

МОБИЛЕН БЕЗКОНТАКТЕН АМПЕРМЕТЪР**Г.Н. Величков¹, С.В. Лозанова¹**

¹ *Институт по роботика при Българска Академия на Науките
Ул. "Акад. Г. Бончев", бл.2, София 1113, България
Email: lozanovasi@abv.bg*

MOBILE CONTACTLESS AMMETER**G.N. Velichkov¹, S.V. Lozanova¹**

¹ *Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences
"Acad. G. Bonchev" Str., Bl.2, Sofia 1113, Bulgaria
Email: lozanovasi@abv.bg*

Abstract

The functional approach to the multisensors allows the achievement of the desired electronic properties. Some unexpected results have led to the question - what else in addition to the conversion of magnetic energy into an electric signal is "hidden" in the active regions of elements. Invention related to mobile contactless ammeter devised and applicable in control measurement technology, robotic systems with artificial intelligence, industrial manufactures, and energy measurement is presented in this paper. The new ammeter is based on contactless principle using modification of multisensor for magnetic field and temperature. Output signals as a function of the external field and temperature are linear and their polarity depends from magnetic field direction. The ammeter instrument contains sensor configuration and signal processing module situated on mobile robotized platform. The new solution is very suitable for power and current registration in many industrial applications. The achieved advantages are: improved conversion effect of the measurement system, simple construction, linear output signals and high precision measurement of magnetic induction. The mobile contactless ammeter via multisensor device is an original solution for precise automation control with high quality temperature compensation. Conducted pilot experiments with prototypes of this ammeter prove its practical feasibility in automation and robotics.

Keywords: multisensor, Hall effect devices, in-plane sensitive silicon elements, mobile contactless ammeter, robotics

ВЪВЕДЕНИЕ

Съществуват решения на безконтактен амперметър с висококоерцетивен тороиден магнит, през средната част на който преминава силов електрически кабел, свързан към товар, за който се осъществява измерване на консумирания ток. Тороидът е конструиран с тесен радиален процеп, в който е закрепен елемент на Хол с ортогонално магнитно активиране. Двата му входа са свързани към токоизточник, а двата изхода са диференциален изход за амперметъра, [1 - 7]. При известните безконтактни амперметри са използвани класическите ортогоналните елементи на Хол. Обхватът на прило-

жение при съществуващите решения на такъв тип измервателни инструменти, има ограничения, породени от задължителното преминаване на силовия кабел през отвора на тороидалния магнит, [4,5]. По този начин се елиминират случите при измерване на ток в стационарно поставени кабели в хоризонтални равнинни повърхности. Като недостатък се явява и нелинейността на изхода на сензора, тъй като силовият кабел винаги трябва да е в средата на тороида. Важно условие е да няма утечка на магнитните силови линии извън тороида и съответното непропорционално разпределение на потока, въздействащ върху активната

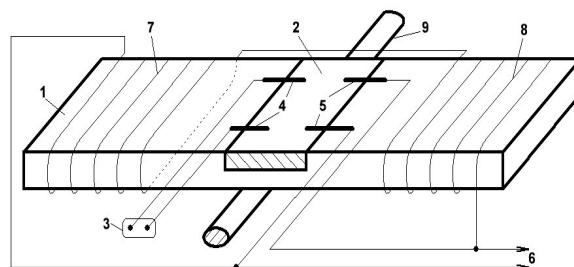
повърхност на ортогоналния елемент на Хол, поставен в тесния процеп. Тези условия изискват усложнена технологична настройка. В литературата и фирмените проспекти отсъства информация за приложение в този клас контролно-измервателна технология на съвременните, с по-висока ефективност и повишени функционални възможности сензори и мултисензори с равнинна магниточувствителност. Тяхна специфична особеност е, че всички контакти са планарни, т.е. те са разположени само от едната страна на полупроводниковата подложка – най-често силициева, а векторът на магнитното поле B е успоредно на равнината на чипа.

Основната цел на изследването е да бъде конструиран и тестван безконтактен амперметър, използващ многофункционалните сензори и мултисензори с равнинна чувствителност. Насочеността на разработката е да се обхванат решенията, когато силовият кабел не е възможно да преминава през тороида, а изходът се налага да е във висока степен линеен. Такива системи са наложителни в индустрията и автоматизацията на производството, [1].

АРХИТЕКТУРА И ФУНКЦИОНИРАНЕ НА АМПЕРМЕТЪРА

Новата архитектура на безконтактният амперметър съдържа висококоерцитивен продълговат магнит, линеен с равнина чувствителност сензор на Хол или мултисензор за магнитно поле и температура, разработен в Института по роботика при БАН и токоизточник. В средната част на продълговатия магнит е формирана зона, в която се поставя магниточувствителния елемент, [7-12]. Входните контакти на сензора са свързани към токоизточник, а изходните формират диференциалния изход на амперметъра. Изходните контакти са съединени с двата края на меден проводник, който е навит едноразочно в две еднакви, последователно свързани бобини. Тези бобини са разположени върху магнита, симетрично спрямо средната му част. Магнитът се поставя перпендикулярно върху силов кабел, свързан към товар. Действието на безконтактният амперметър се илюстрира с Фиг.1.

Както е известно безконтактното измерване на тока I_0 се заключава в регистрацията на стойността на магнитното му поле B_0 без разкъсване на силовата верига 9.



Фиг. 1. Модул на безконтактен амперметър с положителна обратна връзка

Този иновативен подход се различава от класическата за целта метрология, основаваща се на прекъсване на кабела 9 и свързване на еталонен резистивен шунт, [1,2, 4-6]. В нашия случай, Фиг. 1, се използва сензор 2, който изпълнява ролята на преобразователен елемент с линеен изходен сигнал 6. Висококоерцитивният продълговат магнит 1, разположен в непосредствена близост до силовия кабел 9, свързан с товара, служи като концентратор на магнитния поток Φ , генериран от протичащия в кабела 9 ток I_0 . Необходимостта от висок коерцитивен коефициент μ_r или магнитна проницаемост, е постигане на съществено увеличаване концентрацията на магнитните силови линии Φ в активната преобразователна област на сезорния елемент 2. По такъв начин се повишава изходният сигнал – напрежението на Хол V_A , $V_A \sim I_0$. Коефициентът μ_r показва в каква степен магнитното поле B_0 на тока I_0 се „задържа“, респективно усилва с магнитния концентратор 1. Най-общо, ефективната стойност на магнитната индукция B се определя с израза $B \sim \mu_0 \mu_r$, където μ_0 е магнитната проницаемост във вакуум. Същевременно с разполагане на елемента 2 с равнинна чувствителност в средната част на магнита 1, в стесения участък и непосредствено до сензора 2 се постига допълнително повишаване концентрацията на магнитните силови линии Φ . Тази конфигурация магнит 1 - сензор 2 осигурява максимална част от потока Φ да попадне в преобразователната област на елемента 2.

Перпендикулярното разположение на концентратора 1 по отношение на силовия кабел 9 предоставя възможност за максимална близост на генерираното от тока I_0 магнитно поле B_0 към сензорния елемент 2. Също така се осъществява възможност за оптимална взаимна ориентация на магнитния поток Φ , циркулиращ около силовия проводник 9 спрямо най-чувствителната преобразователна зона на сензорния елемент 2. В резултат на това техническо решение се постига високо ниво в изходния сигнал 6, $V_A(B_0) \sim V_A(I_0)$. Всяка друга ориентация, въпреки че предоставя пропорционален магнитен поток Φ през сензора 2, чувствителността (преобразователната ефективност) се намалява в резултат на неефективната ориентация. Напрежението $V_A(I_S)$ на изхода 6, след подходяща схемотехническа обработка и калибриране, предоставя информация за силата на протичащия ток I_0 през кабела 9. Допълнително повишаване на точността на измерване, съответно чувствителността на безконтактния амперметър, реализиран съобразно Фиг.1, се постига с иновативен подход – собствена положителна обратна връзка. Тя се осъществява с еднопосочно навит меден проводник, формиращ две еднакви, съединени последователно бобини 7 и 8, разположени симетрично спрямо средната зона на магнитната пластина 1. Двата края на бобините са свързани с изходните контакти на сензорния елемент 2. Положителната обратна връзка дава допълнително и съпосочно магнитно поле с основното, генерирано от тока I_0 , $B(I_0)$. Важна особеност на този метод е линейността на този вторичен сигнал от положителната обратна връзка, тъй като самият изход на мултисензора 2 е линеен.

РЕАЛИЗАЦИЯ НА МАГНИТОМЕТЪРА И РЕЗУЛТАТИ

Положителният ефект на новото техническо решение се състои в безконтактно измерване на тока I_0 , реализирано за първи път със сензорен елемент с равнинна чувствителност, адекватно комбиниран с продълговат магнит. С този способ са преодоляни проблемите, свързани с използването на тороиден магнит и класическите ортогонални сензори на Хол. Освен това е пови-

шена точността на магнитометъра чрез конструктивни изменения, адекватни на равнинно-чувствителния подход в ефекта на Хол. Като магниточувствителни елементи 2 с равнинна чувствителност могат да се използват сензори на Хол с три, четири, пет или шест планарни контакта, които са предложени и реализирани от Руменин и Лозанова, [3,7,8,11-14]. В нашият случай в безконтактния амперметър е използван мултисензор за магнитно поле и температура. Този силициев градивен елемент позволява с една и съща преобразователна област в чипа, да се измерват едновременно и независимо силата и посоката на магнитното поле B , както и температурата на околната среда T , [7-13]. В новото техническо решение, използването на мултисензор има важно предимство. С нивото на температурния сигнал $V(T)$ и подходяща компенсационна схема, може успешно да се сведе до минимум негативното влияние на температурата на средата, която влияе негативно на нивото в изходните сигнали 6 от сензора, особеност характерна за всички полупроводникови преобразователи 2. Така се повишава стабилността на показанията за тока в товара I_0 и се елиминира добавения температурен дрейф в изходите 6.

Максималната относителна грешка при измерването на тока и напрежението се определя от точността на измервателната апаратура. В използваните от нас измервателни устройства – дигитални амперметри и волтметри грешката съставлява $\pm 0.05\%$. Захранването на системата е осъществено комбинирано: чрез блок V&A Instrument (HY 3005 D-2, HY 5003 - 2, HY 5003, HY 3005 D) както и HP 34401A и UNI-T – UTP3315TFL. В експериментите са използвани също цифрови мултиметри от висок клас - HP 34401 A и BK Precision 5492 B. Проведени са и температурни изследвания на новия амперметър при $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ и $T = 60\text{ }^\circ\text{C}$. Този параметър е регистриран с дигитален термометър на фирмата Bosch. Грешката при температурните измервания в интервала $10\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 80\text{ }^\circ\text{C}$ е $\sim \pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$. Информацията за стойността на магнитното поле B се получава от монтиран високоточен n -GaAs сензор на Хол тип KSY 14 на фирмата Siemens. Грешката при измерването на

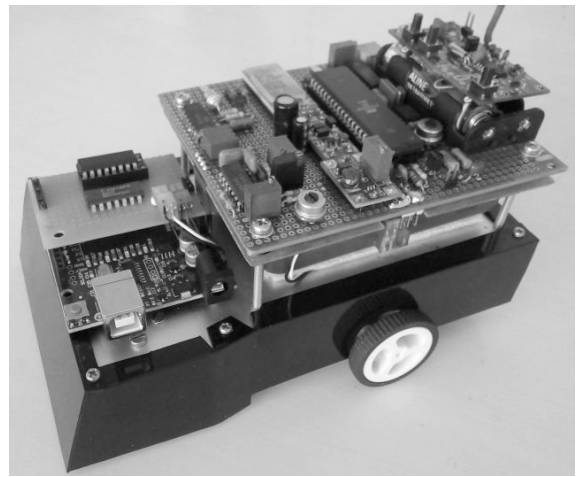
магнитната индукция е сума от отделните грешки на полупроводниковия сензор, регистриращ полето B , обработващата сигнала електроника и грешката от калибрирането на измерващия Хол елемент. На практика всяка от тези грешки е около $\pm 0.3\%$. От тук следва, че общата грешка при определянето на магнитната индукция B е не повече от $\sim \pm 1.0\%$. В нашите изследвания е използван тесламетър на швейцарската фирма *Schaefer*.

Тъй като поставените цели и задачи са изследователски, експерименталната точност е напълно достатъчна и е както в други европейски лаборатории за такъв вид измервания.

Реализираният безконтактен амперметър използва базовата архитектура от Фиг.1 и измерва променлив ток, но е възможно и регистрирането на постоянен ток с незначителни корекции в схемотехниката при обработка на изходните сигнали 6.

За реализацията на продълговатия магнит 1, може да се използват магнитни сплави от пермалой (желязо-никелова стомана), ферит, μ -метал, които са в непосредствена близост до сензорния елемент 2. Това е удобен подход при серийно производство. Оптималната стойност на висококоерцетивния коефициент μ_r на магнита 1, препоръчително следва да е $\mu_r \sim 1000$. За постигане на още по-висока точност в някои специфични приложения, особено за целите на контратероризма, устройството от Фиг.1 може да се охлади до криогенни температури, например среда от течен азот $T = 77\text{ K}$ ($T = -200\text{ }^\circ\text{C}$). Чувствителността нараства пет пъти предвид увеличената подвижност на електроните μ_n също около пет пъти, [15].

Безконтактният амперметър е реализиран върху автономна мобилна роботизирана платформа Фиг2., с елементи на изкуствен интелект. Роботът може да измерва тока I_0 в хоризонтално позиционирани силови кабели 9 в индустриални помещения при наличие, например, на стругове, бормащини, преси, леярни пещи и т.н. Функционирането на робота е оптимално, когато тези кабели са разположени на места, които да осигуряват перпендикулярно позициониране на амперметричния модул, Фиг. 1, към силовия кабел 9.



Фиг. 2. Прототип на мобилен безконтактен амперметър

Измерването на силата на тока I_0 , неговата температурна компенсация, амплитудата и честота се обработват от контролер в реално време. Получените данни за тези параметри се изпращат към компютър по безжичен интерфейс за допълнителни анализи и съхранение. Тази магнитометрична архитектура предоставя информация, чрез която се постига оптимален разход на ток и енергия в индустриални помещения, както и екологичен ефект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализиран е мобилен безконтактен амперметър за променлив ток, Фиг. 2. В амперметричния модул е използван мултисензор за магнитно поле и температура с равнинна чувствителност и продълговат магнитен концентратор. Подобрена е преобразователната ефективност на системата, повишавайки плътността на силовите линии. Така съществена част от магнитното поле, генерирано от тока в силовия кабел се „прихваща“ и насочва максимално към активната зона на равнинно-чувствителен сензорен елемент. С опростената конструкция на амперметричния модул отпада усложненото технологично решение за използване на тороиден магнит с процеп и продължителното преминаване на силовия кабел в средната му част. Предимство е линейността в изходния сигнал от пропорционално преминаващия магнитен поток през активната зона на сензора, независимо от разположението на силовия кабел спрямо

концентратора, като максималният изходен сигнал се получава при взаимната им ортогоналност. Повишена е измервателната точност в резултат на: увеличение на изходния сигнал. Това се постига от разполагането на продълговатия концентратор в непосредствена близост до сензора и използваната за първи път положителна обратна връзка, осъществена чрез свързване изхода на сензорния елемент с две еднопосочно навити бобини. Проведените пилотни експерименти с прототипи на този вариант на амперметър доказват практическата му целесъобразност в безконтактната автоматика и роботиката.

REFERENCE

- [1] Velichkov GN, Lozanova SV, Roumenin CS. Contactless ammeter, Reg. № 113463/20.12.2021.
- [2] Ramsden E. Hall-Effect Sensors – Theory and Application 2nd ed. Newnes-Elsevier. Oxford 2006. ISBN: 978-07506-7934-3.
- [3] Roumenin Ch. Solid State Magnetic Sensors. Elsevier. Amsterdam 1994. p.450. ISBN: 0 444 89401.
- [4] Wais G. Physics of galvanomagnetic semiconductor devices, Energy, Moscow, 1974.
- [5] Siemens. Magnetic Sensors. Data Book 07.96. Publ. by Siemens AG 1996.
- [6] Popovic R. Hall Effect Devices 2^{ed}. The Adam Hilger series on sensors. Bristol. IOP Publ. Ltd. 2004. ISBN: 0 7503 0855 9.
- [7] Roumenin Ch. Microsensors for magnetic field. Chapter 9. in “MEMS – a practical guide to design, analysis and applications” ed. by Korvink J. and Paul O., William Andrew Publ. USA 2006, pp. 453-523; ISBN: 0-8155-1497-2.
- [8] Roumenin CS, Kostov PT. In-plane sensitive Hall sensor, BG patent № 37208 B1/26.12.1983.
- [9] Roumenin CS. Bipolar magnetotransistor sensors – An invited review, Sensors and Actuators, A 24 (1990) 83-105.
- [10] Roumenin CS. Parallel-field Hall microsensors – An overview, Sensors and Actuators, A 30 (1992) 77-87.
- [11] Roumenin CS. Magnetic sensors continue to advance towards perfection, Invited paper, Sensors and Actuators, A 46-47 (1995) 273-279.
- [12] Lozanova SV, Roumenin CS. Paralell-field silicon Hall effect microsensors with minimal design complexity, IEEE Sensors Journal, 9(7) (2009) 761-766.
- [13] Kaufmann T. On the offset and sensitivity of CMOS-based five-contact vertical Hall devices, in MEMS Technology and Engineering, v. 21, Der Andere Verlag, 2013, p. 147.
- [14] Sander C, Leube C, Paul O. Three-dimensional magnetometer based on subsequent measurement principle, Sensors and Actuators, A 222 (2015) 329-334.
- [15] Sze SM. Physics of Semiconductors, 2nd ed., Wiley-Intersc. Publ., John Wiley & Sons, New York, 1994.