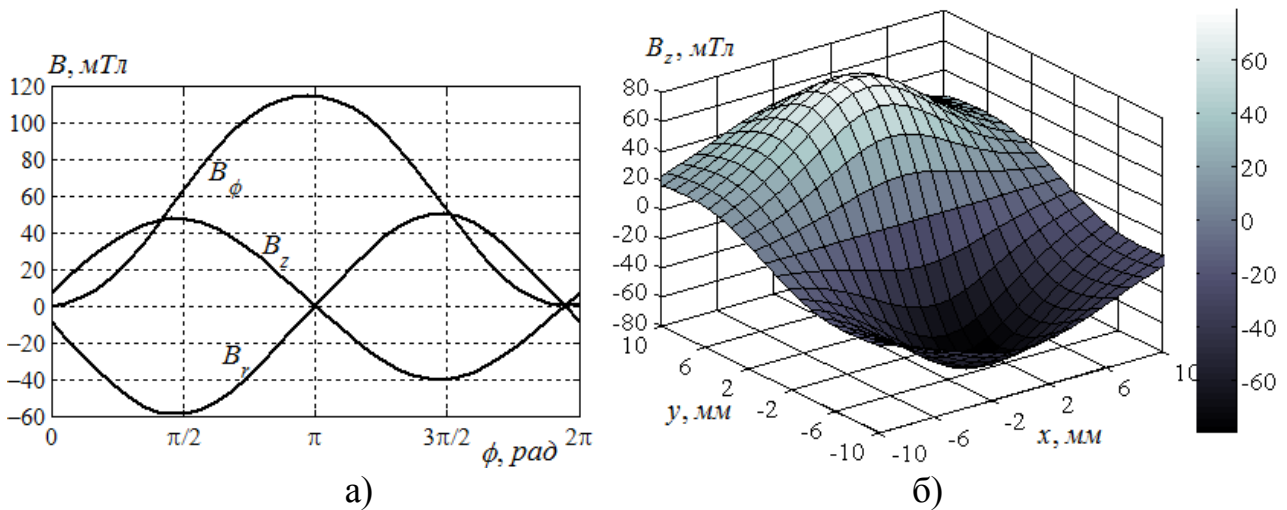


Рисунок 1 – Результати моделювання: а – залежностей радіальної ( $B_r$ ), тангенціальної ( $B_\phi$ ) та аксіальної ( $B_z$ ) складових магнітної індукції від кутової координати; б – просторового розподілу аксіальної складової магнітної індукції

Результати, наведені на рис. 1, б, надали можливість дослідити вплив параметрів постійного магніту та відстані між магнітом і площиною чутливого елемента на магнітну індукцію. Отримані вирази можуть бути використані для інженерного розрахунку магнітних систем засобів контролю кутових положень.

При зміні кутової координати  $\phi$  в циліндричній системі координат від 0 до  $2\pi$  ( $z = z_1$ ,  $r = r_1$ ) магнітна індукція  $B_z(r_1, \phi, z_1)$  нерухомого магніту набуває

тих самих значень, що й магнітна індукція  $B_z(r_1, 0, z_1)$  при обертанні постійного магніту відносно нерухомої системи чутливих елементів. Тому в результаті заміни кутової координати  $\phi$  на фазовий зсув магнітного поля від нульової мітки або, з деяким наближенням, на вимірюваний кут  $\alpha$ , отримано залежність аксіальної складової магнітної індукції від кутового положення досліджуваного об'єкта:

$$B_z = B_0 + \mu_0 M_S b_z(r, z) \sin(\alpha + \phi_\rho + \Delta\alpha_{\Delta e}), \quad (4)$$

де  $B_0$  – ненульове зміщення магнітного поля;  $b_z(r, z)$  – коефіцієнт, який розраховується чисельними методами на основі формули (3) для заданих розмірів магніту і набору значень полярного радіуса та висоти  $(r, z)$ ;  $r = r_s \cos(\alpha - \phi_s) + \sqrt{r_s^2 \cos^2(\alpha - \phi_s) - r_s^2 + R_s^2}$  – полярний радіус;  $r_s$  і  $\phi_s$  – полярний радіус і полярний кут центра системи чутливих елементів відносно центра магніту;  $R_s$  – радіус системи чутливих елементів;  $\phi_\rho$  – кутова координата нульової площини в полярній системі координат;  $\Delta\alpha_{\Delta e} = \Delta e(\sin(\alpha - \phi_{e0}) + \sin \phi_{e0})/r$  – відхилення кута повороту постійного магніту від кута повороту контрольованого валу.

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 (рис. 2).

У системах із двома чутливими елементами (рис. 2, а), розташованими під кутом  $90^\circ$ , вихідні сигнали із обох елементів мають вигляд синусоїд зі зсувом фаз  $90^\circ$  (синусна і косинусна складові). Кутове положення визначається як

$$\alpha_{вим.} = \arctg\left(\frac{B_{\sin} - B_0}{B_{\cos} - B_0}\right) + \alpha_c - \phi_\rho + 360^\circ \cdot l, \quad (5)$$

де величина  $\alpha_c$  введена для врахування знаків синусної та косинусної складових в діапазоні повного оберту:

$$\alpha_c = \begin{cases} 0, & \text{якщо } (B_{\sin} > B_0), (B_{\cos} > B_0); \\ 180^\circ, & \text{якщо } (B_{\cos} < B_0); \\ 360^\circ, & \text{якщо } (B_{\sin} < B_0), (B_{\cos} > B_0); \end{cases}$$

$l$  – змінна для коригування діапазону результатів вимірювання:

$$l = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \arctg((B_{\sin} - B_0)/(B_{\cos} - B_0)) + \alpha_c \geq \phi_\rho; \\ 1, & \text{якщо } \arctg((B_{\sin} - B_0)/(B_{\cos} - B_0)) + \alpha_c < \phi_\rho. \end{cases}$$

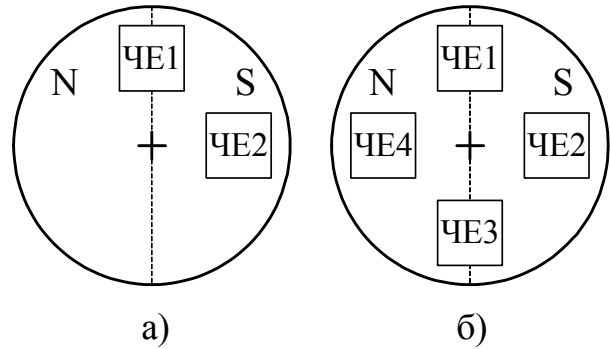


Рисунок 2 – Магнітні системи засобів контролю кутових положень:

- а – із двома чутливими елементами;
- б – із чотирма чутливими елементами

На рис. 3 зображені залежності аксіальних складових магнітної індукції, що діє на елементи ЧЕ1 ( $B_{\sin}$ ) і ЧЕ2 ( $B_{\cos}$ ), та отриманого за виразом (5) значення кута від кутового положення контрольованого об'єкта за  $\phi_{\rho} = 0$ .

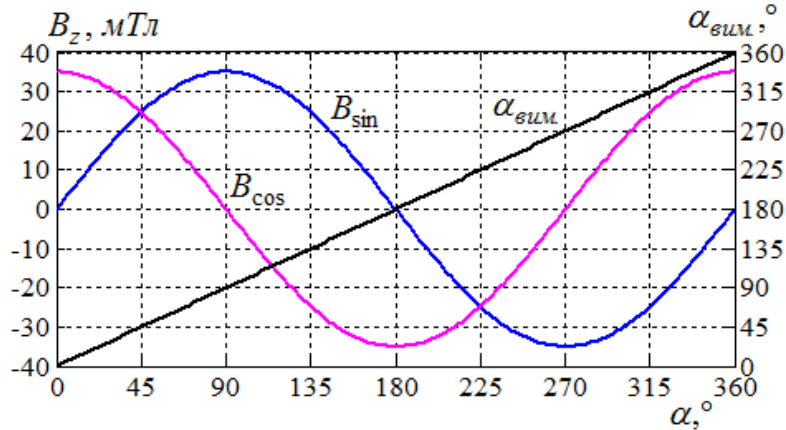


Рисунок 3 – Залежність магнітної індукції та вимірюваного кута від кутового положення контрольованого об'єкта для магнітних систем із двома чутливими елементами

Графіки, наведені на рис. 3, показали, що кут, розрахований на основі значень синусної та косинусної складових магнітної індукції, залежить від початкового та миттєвого значення кутового положення, але не залежить від кількості обертів контрольованого об'єкта (однак, за потреби можна підраховувати кількість обертів). Магнітна система із двома чутливими елементами дозволяє проводити вимірювання в діапазоні повного оберту контрольованого об'єкта, забезпечуючи високу лінійність функції перетворення.

В системі з чотирма чутливими елементами (див. рис. 2, б) зсув фаз синусоїди, що відтворює зміну магнітної індукції на двох сусідніх чутливих елементах, складає  $90^\circ$ . При невеликих зсувах магніту в горизонтальній площині спад сигналу на одному сенсорі компенсується зростанням сигналу на протилежному, оскільки вимірюваний кут визначається як

$$\alpha_{\text{вим.}} = \arctg\left(\frac{B_{\sin 1} - B_{\sin 2}}{B_{\cos 1} - B_{\cos 2}}\right) + \alpha_c - \phi_{\rho} + 360^\circ \cdot l, \quad (6)$$

де  $B_{\sin 1}$ ,  $B_{\cos 1}$ ,  $B_{\sin 2}$ ,  $B_{\cos 2}$  – аксіальні складові магнітної індукції, що діє на чутливі елементи ЧЕ1, ЧЕ2, ЧЕ3, ЧЕ4, відповідно;

$$\alpha_c = \begin{cases} 0, & \text{якщо } (B_{\sin 1} > B_{\sin 2}), (B_{\cos 1} > B_{\cos 2}); \\ 180^\circ, & \text{якщо } (B_{\cos 1} < B_{\cos 2}); \\ 360^\circ, & \text{якщо } (B_{\sin 1} < B_{\sin 2}), (B_{\cos 1} > B_{\cos 2}); \end{cases}$$

$$l = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \arctg((B_{\sin 1} - B_{\sin 2}) / (B_{\cos 1} - B_{\cos 2})) + \alpha_c \geq \phi_{\rho}; \\ 1, & \text{якщо } \arctg((B_{\sin 1} - B_{\sin 2}) / (B_{\cos 1} - B_{\cos 2})) + \alpha_c < \phi_{\rho}. \end{cases}$$

Недоліком є більш складна будова, вища вартість порівняно з конструкцією на основі двох чутливих елементів. Отримані аналітичні вирази та результати моделювання дозволили сформулювати суть запропонованого методу конт-

ролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, що полягає у:

1) створенні за допомогою постійного магніту з діаметральним намагніченням магнітного поля, просторовий розподіл якого залежить від кута повороту контрольованого об'єкта (валу);

2) визначенні точок контролю кутового положення і допустимого відхилення;

3) отриманні сигналу початку оберту об'єкта контролю, збереженні значення кутової координати нульової площини;

4) перетворенні індукції магнітного поля у двох (або чотирьох) точках, кутовий зсув між якими складає  $90^\circ$ , тобто синусної та косинусної складових магнітної індукції, у частотні сигнали за допомогою автогенераторних пристроїв на основі магніточутливих транзисторів (за фіксованого кутового положення досліджуваного об'єкта);

5) вимірюванні отриманих частот за допомогою мікроконтролерних засобів;

6) обчисленні синусних і косинусних складових магнітної індукції на основі вимірюваних частот та функції перетворення автогенераторних пристроїв;

7) обчисленні кутового положення та визначенні напрямку обертання об'єкта контролю на основі синусних і косинусних складових магнітної індукції та початкових даних;

8) порівнянні обчислених кутових положень із значеннями точок контролю для отримання результату контролю.

Запропонований метод передбачає, що частота генерації автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами однозначно залежить від магнітної індукції. Також обґрунтовано використання опосередкованого методу вимірювання частоти на виходах автогенераторних пристроїв, який має меншу похибку квантування, ніж прямий метод, і дозволяє вибрати оптимальне співвідношення між швидкістю та похибкою вимірювання.

**Третій розділ** дисертаційної роботи присвячений розробленню сенсорів кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами для реалізації запропонованого методу і безконтактного засобу контролю кутових положень.

Удосконалено математичну модель двостокових магніточутливих МОН-транзисторів, яка відрізняється від існуючих тим, що враховує вплив магнітного поля на розподіл носіїв заряду між стоками, провідність області каналу та геометричні ефекти, що дозволило отримати аналітичні вирази статичних характеристик двостокового магніточутливого МОН-транзистора. Теоретично встановлено і підтверджено залежність реактивних властивостей двостокових та двоколекторних магнітотранзисторів від індукції магнітного поля. Чутливість активної складової повного опору двостокового транзистора знаходиться в діапазоні від  $0,13 \text{ Ом/мТл}$  до  $0,23 \text{ Ом/мТл}$ , а реактивної – до  $5 \text{ Ом/Тл}$ . Чутливість активної складової повного опору двоколекторного магнітотранзистора досягає  $7 \text{ Ом/мТл}$ , реактивної –  $5,2 \text{ Ом/мТл}$ . Отримані результати підтверди-

ли можливість використання магнітореактивного ефекту в магніточутливих транзисторах для розроблення сенсорів кутових положень на основі автогенераторних пристроїв.

Запропоновано автогенераторні пристрої із двостоковим МОН-магнітотранзистором та із двоколекторним магнітотранзистором, у яких магніточутливі транзистори є основою ємнісних складових коливальних контурів. Розроблено математичні моделі магніточутливих транзисторів та автогенераторних пристроїв, що можуть бути використані для інженерного розрахунку повного опору, функції перетворення, чутливості автогенераторних пристроїв і сенсорів на їх основі. При цьому використано модель автогенератора:

$$f(B) = \frac{R_{\text{втр}}(B)}{L_{\text{екв}}} \sqrt{\frac{R_{\delta}^2(B)C_{\text{екв}}(B)}{L_{\text{екв}}} - 1}, \quad (7)$$

де  $R_{\text{втр}}(B)$  – опір втрат у коливальному контурі автогенератора;  $C_{\text{екв}}(B)$  і  $L_{\text{екв}}$  – еквівалентні ємність та індуктивність коливального контуру;  $R_{\delta}(B)$  – від’ємний диференціальний опір.

Досліджено основні характеристики автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами в діапазоні магнітної індукції, який обраний з урахуванням особливостей запропонованого методу контролю кутових положень. Апроксимація залежностей  $R_{\delta}(B)$  та  $C_{\text{екв}}(B)$  дозволила отримати функцію перетворення автогенераторного пристрою із двостоковим МОН-магнітотранзистором:

$$f(B) = \left( R_{\text{втр}0} + (R_{\text{DS1}} + R_{\text{DS2}})_{B=0} c\mu_p^2 B^2 \right) L_{\text{екв}}^{-1} \times \\ \times \sqrt{\left( p_0 B^3 + p_1 B^2 + p_2 B + p_3 \right) \left( a_1 e^{\gamma_1 B} + a_2 e^{\gamma_2 B} \right) L_{\text{екв}}^{-1} - 1}, \quad (8)$$

де  $R_{\text{втр}0} = R_1 + R_2 + R_L + (R_{\text{DS1}} + R_{\text{DS2}})_{B=0} + R_{\text{BB1}} + R_{\text{D1}} + R_{\text{D2}} + R_{\text{S1}} + R_{\text{G1}} + R_{\text{S3}} + R_{\text{BB3}} + R_{\text{DS3}} + R_{\text{DS4}} + R_{\text{D3S4}} + R_{\text{D4}} + R_{\text{(C1)}} + R_{\text{(C2)}}$  – опір втрат у коливальному контурі без дії зовнішнього магнітного поля;  $p_0, \dots, p_3$  – коефіцієнти апроксимаційного полінома для наближення функційної залежності  $R_{\delta}^2(B)$ ;  $a_1, a_2, \gamma_1, \gamma_2$  – параметри апроксимаційної функції для наближення залежності  $C_{\text{екв}}(B)$ .

Отримано графічні залежності частоти генерації автогенераторного пристрою із двостоковим МОН-магнітотранзистором від магнітної індукції (рис. 4) за напруги керування  $U_1 = 3,2 \text{ В}$  і напруги живлення: 1 –  $U_2 = 1,3 \text{ В}$ ; 2 –  $U_2 = 1,5 \text{ В}$ ; 3 –  $U_2 = 1,7 \text{ В}$ .

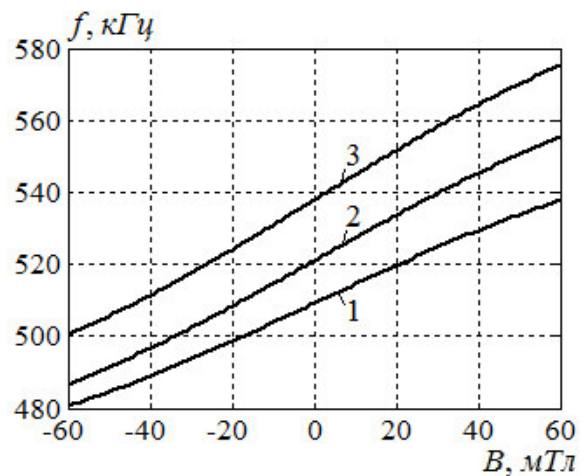


Рисунок 4 – Залежність частоти генерації автогенераторного пристрою із двостоковим МОН-магнітотранзистором від індукції магнітного поля

Резонансна частота коливального контуру за напруги керування  $3,2\text{ В}$  та напруги живлення  $1,5\text{ В}$  внаслідок дії магнітного поля індукцією від мінус  $60\text{ мТл}$  до  $60\text{ мТл}$  змінюється від  $486,8\text{ кГц}$  до  $555,2\text{ кГц}$ , що дозволило використати автогенераторні пристрої із двостоковими МОН-магнітотранзисторами для побудови сенсорів кутового положення.

Чутливість автогенераторного пристрою розрахована як похідна від функції перетворення за магнітною індукцією:

$$S_B^f = \frac{\partial f(B)}{\partial B} = 2(R_{DS1} + R_{DS2})_{B=0} c\mu_p^2 BL_{екв}^{-1} \times \sqrt{(p_0 B^3 + p_1 B^2 + p_2 B + p_3) \left( a_1 e^{\gamma_1 B} + a_2 e^{\gamma_2 B} \right) L_{екв}^{-1} - 1 + 0,5 L_{екв}^{-2} (R_{гмп0} + (R_{DS1} + R_{DS2})_{B=0} c\mu_p^2 B^2) \left( 3p_0 B^2 + 2p_1 B + p_2 B \right) \left( a_1 e^{\gamma_1 B} + a_2 e^{\gamma_2 B} \right) + (p_0 B^3 + p_1 B^2 + p_2 B + p_3) \left( a_1 \gamma_1 e^{\gamma_1 B} + a_2 \gamma_2 e^{\gamma_2 B} \right)}{\sqrt{\left( (p_0 B^3 + p_1 B^2 + p_2 B + p_3) \left( a_1 e^{\gamma_1 B} + a_2 e^{\gamma_2 B} \right) L_{екв}^{-1} - 1 \right)^{-1}}}. \quad (9)$$

Чутливість автогенераторного пристрою із двостоковим МОН-магнітотранзистором за магнітною індукцією (в діапазоні від мінус  $60\text{ мТл}$  до  $60\text{ мТл}$ ) складає  $434 - 639\text{ Гц / мТл}$ .

Отримано аналітичний вираз функції перетворення автогенераторного пристрою із двоколекторним магнітотранзистором, який має вигляд:

$$f(B) = \left( R_{гмп0} + 2(R_{B0} + kT e^{-qU_{E0}/(kT)} / (qI_0)) c\mu_p^2 B^2 \right) L_{екв}^{-1} \times \sqrt{(p_0 B^3 + p_1 B^2 + p_2 B + p_3) \left( a_1 e^{\gamma_1 B} + a_2 e^{\gamma_2 B} \right) L_{екв}^{-1} - 1}, \quad (10)$$

де  $R_{гмп0} = R1 + R2 + R3 + (R_{B1} + R_{B2} + R_{E1} + R_{E2})_{B=0} + R_{B1B2} + R_{C1} + R_{C2} + R_{S3} + R_{DS3} + R_{DS4} + R_{D3S4} + R_{D4} + R_{B3} + R_{C3} + R_{E3} + R_{(C1)} + R_{(C2)}$ .

На рис. 5 наведені теоретичні та експериментальні графіки функції перетворення автогенераторного пристрою із двоколекторним магнітотранзистором за напруги керування  $U1 = 1,6\text{ В}$  і напруги живлення: 1 –  $U2 = 4,6\text{ В}$ ; 2 –  $U2 = 5\text{ В}$ ; 3 –  $U2 = 5,4\text{ В}$ . Резонансна частота коливального контуру за напруги керування  $1,6\text{ В}$  та напруги живлення  $5\text{ В}$  внаслідок дії магнітного поля індукцією від мінус  $60\text{ мТл}$  до  $60\text{ мТл}$  змінюється від  $267,4\text{ кГц}$  до  $125,5\text{ кГц}$ . Чутливість розробленого автогенераторного пристрою із двоколекторним магнітотранзистором знаходиться в діапазоні від

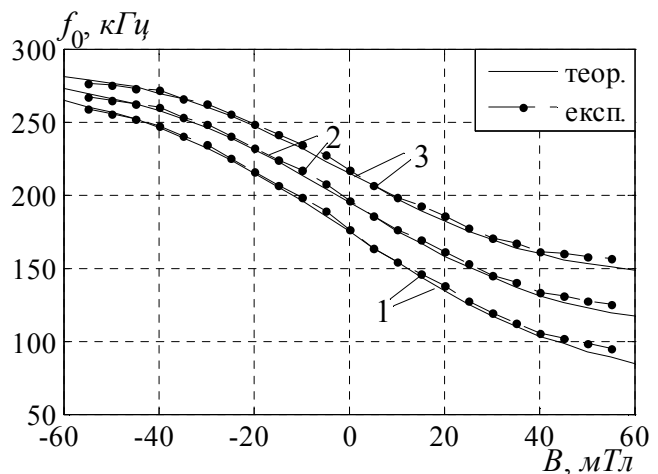


Рисунок 5 – Теоретична та експериментальна функція перетворення автогенераторного пристрою із двоколекторним магнітотранзистором

470 Гц/мТл до 1770 Гц/мТл (якщо значення модуля індукції магнітного поля не перевищує 60 мТл) і описується виразом:

$$S_B^f = \frac{\partial f(B)}{\partial B} = 4(R_{B0} + kTe^{-qU_{E0}/(kT)} / (qI_0)) c\mu_p^2 BL_{екв}^{-1} \times$$

$$\times \sqrt{(p_0 B^3 + p_1 B^2 + p_2 B + p_3) (a_1 e^{\gamma_1 B} + a_2 e^{\gamma_2 B}) L_{екв}^{-1} - 1 + 0,5 L_{екв}^{-2} (R_{емп0} +$$

$$+ 2(R_{B0} + kTe^{-qU_{E0}/(kT)} / (qI_0)) c\mu_p^2 B^2) (3p_0 B^2 + 2p_1 B + p_2 B) \times$$

$$\times (a_1 e^{\gamma_1 B} + a_2 e^{\gamma_2 B}) + (p_0 B^3 + p_1 B^2 + p_2 B + p_3) (a_1 \gamma_1 e^{\gamma_1 B} + a_2 \gamma_2 e^{\gamma_2 B})} \times$$

$$\sqrt{((p_0 B^3 + p_1 B^2 + p_2 B + p_3) (a_1 e^{\gamma_1 B} + a_2 e^{\gamma_2 B}) L_{екв}^{-1} - 1)^{-1}}. \quad (11)$$

Проведені дослідження автогенераторних пристроїв на основі магніточутливих транзисторів надали можливість описати зв'язок частоти вихідних сигналів вимірювальних перетворювачів із кутовим положенням об'єкта. Таким чином, сенсор кутових положень на основі автогенераторного пристрою із двостоковим МОН-магнітотранзистором реалізує функцію перетворення:

$$f(\alpha) = (R_{емп0} + (R_{DS1} + R_{DS2})_{B=0} c\mu_p^2 (B(\alpha))^2) L_{екв}^{-1} \times$$

$$\times \sqrt{(p_0 (B(\alpha))^3 + p_1 (B(\alpha))^2 + p_2 B(\alpha) + p_3) (a_1 e^{\gamma_1 B(\alpha)} + a_2 e^{\gamma_2 B(\alpha)}) L_{екв}^{-1} - 1}, \quad (12)$$

а сенсор на основі автогенераторного пристрою із двоколекторним магнітотранзистором:

$$f(\alpha) = (R_{емп0} + 2(R_{B0} + kTe^{-qU_{E0}/(kT)} / (qI_0)) c\mu_p^2 (B(\alpha))^2) L_{екв}^{-1} \times$$

$$\times \sqrt{(p_0 (B(\alpha))^3 + p_1 (B(\alpha))^2 + p_2 B(\alpha) + p_3) (a_1 e^{\gamma_1 B(\alpha)} + a_2 e^{\gamma_2 B(\alpha)}) L_{екв}^{-1} - 1}, \quad (13)$$

де  $B(\alpha) = B_0 + \mu_0 M_S b_z(r, z) \sin(\alpha + \phi_\rho + \Delta\alpha_{\Delta e})$ .

Графічні залежності вихідної частоти сенсорів кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами від кутового положення наведені на рис. 6.

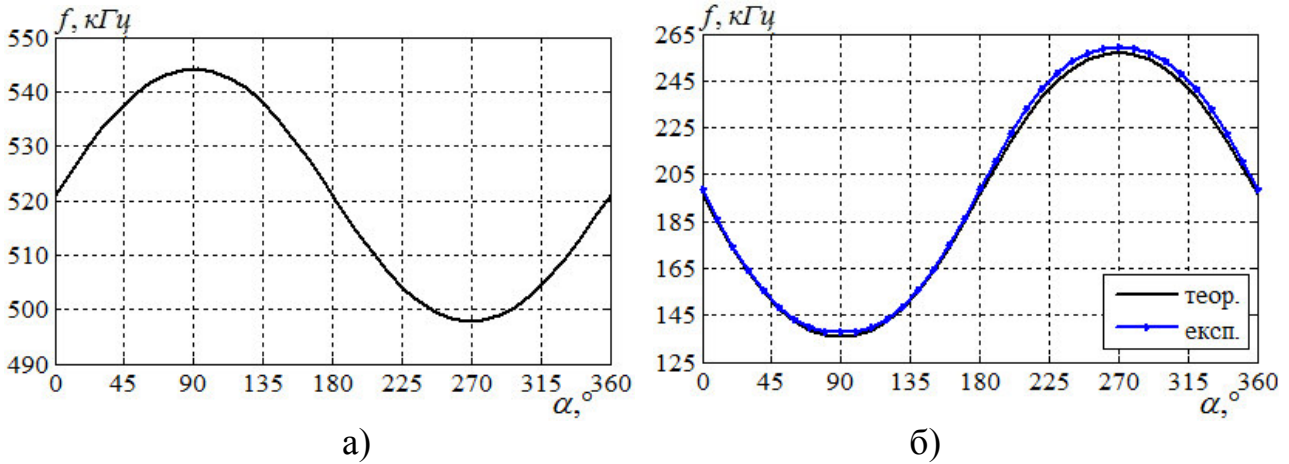


Рисунок 6 – Залежності вихідної частоти сенсорів кутових положень на основі автогенераторних пристроїв: а – із двостоковим МОН-магнітотранзистором; б – із двоколекторним магнітотранзистором



Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів (рис. 6, б) не перевищує 1,6 %, що підтверджує адекватність запропонованої моделі розроблених сенсорів кутових положень.

Досліджено чутливість перетворення кутового положення у вихідну частоту сенсорів кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами. Проведено порівняння чутливості розроблених сенсорів із відомими (з магнітним енкодером AS5048). Чутливість сенсора кутових положень на основі автогенераторного пристрою із двоколекторним магнітотранзистором складає  $462 \text{ град}^{-1}$ , 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).

**В четвертому розділі** подано результати розроблення безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, зокрема описана структура засобу, схемотехнічні та програмні рішення, а також експериментальні дослідження, оцінено метрологічні характеристики засобу, проведено порівняння із відомими засобами контролю кутових положень.

Блок-схему безконтактного засобу контролю кутових положень на основі розроблених автогенераторних пристроїв із двоколекторними магнітотранзисторами наведено на рис. 8. На схемі введено такі позначення: ПМ – постійний магніт, закріплений на валу контролюваного об'єкта; АГП1 та АГП2 – автогенераторні пристрої із магнітотранзисторами, які чутливі до зміни магнітної індукції в точках, що відповідають кутовим положенням  $0^\circ$  і  $90^\circ$ ; ВФ1 та ВФ2 – вхідні формувачі, що забезпечують перетворення сигналу до вигляду, рівень і форма якого відповідають вимогам до сигналів на цифрових входах мікроконтролера; МК – мікроконтролер; БВ – блок виведення результатів контролю.

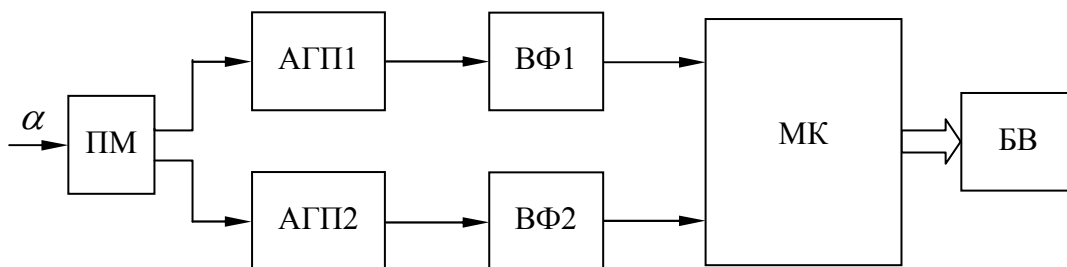


Рисунок 8 – Блок-схема безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із двоколекторними магнітотранзисторами

Для схемотехнічної реалізації безконтактного засобу контролю кутових положень використано результати досліджень, описані у розділах 2 та 3, синтезовано схему попереднього оброблення частотних сигналів з урахуванням робочого діапазону автогенераторів, вибрано мікроконтролер. Розроблено програмне забезпечення для безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами (рис 9).



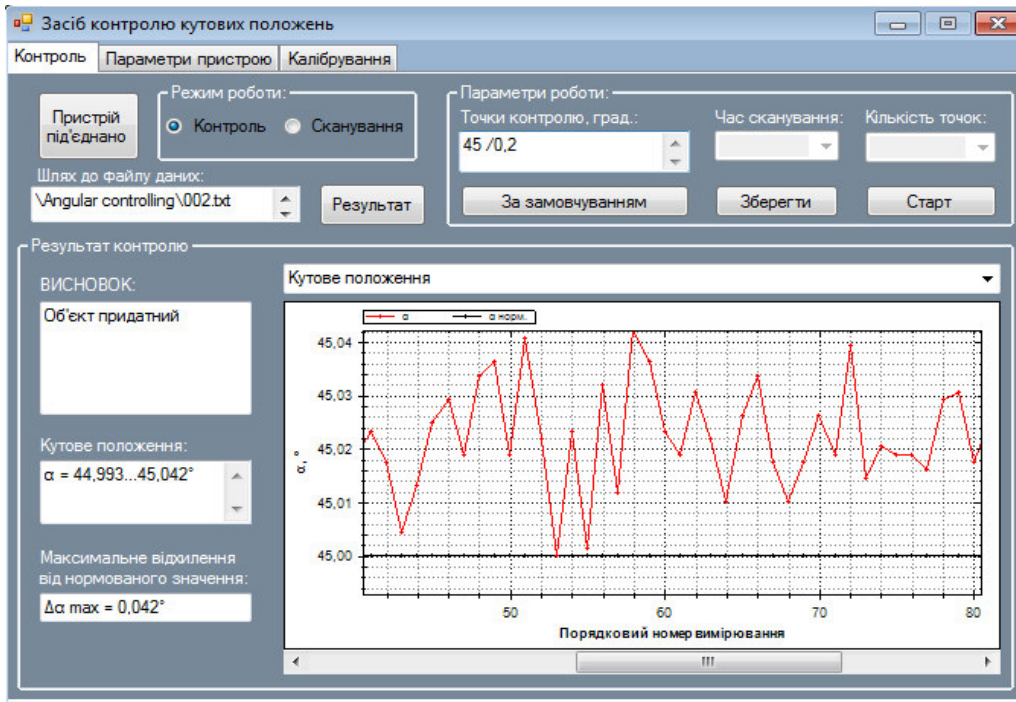


Рисунок 9 – Вікно комп'ютерної програми для безконтактного засобу контролю кутів положень

Отримано функцію перетворення запропонованого безконтактного засобу контролю кутів положень:

$$N = k \left( \arctg \left( \frac{B'_{\sin} [N_{\sin}(\alpha)] - B_0}{B'_{\cos} [N_{\cos}(\alpha)] - B_0} \right) + \alpha_c - \phi_p + 360^\circ \cdot l \right), \quad (14)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності для отримання цілочисельного вихідного коду;  $B'_{\sin} [N_{\sin}(\alpha)]$ ,  $B'_{\cos} [N_{\cos}(\alpha)]$  – поліноміальні апроксимаційні функції виду  $y = a_0 x^4 + a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + a_4$ , що наближують залежності магнітної індукції від підрахованої мікроконтролером кількості імпульсів;  $N_{\sin}(\alpha)$ ,  $N_{\cos}(\alpha)$  – функції перетворення сенсорів кутового положення із врахуванням МК:

$$N_{\sin}(\alpha) = \frac{N_x f_{зр.}}{f_{\sin}(\alpha)} = N_x f_{зр.} L_{екв} / \left( \left( R_{вмп0} + 2(R_{B0} + kTe^{-qU_{E0}/(kT)} / (qI_0)) \right) \epsilon \mu_p^2 (B_{\sin}(\alpha))^2 \right) \times \sqrt{\left( p_0 (B_{\sin}(\alpha))^3 + p_1 (B_{\sin}(\alpha))^2 + p_2 B_{\sin}(\alpha) + p_3 \right) \left( a_1 e^{\gamma_1 B_{\sin}(\alpha)} + a_2 e^{\gamma_2 B_{\sin}(\alpha)} \right) L_{екв}^{-1} - 1},$$

$$N_{\cos}(\alpha) = \frac{N_x f_{зр.}}{f_{\cos}(\alpha)} = N_x f_{зр.} L_{екв} / \left( \left( R_{вмп0} + 2(R_{B0} + kTe^{-qU_{E0}/(kT)} / (qI_0)) \right) \epsilon \mu_p^2 (B_{\cos}(\alpha))^2 \right) \times \sqrt{\left( p_0 (B_{\cos}(\alpha))^3 + p_1 (B_{\cos}(\alpha))^2 + p_2 B_{\cos}(\alpha) + p_3 \right) \left( a_1 e^{\gamma_1 B_{\cos}(\alpha)} + a_2 e^{\gamma_2 B_{\cos}(\alpha)} \right) L_{екв}^{-1} - 1};$$

$B_{\sin}(\alpha) = B_0 + \mu_0 M_S b_z(r, z) \sin(\alpha + \phi_p + \Delta\alpha_{\Delta e})$ ,  $B_{\cos}(\alpha) = B_0 + \mu_0 M_S b_z(r, z) \times \cos(\alpha + \phi_p + \Delta\alpha_{\Delta e})$  – залежності синусних та косинусних складових магнітної індукції від кутового положення.

Статична характеристика засобу контролю кутів положень, наведена

на рис. 10, є лінійною в діапазоні повного оберту контрольованого валу. Це пояснюється використанням функції арктангенса при обчисленні результату вимірювання. На основі виразу (14) отримано рівняння чутливості безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.

Досліджено питання квантування вимірювального перетворення безконтактного засобу контролю кутових положень. Повному оберту контрольованого валу відповідає 185040 значень вихідного коду, тобто  $514 \text{ град}^{-1}$ . Похибка квантування визначає нижню межу вимірювання засобу контролю кутових положень. Оскільки відносне значення похибки квантування складає  $\delta_{k\alpha} = N^{-1} \cdot 100\%$ , то даний засіб доцільно застосовувати при вимірюванні кутів, більших, ніж  $0,2^\circ$ .

У роботі виділено основні похибки розробленого засобу контролю. 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. 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. Максимальна зведена похибка розробленого засобу складає  $0,015\%$ . Розраховано вірогідність контролю кутових положень при використанні розробленого засобу, що дорівнює  $0,98$ .

**У додатках** наведено додаткові результати розрахунків та моделювання, схеми, фрагменти програмного забезпечення, алгоритми, таблиці, акти впровадження результатів роботи, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію.

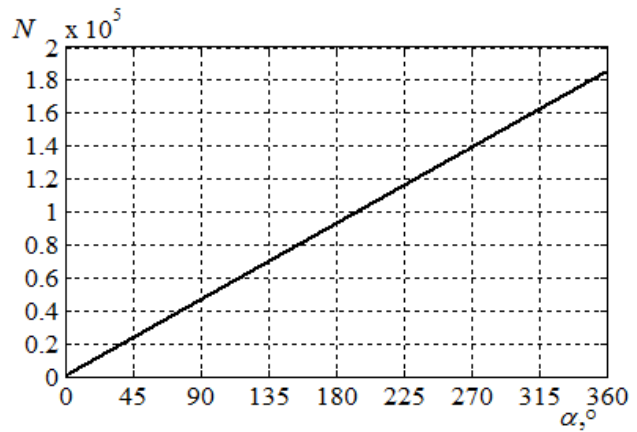


Рисунок 10 – Теоретична статична характеристика безконтактного засобу контролю кутових положень

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу підвищення вірогідності контролю кутових положень шляхом розроблення методу і безконтактного засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами. Результатом виконаних досліджень є такі висновки:

1. Проведено аналіз методів і засобів контролю кутових положень, запропоновано їх класифікацію за принципом зчитування, способом отримання інформації, способом кодування, діапазоном вимірюваних кутів та фізичним принципом роботи. Виявлено, що наявні на ринку сенсорної техніки механічні та потенціометричні прилади мають низьку точність і обмежену кількість робочих циклів, а перехідний процес муфти з'єднання обмежує мінімальне значення кута, що можна виміряти фотоелектричними приладами. Крім того, енкодер, який містить муфту з'єднання, не може бути встановлений на валах великого діаметру, у важкодоступних місцях. Обґрунтовано вибір безконтактних магнітних засобів для контролю кутових положень опорно-поворотних пристроїв, які, однак, не забезпечують потрібну вірогідність контролю. З'ясовано, що сенсори на основі автогенераторних пристроїв дозволяють підвищити чутливість і зменшити похибки вимірювання фізичних величин.

2. Вперше запропоновано метод контролю кутових положень тіл обертання на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, який відрізняється від існуючих 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. Розроблено структурну схему методу.

3. Розроблено сенсори кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із двостоковими та двоколекторними магніточутливими транзисторами, що дозволили підвищити чутливість і зменшити похибку вимірювання кутового положення. Теоретично встановлено й експериментально підтверджено залежності вихідної частоти розроблених сенсорів від кутового положення об'єкта (валу обертання), які відрізняються від існуючих тим, що магнітна індукція, пов'язана з кутовим положенням, перетворюється у вихідну частоту автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.

Чутливість сенсора кутових положень на основі автогенераторного пристрою із двоколекторним магнітотранзистором складає  $462 \text{ град}^{-1}$ , 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).

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

4. Розроблено безконтактний засіб контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами. Вперше запропоновано математичну модель вимірювального перетворення безконтактно-го 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. Розроблено електричні принципові схеми та програмне забезпечення засобу контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами.

5. Проведено експериментальні дослідження сенсорів кутових положень та засобу контролю кутових положень для перевірки розроблених математичних моделей. Похибка запропонованої моделі сенсорів кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами не перевищує 1,6 %.

6. Встановлено нормовані значення абсолютної, відносної та зведеної похибок засобу контролю кутових положень. Максимальна зведена похибка розробленого засобу складає 0,015%. Розраховано вірогідність контролю кутових положень при використанні розробленого засобу, що дорівнює 0,98.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях України

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

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.

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.

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.

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.

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.

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. (входить до наукометричної бази *Index Copernicus*)

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.

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

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

#### Статті у матеріалах конференцій

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

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. «Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2011»*, Praha, díl 17, s. 54–60.

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.

#### Тези доповідей

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.

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.

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

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

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.

#### Патенти України на винаходи та корисні моделі

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

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

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

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.

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.

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.

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.

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.

#### АНОТАЦІЯ

**Білилівська О. П. Метод і безконтактний засіб контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами. – 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. Запропоновано метод контролю кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із магніточутливими транзисторами, який відрізняється від існуючих безконтактним перетворенням кутового положення в синусний та косинусний частотні сигнали за допомогою автогенераторних пристроїв, що надало принципову можливість підвищення вірогідності контролю кутових положень.

Розроблено сенсори кутових положень на основі автогенераторних пристроїв із двостоковими і двоколекторними магніточутливими транзисторами та

їх математичні моделі, що дозволило підвищити чутливість і зменшити похибку вимірювання кутового положення.

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

Здійснено оцінювання метрологічних характеристик засобу контролю. Максимальна зведена похибка розробленого засобу складає 0,015%.

Проведено експериментальні дослідження, що підтверджують висунуті теоретичні положення. Вірогідність контролю кутових положень складає 0,98, що на 0,06 вище, ніж у відомих засобів.

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

## АННОТАЦИЯ

**Белиловская О. П. Метод и бесконтактное средство контроля угловых положений на основе автогенераторных устройств с магниточувствительными транзисторами. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля и определения состава веществ» (Технические науки). – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2018.

В диссертационной работе изложены результаты исследований, направленных на повышение достоверности контроля угловых положений путем разработки нового метода и средства контроля. Предложен метод контроля угловых положений на основе автогенераторных устройств с магниточувствительными транзисторами, который отличается от существующих бесконтактным преобразованием углового положения в синусный и косинусный частотные сигналы с помощью автогенераторных устройств, что позволило принципиально повысить достоверность контроля угловых положений.

Разработаны сенсоры угловых положений на основе автогенераторных устройств с двухстоковыми и двухколлекторными магниточувствительными транзисторами и их математические модели, что позволило повысить чувствительность и уменьшить погрешность измерения углового положения.

Разработано бесконтактное средство контроля угловых положений на основе автогенераторных устройств с магниточувствительными транзисторами, с помощью которого удалось повысить достоверность контроля. Предложена математическая модель, которая отличается от существующих тем, что описывает процессы преобразования физических величин «угловое положение – магнитная индукция – частота – цифровой код» и является уравнением преобразования средства контроля угловых положений.

Выполнено оценивание метрологических характеристик средства контроля. Максимальная приведенная погрешность разработанного средства не превышает 0,015%.

Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие выдвинутые теоретические положения. Достоверность контроля угловых положений составляет 0,98, что на 0,06 выше, чем в известных средств.

**Ключевые слова:** средство контроля, угловое положение, магниточувствительный транзистор, автогенератор, чувствительность, микроконтроллер, опорно-поворотное устройство, достоверность контроля.

## ABSTRACT

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

Candidate of engineering sciences (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. 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. The choice of magnetic type of the measurement methods and instruments was explained. An analysis of some scientific papers showed that self-oscillating devices for conversion of physical quantities based on reactive properties of semiconductor devices enable sensitivity increasing and measurement error reduction. A review of galvanomagnetic magnet-sensitive devices for controlling angular positions showed that magnet-sensitive transistors have much higher sensitivity than other galvanomagnetic transducers.

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 are derived.

A new method for angular position control based on self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors has been proposed. Its major difference from the existing methods is contactless conversion of angular position in 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.

The dependence of output frequency of the self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors on angular position of the object (rotation shaft) was theoretically established and experimentally confirmed. Obtained equations differ from existing, because magnetic field induction associated with the angular position of the ob-



ject is transforming into output frequencies of the self-oscillating devices with magnet-sensitive transistors. Angular position sensors based on self-oscillating devices with dual-drain and dual-collector magnet-sensitive transistors as well as their mathematical models have been developed, which enabled sensitivity increasing and angle measurement error reduction.

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 control. The mathematical model of the measuring transformation of the developed instrument has been proposed. 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 contactless instrument for control of angular position.

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 conventional error of the developed device does not exceed 0.015%.

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 a 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. It was calculated that the probability of controlling angular position by the developed device is 0.98, which is by 0,06 higher than that of the known instruments.

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

Підписано до друку 07.03.2018 р. Формат 29.7×42¼  
Наклад 80 прим. Зам. № 2018-064.  
Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.