

**ПРИЛАД КОНТРОЛЮ КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ
АВТОГЕНЕРАТОРНИХ МАГНІТОЧУТЛИВИХ ПРИСТРОЇВ**

Розроблено прилад контролю кутів положень з використанням автогенераторних магніточутливих пристроїв для стендів технічної діагностики паливних систем дизельних автомобілів. Наведено опис блок-схеми приладу, результати теоретичних та експериментальних досліджень автогенераторного магніточутливого пристрою, чутливість яких складає 390 Гц/мТл ... 560 Гц/мТл за значень індукції магнітного поля менше 40 мТл. Представлено схематичні та програмні рішення для побудови приладу контролю кутів положень. Сумарна систематична похибка приладу не перевищує 0,06%.

Ключові слова: кутове положення, контроль, автогенератор, чутливість, магніотранзистор.

V.S. OSADCHUK, A.V. OSADCHUK, O.P. BILYLIVSKA
Vinnytsa National Technical University, Vinnytsa, Ukraine

ANGULAR CONTROL DEVICE USING AUTO-GENERATING MAGNETO-SENSITIVE TRANSDUCERS

Abstract - This article offers a design of an improved angular control device for technical diagnostics of fuel systems of diesel vehicles. The use of auto-generating magneto-sensitive transducers makes possible to increase the sensitivity and the accuracy of the purposed device.

The description of the device block diagram is given. By the designing of the device structure the features of various systems of magnet and sensitive elements are taken into account. The results of theoretical and experimental studies of the auto-generating magneto-sensitive transducer show the linear dependence of the generated frequency on external magnetic field strength. The sensitivity of the transducer makes 390 Hz/mT ... 560 Hz/mT by the magnetic field strength less then 40 mT. The other schematic and software solutions for angular control device are presented.

The total systematic error of the device does not exceed 0,06%.

Keywords: angular position, control, auto-generating device, sensitivity, magneto-transistor.

Вступ

На сьогодні кутові енкодери широко застосовуються в металообробці, ліфтовій техніці, автоматах для фасування, в друкарській промисловості, випробувальних стендах, у роботах та інших машинах, що потребують точної реєстрації руху обертових частин. Зокрема, від чутливості та точності приладів контролю кутів положень для технічної діагностики паливних систем дизельних автомобілів залежить правильність прийняття рішень про придатність до роботи pomp високого тиску. Однак відомі прилади мають великі похибки, лінійну функцію перетворення лише в обмеженому кутовому діапазоні, низьку роздільну здатність, їх точність суттєво залежить від температури, що обумовлює зниження достовірності контролю кутів положень, а це, в свою чергу, призводить до зниження потужності та збільшення зносу деталей двигуна [1].

Вже кілька десятків років досліджуються методи контролю кутів положень з використанням зміни значення просторових складових вектора індукції магнітного поля, створеного рухомим магнітом. Гальваномагнітні сенсори характеризуються високою корозійною стійкістю, оскільки і сенсори, і навколишні об'єкти за необхідності покривають інертними матеріалами, що не впливають на магнітні поля. У порівнянні з фотоелектричними приладами, до складу яких входять світловопромінювальні діоди, вони мають більш просту конструкцію, вищу надійність, споживають менше енергії. Виходячи з принципу їх роботи, магнітні прилади контролю кутів положень дозволяють отримати високу роздільну здатність [2].

Крім того, аналіз ряду наукових робіт [3, 4] показує, що використання автогенераторних пристроїв на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором дозволяє підвищити чутливість і точність контролю фізичних величин. Тому задача розробки приладу контролю кутів положень на основі автогенераторних магніточутливих пристроїв є актуальною.

Метою роботи є підвищення чутливості та точності приладів контролю кутів положень за рахунок використання автогенераторних магніточутливих пристроїв.

Розробка структури приладу контролю кутів положень

Відомі на сьогодні гальваномагнітні прилади контролю кутів положень базуються на вимірюванні магнітного поля постійного магніту за допомогою одного чи декількох первинних перетворювачів (найчастіше це елементи Холла або магніторезистори) й обробці аналогового сигналу з використанням підсилювачів, аналогово-цифрових перетворювачів тощо. Найпростіша система вимірювання кута являє собою елемент Холла і розташований над ним діаметрально поляризований магніт [5, 6]. Обертання валу з встановленим на ньому магнітом викликає зміну магнітної індукції, за якою робиться висновок про кут повороту валу. Такий спосіб простий в реалізації, однак він дозволяє проводити вимірювання лише в діапазоні кутів положень $\pm 45^\circ$.

Для досягнення необхідної лінійності в діапазоні 360° обрано магнітну систему, яка містить два

чутливих елементи (ЧЕ1 та ЧЕ2), розташованих під кутом 90° між собою та до осі обертання (рис. 1, а).

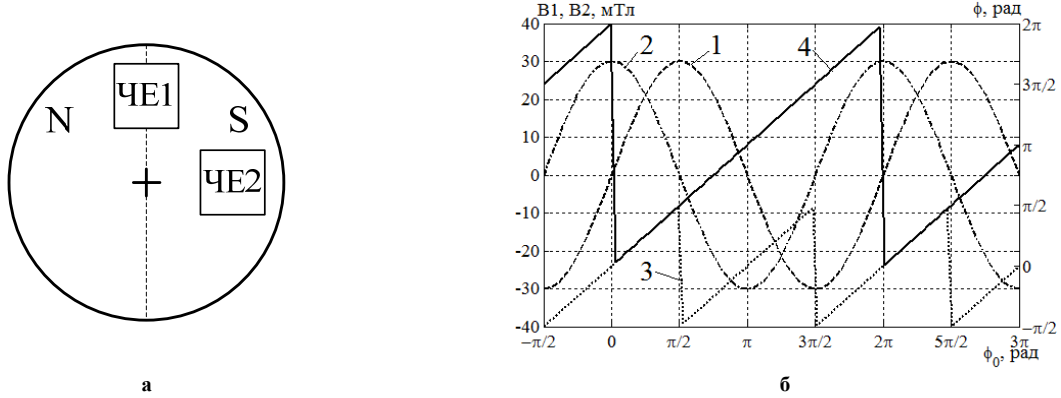


Рис. 1. Магнітна система приладу контролю кутових положень на основі двох чутливих елементів (а), графіки залежностей магнітної індукції і розрахованих кутів від кута повороту магніту (б)

У системах із двома чутливими елементами графіки зміни магнітної індукції в точках вимірювання при обертанні магніту мають вигляд синусоїд, зсув фаз між яким 90° : на рис. 1, б крива 1 – магнітна індукція в місці розташування ЧЕ1 (синусна складова), крива 2 – в місці розташування ЧЕ2 (косинусна складова). При цьому значення кут розраховується як

$$\varphi = \arctg\left(\frac{B_1 - B_0}{B_2 - B_0}\right) + \varphi_x, \tag{1}$$

де φ – фазовий зсув магнітного поля від нульової мітки, тобто вимірюваний кут;

$B_1 = B_0 + B_A \sin(\varphi)$ – синусна складова магнітної індукції;

$B_2 = B_0 + B_A \sin(\varphi + 90^\circ) = B_0 + B_A \cos(\varphi)$ – косинусна складова магнітної індукції;

B_0 – ненульове зміщення магнітного поля;

B_A – амплітудне значення магнітної індукції;

φ_x – кут для врахування знаків синусної та косинусної складових магнітної індукції.

Доданок φ_x у формулі (1) введено тому, що функція арктангенса (ламана 3 на рис. 1, б) має область значень від -90° до 90° , а це не дає можливості однозначно визначати кутові положення в діапазоні 360° . При врахуванні знаків синусної та косинусної складових магнітної індукції функція маємо

$$\varphi_x = \begin{cases} 0, & \text{якщо } (B_1 > B_0), (B_2 > B_0), \\ 180^\circ, & \text{якщо } (B_2 < B_0), \\ 360^\circ, & \text{якщо } (B_1 < B_0), (B_2 > B_0), \end{cases} \tag{2}$$

а розрахований кут лінійно пов'язаний із вимірюваним в діапазоні 360° (ламана 4 на рис. 1, б).

Для вимірювання синусної та косинусної складових магнітної індукції пропонується використати автогенераторні магніточутливі пристрої. Враховуючи те, що вихідним інформативним параметром автогенераторів є частота сигналу, побудовано блок-схему приладу контролю кутових положень (рис. 2).

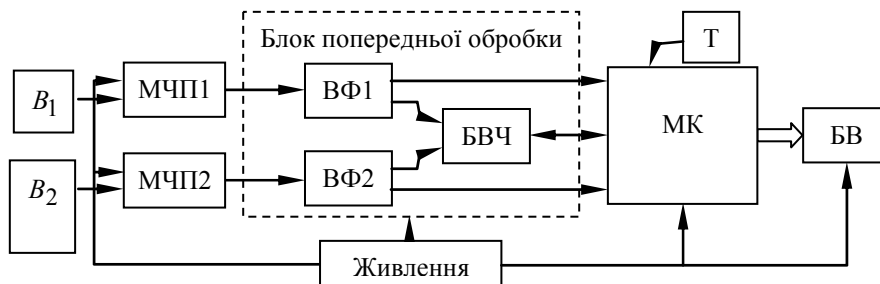


Рис. 2. Блок-схема приладу контролю кутових положень з використанням автогенераторних магніточутливих пристроїв

На схемі введено такі позначення: МЧП1 та МЧП2 – магніточутливі пристрої, що реєструють зміну відповідних векторів магнітної індукції; ВФ1 та ВФ2 – вхідні формувачі, які забезпечують перетворення сигналу до вигляду, рівень і форма якого відповідають вимогам до сигналів на цифрових входах мікроконтролера; БВЧ – блок вибору частоти; МК – мікроконтролер; БВ – блок виведення результатів вимірювання; Т – сигнал із сенсора температури.

При обертанні діаметрально намагніченого магніту створюється магнітне поле, індукція якого змінюється за законом синуса. МЧП1 та МЧП2 реагують на зміну синусної та косинусної складових магнітного поля. Частота сигналу на їх виході однозначно пов'язана зі значенням магнітної індукції. Вхідні формувачі ВФ1 та ВФ2 перетворюють гармонічний сигнал із виходів магніточутливих пристроїв в

однополярну напругу з рівнем 5 В , не змінюючи при цьому частоту. До складу схеми введено блок вибору частоти, який надсилає на вхід мікроконтролера, що відповідає за захоплення імпульсів, перший або другий вимірюваний сигнал.

Обробка частотних сигналів із автогенераторних магніточутливих пристроїв реалізована за допомогою мікроконтролера – пристрою, в якому інтегровано потужний процесор, оперативну та постійну пам'ять, а також набір додаткових периферійних пристроїв. Перевагами такого технічного рішення є простота схеми, економічність та можливість безпосереднього виконання обробки вимірюваної частоти (в даному випадку, розрахунку синусної та косинусної складових магнітної індукції з урахуванням сигналу із сенсора температури, розрахунку кутового положення, порівняння отриманого значення із заданим і виведення результатів).

Схемотехнічна та програмна реалізація приладу контролю кутових положень

При розробці приладу контролю кутових положень важливу роль відіграють параметри і характеристики автогенераторних магніточутливих пристроїв. Пристрої з частотною модуляцією вихідного сигналу мають високу завадостійкість (практично нечутливі до електромагнітних і радіохвильових завад), їх вихідний сигнал зручний для подальшої обробки з використанням мікропроцесорних пристроїв, оскільки не потребує аналогово-цифрового перетворення [3]. Поєднання зазначених переваг із лінійною залежністю вихідного сигналу від магнітного поля в широкому діапазоні значень магнітної індукції та високою чутливістю двоколекторних магніточутливих транзисторів (при тих самих робочих струмах їх чутливість на два-три порядки вища, ніж чутливість сенсорів Холла) [2, 4] дозволяє використовувати автогенераторні магніточутливі пристрої для вимірювання слабких магнітних полів. Електрична схема пристрою на основі двоколекторного магніточутливого транзистора [7] наведена на рис. 3, а.

Розглянемо принцип роботи автогенераторного пристрою. В початковий момент часу магнітне поле не діє на двоколекторний магнітотранзистор $VT1$. Підвищенням напруги керування $U1$ і напруги живлення $U2$ досягається така їх величина, що на електродах перший колектор і емітер транзистора $VT1$ виникає від'ємний опір, який приводить до виникнення електричних коливань в контурі, утвореному паралельним включенням повного опору з ємнісною складовою на електродах перший колектор і емітер транзистора $VT1$ та повного опору з індуктивною складовою на електродах емітер – колектор транзистора $VT2$. Резистори $R1...R4$ визначають режими живлення двоколекторного транзистора $VT1$. Ємність $C1$ і резистор $R5$ утворюють електричне коло з необхідним фазовим зсувом для здійснення повного опору з індуктивною складовою на електродах емітер – колектор біполярного транзистора $VT2$. Використання активного індуктивного елемента забезпечує можливість електричного регулювання величини індуктивності та добротності в широких діапазонах за рахунок зміни режиму електричного живлення. Ємність $C2$ запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги $U2$.

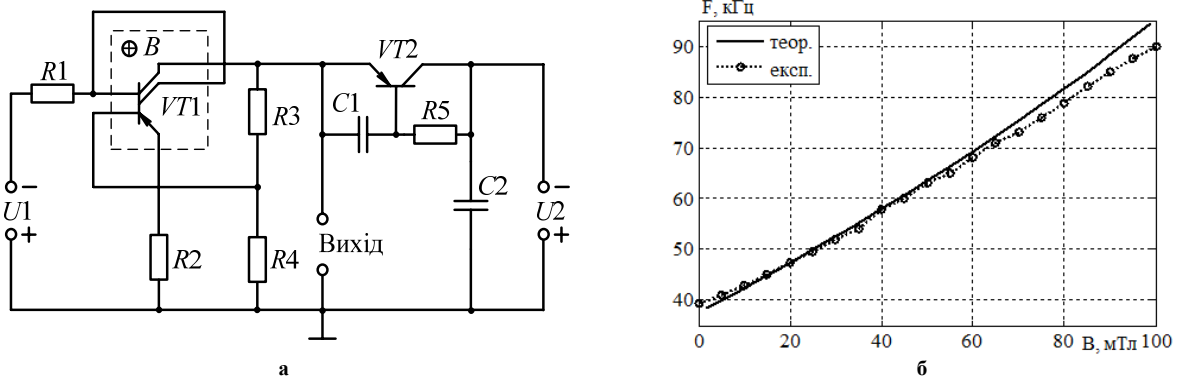


Рис. 3. Електрична схема автогенераторного магніточутливого пристрою на основі двоколекторного магнітотранзистора (а) і залежність частоти вихідного сигналу від магнітної індукції (б)

При дії магнітного поля на двоколекторний магнітотранзистор $VT1$ змінюється різниця напруга між його першим та другим колекторами, що обумовлює зміну ємнісної складової повного опору на електродах перший колектор та емітер двоколекторного магнітотранзистора $VT1$, а це викликає зміну резонансної частоти коливального контуру, тобто відбувається модуляція вихідного сигналу автогенераторного пристрою магнітною індукцією.

Резонансна частота пристрою (рис. 3, б) при керуючій напрузі $1,6\text{ В}$ та при напрузі живлення 5 В внаслідок дії магнітного поля індукцією від $0,05\text{ мТл}$ до 100 мТл змінюється від $38,5\text{ кГц}$ до 90 кГц , а чутливість пристрою складає $390\text{ Гц/мТл} \dots 560\text{ Гц/мТл}$ при значеннях індукції магнітного поля менше 40 мТл (діапазон зміни індукції поля постійного магніту), тобто чутливість є вищою, ніж у аналогів [3, 4].

Вхідний формувач (рис. 4, а) призначений для перетворення сигналу на прямокутний однополярний, регулювання амплітуди (підсилення або послаблення). Формувач не повинен працювати як шунт, тому його вхідний опір має бути високим, а вхідна ємність – малою. Крім того, сформований на

виході сигнал не повинен містити паразитних імпульсів, які можуть внести помилку у вимірювання частоти. Поріг чутливості розробленого входного формувача – 50 мВ, вхідний опір – 8 кОм, діапазон частоти – від 10 Гц до 400 МГц, максимальна амплітуда входного сигналу – 30 В.

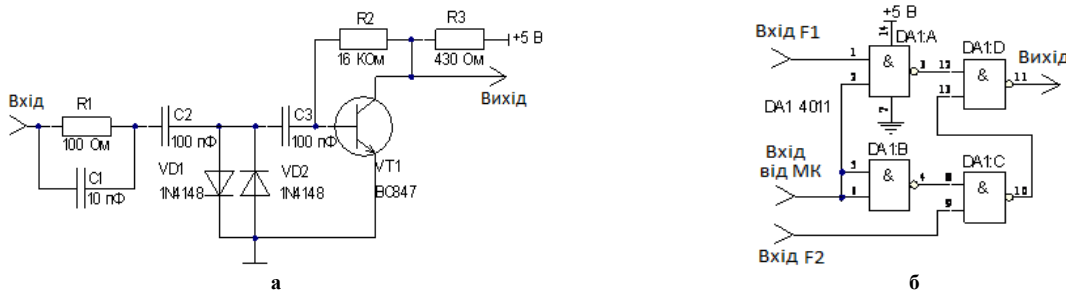


Рис. 4. Електричні схеми входного формувача (а) і блоку вибору частоти (б)

Блок вибору частоти (рис. 4, б) виконаний на основі мікросхеми 4011, що являє собою чотири двовходових елементи І-НЕ. При надходженні керуючого сигналу із мікроконтролера на вихід БВЧ проходить або перший (якщо $C=1$), або другий (якщо $C=0$) вимірюваний сигнал, тобто реалізується логічна функція:

$$Y = \overline{\overline{(X_1 \& C)} \& \overline{(X_2 \& \bar{C})}}, \quad (3)$$

де X_1 та X_2 – логічний сигнал у першому та другому вимірювальному каналах, відповідно;
 C – керуючий сигнал від МК («0» або «1», тобто керування за рівнем, а не за фронтом);
 Y – логічний сигнал на виході.

Блок вибору частоти використовується тому, що при вимірюванні двох частот за методом захоплення підрахунок кількості імпульсів системної частоти, що ставиться у відповідність кількості імпульсів кожної з входних частот, виконує один таймер мікроконтролера (тобто використовується три таймери – один для системних імпульсів, два – для входних).

За алгоритмом вимірювання спершу записуються початкові значення в таймерах першої входної (Timer2) і системної (Timer1) частот, потім на БВЧ надходить сигнал зміни частоти, записуються початкові значення в таймерах другої входної (Timer3) і системної частот. Через визначений проміжок часу описані дії повторюються для кінцевих значень кількості імпульсів, а потім розраховується їх різниця, тому зсув у часі між вимірюваннями двох частот складає всього один – два імпульси входної частоти. Підпрограма захоплення для МК ATmega64 має вигляд:

```
void Capture(void)
{
    PORTE |= (1<<5); //Надсилання логічної «1» на БВЧ
    TIFR = (1<<ICF1); //Скидання прапорця захоплення
    while ((TIFR & (1<<ICF1))==0); //Очікування наступного імпульсу
    Nref_1 = ICR1; //Запис системних імпульсів для F1
    Minp_1 = TCNT2; //Запис входних імпульсів F1
    PORTE &= ~(1<<5); //Надсилання логічної «1» на БВЧ
    TIFR = (1<<ICF1);
    while ((TIFR & (1<<ICF1))==0);
    Nref_2 = ICR1; //Запис системних імпульсів для F2
    Minp_2 = TCNT3; //Запис входних імпульсів F2
}
```

Значення вимірюваних частот розраховуються як

$$F_{1,2} = F_{зр} \cdot \frac{m_{1,2}}{n_{1,2}}, \quad (4)$$

де $F_{зр}$ – зразкова частота (системна частота МК);

$m_{1,2}$, $n_{1,2}$ – кількість імпульсів входної і зразкової частот, відповідно.

Подальша обробка інформації полягає у відновленні значень синусної та косинусної складових магнітної індукції за виміряними значеннями відповідних частот генерації. Це потребує використання функцій перетворення магніточутливих пристроїв на основі двоколекторних транзисторів. Оскільки функція перетворення (див. рис. 3, б) має високу лінійність, її можна було б апроксимувати прямою лінією, однак квадратичний поліном краще наближує модельовану функцію до реальної. Апроксимація функції перетворення є необхідною умовою, адже завантаження мікроконтролера виконанням додаткових

математичних операцій негативно впливає, в першу чергу, на швидкодію та точність контролю.

Після розрахунку значень магнітної індукції мікроконтролер обчислює кутове положення за формулою (1). Наступним кроком є порівняння отриманого значення із заданим і виведення результатів на дисплей (використовується дворядковий рідинно-кристалічний дисплей WH1602A із підключенням по чотирипровідній шині).

Результати аналізу метрологічних параметрів приладу контролю кутових положень показали, що сумарна систематична похибка не перевищує 0,06%.

Висновки

Запропоновано прилад контролю кутових положень з підвищеною чутливістю за рахунок використання автогенераторних магніточутливих пристроїв на основі двоколекторних магнітотранзисторів, чутливість яких до зміни індукції магнітного поля складає 390 Гц/мТл ... 560 Гц/мТл при значеннях індукції менше 40 мТл. Розроблено структуру приладу контролю кутових положень, наведено особливості його схемотехнічної та програмної реалізації. Поєднання переваг автогенераторних пристроїв із мікроконтролерною обробкою їх частотних сигналів дозволило підвищити точність приладів контролю кутових положень, сумарна систематична похибка яких не перевищує 0,06%.

Література

1. Byrd D. Closed-loop motor control: An introduction to rotary resolvers and encoders. Analog Applications Journal. 2014. № 2Q. P. 5–8.
2. Викулин И. М. Гальваномангнитные приборы / Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. – М. : Радио и связь, 1983. – 104 с.
3. Осадчук В. С. Сенсори тиску і магнітного поля : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 207 с.
4. Осадчук В. С. Перетворювач магнітного поля з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 5. – С. 149–154.
5. Щерба А. Магнитные энкодеры производства austriamicrosystems. Позиционирование магнита над корпусом микросхемы / А. Щерба // Компоненты и технологии. – 2008. – № 7. – С. 50–52.
6. Buschbaum A., Plassmeier V. P. Angle measurement with a hall effect sensor. Smart Materials and Structures. 2007. № 16. P. 1120–1124.
7. Osadchuk V. S., Osadchuk A. V. The Microelectronic Radiomeasuring Transducers of Magnetic Field with a Frequency Output. Electronics and Electrical Engineering. 2011. № 4 (110). P. 67–70.

References

1. Byrd D. Closed-loop motor control: An introduction to rotary resolvers and encoders, Analog Applications Journal, 2014, No. 2Q, pp. 5 – 8.
2. Vikulin I. M., Vikulina L. F., Stafeyev V. I. Galvanomagnitny'e pribory. Moscow, Radio I Sviaz, 1983, 104 p. [in Russian]
3. Osadchuk V. S., Osadchuk A. V. Sensory tysku i magnitnogo polia: monografiya. Vinnytsia, Universum-Vinnytsia, 2005, 207 p. [in Ukrainian]
4. Osadchuk V. S., Osadchuk A. V., Bilylivska O. P. Peretvoruvach magnitnogo polia z chastotnym vykhodom, The Bulletin of Khmelnytsky National University, 2011, No 5, pp. 149 – 154. [in Ukrainian]
5. Shherba A. Magnitny'e e'ncodery proizvodstva austriamicrosystems. Pozicizionirovani'e magnita nad korpusom mikrosxemy, Komponenty i tehnologii, 2008, No 7, pp. 50 – 52. [in Russian]
6. Buschbaum A., Plassmeier V. P. Angle measurement with a hall effect sensor, Smart Materials and Structures, 2007, No 16, pp. 1120 – 1124.
7. Osadchuk V. S., Osadchuk A. V. The Microelectronic Radiomeasuring Transducers of Magnetic Field with a Frequency Output, Electronics and Electrical Engineering, 2011, No 4 (110), pp. 67 – 70.

Рецензія/Peer review : 25.06.2014 р. Надрукована/Printed : 1.10.2014 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Т. Б. Мартинюк