

©2012 р. З.Ю. Готра¹, Р.Л. Голяка¹, В.Ю. Ільканич¹, І.М. Годинюк²,
О.В.Бойко³

¹Національний університет "Львівська політехніка", Львів

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці

³Львівський національний медичний університет, Львів

ВИСОКОСТАБІЛЬНИЙ ГАЛЬВАНОМАГНІТНИЙ СЕНСОР З ЧАСОВИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ НА КОМУТОВАНИХ КОНДЕНСАТОРАХ

Наведено нові підходи стабілізації режимів роботи гальваномагнітних перетворювачів пристроїв вимірювання магнітного поля на інтегральних структурах латеральних магнітотранзисторів. Основними результатами є схемні рішення мікропроцесорних сигнальних перетворювачів часового типу на комутованих конденсаторах в колекторних колах магнітотранзистора.

Ключові слова: сенсор магнітного поля, магнітотранзистор, стабілізація.

Приведены новые подходы стабилизации режимов работы гальваномагнитных преобразователей устройств измерения магнитного поля на интегральных структурах латеральных магнитотранзисторах. Основными результатами являются схемные решения микропроцессорных сигнальных преобразователей часового типа на коммутируемых конденсаторах в коллекторных цепях магнитотранзистора.

Ключевые слова: сенсор магнитного поля, магнитотранзистор, стабилизация.

The work gives new approaches to operating mode stabilization of magnetic-field sensor devices based on the lateral magnetotransistor integral structures. The main results are schematics microprocessor signal converters hour type on switched-capacitor circuits in the collector magnetotransistor.

Keywords: magnetic field sensor, magnetotransistor, stabilization.

Вступ

Магнітотранзистори відносять до сучасних класів сенсорів магнітного поля [1,2]. Їх характеризує висока магнітна чутливість, простота виконання в складі інтегральних схем, низьке енергоспоживання та можливість багатофакторного керування режимами роботи. У складі МДН (метал-діелектрик-напівпровідник) сенсори магнітного поля базуються на структурах МДН транзисторів з розщепленим стоком, а в складі біполярних інтегральних схем – на структурах біполярних транзисторів з розщепленим колектором. Такі структури називають двостоковими або двоколекторними магнітотранзисторами [3, 4].

Розрізняють вертикальні (типово, *n-p-n* типу провідності) і латеральні (типово, *p-n-p* типу провідності) біполярні структури двоколекторних магнітотранзисторів. Вісь чутливості за магнітним полем вертикальних

магнітотранзисторів є паралельною, а латеральних – перпендикулярною до поверхні кристала [5, 6].

Нами розглядаються нові підходи стабілізації режимів роботи гальваномагнітних перетворювачів пристроїв вимірювання магнітного поля на інтегральних структурах латеральних магнітотранзисторів. Визначальною для даної праці є схемотехніка сигнального перетворювача на комутованих конденсаторах. Ця схемотехніка передбачає перехід з традиційних лінійних сигнальних перетворювачів неперервної дії на перетворювачі з часовою детермінацією, що реалізуються на динамічно комутованих конденсаторах [7, 8]. Перехід з переважно резистивних кіл сигнального перетворення на кола з комутованими конденсаторами відкриває нові можливості, зокрема, як і для сигма-дельта модуляторів, забезпечується ефективно перетворення сигналу у двійко-

вий код без використання традиційних аналого-цифрових перетворювачів [9].

Використання схемотехніки на комутуваних конденсаторах у сигнальних перетворювачах сенсорних пристроїв на магнітотранзисторах особливо актуально, адже на відміну від інших гальваноманітних перетворювачів, зокрема, холлівських сенсорів, інформативними сигналами магнітотранзисторів є не потенціальні, а струмові кола. Відтак, заміна традиційного резистивного навантаження колекторних кіл магнітотранзисторів на конденсатори дозволяє реалізувати часовий метод вимірювального перетворення. Інформативною величиною такого вимірювального перетворення є тривалість часу, протягом якого напруга на конденсаторі навантаження колекторного кола магнітотранзистора досягне заданого порогового рівня. Цифровий код формується лічильником, який керується компаратором рівня напруги і підраховує кількість тактових імпульсів, протягом яких відбувається заряд конденсатора.

1. Структура та принцип функціонування перетворювачів

Фотографія інтегральної структури магнітотранзистора, що використовується як первинний перетворювач пристрою вимірювання магнітного поля, наведена на рис. 1а, а його еквівалентна схема (електрична схема заміщення) – на рис. 1б. Структура магнітотранзистора утворена чотирма ортогонально розверненими двоколекторними *p-n-p* транзисторами, конструкція яких оптимізована з точки зору високої магнітної чутливості. Емітерна область (*E*) магніто-

транзистора формується між двома колекторними областями (C_1, C_2), різниця струмів яких є функцією обумовленого силою Лоренца відхилення носіїв заряду і слугує інформативним сигналом сенсора магнітного поля. Підвищення коефіцієнта передачі струму структури магнітотранзистора забезпечується дрейфовим полем бази і реалізується двома базовими електродами (B_1, B_2).

На еквівалентній схемі два транзистори T_1, T_2 визначають струми магнітотранзистора при відсутності магнітного поля, а функціонально кероване джерело G_1 визначає перерозподіл струмів між двома колекторами структури при дії на неї магнітного поля. Крім того, транзистор T_3 і функціонально кероване джерело G_2 визначають паразитний вплив підкладки інтегральної структури на вихідні струми магнітотранзистора. Ця підкладка у біполярних інтегральних схемах *p*-типу провідності, функціонує як колектор паразитного транзистора, що екстрагує носії заряду з області бази, а відтак, зменшує колекторні струми магнітотранзистора. Омічна структура між двома виводами бази B_1, B_2 реалізована резистором R_B , опір якого модулюється магнітним полем B .

Корисний для типових одновимірних сенсорів магнітного поля перерозподіл струму між колекторами латерального магнітотранзистора базується на відхиленні траєкторії руху інжектованих емітером носіїв заряду, що дрейфують у електричному полі бази. У відповідності до фізичних основ взаємодії рухомих носіїв заряду з магнітним полем, відхилення відбувається у перпендикулярній до вектора індукції поля площині.

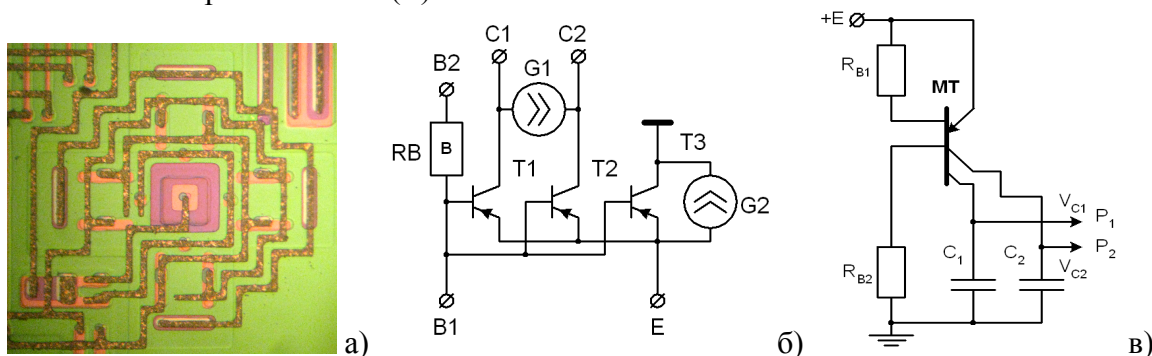


Рис. 1. Інтегральна структура магнітотранзистора (а) та його еквівалентна схема (б). Елементарна схема сигнального перетворювача з ємнісним навантаженням колекторних кіл магнітотранзистора (в).

Для наведеної на рис.1б структури величина перерозподілу струму між колекторами C_1 і C_2 визначається проекцією B_Z індукції поля на нормаль до поверхні інтегральної структури. Паразитний перерозподіл струму обумовлений відхиленням носіїв у перпендикулярній до поверхні інтегральної структури площині. Це відхилення обумовлене дією паралельної до площини структури і перпендикулярної до вектора електричного поля (вісь Ox) базової області проекції вектора поля B_Y .

Вказаний механізм магнітної модуляції процесів переносу струму в структурах інтегральних магнітотранзисторів дозволяє отримати інформативні сигнали для визначення двох ортогональних проекцій вектора магнітного поля $B_Z=B\cos\alpha$, $B_Y=B\sin\alpha$, де α – кут нахилу між вектором індукції поля B та нормаллю до поверхні інтегральної структури (нормаль \vec{N} в нашому випадку співпадає з віссю O_Z системи координат).

Принцип функціонування сигнального перетворювача двокоординатних сенсорів магнітного поля на латеральних магнітотранзисторах передбачає вимірювання колекторних струмів I_{C1} , I_{C2} . Різницеve і сумарне значення цих струмів використовується для розрахунку B_Z і B_Y проекцій вектора індукції поля.

Вимірювання струмів I_{C1} , I_{C2} проводиться шляхом визначення часу заряду конденсаторів колекторних кіл магнітотранзистора. Елементарна схема сигнального перетворювача з ємнісним навантаженням колекторних кіл магнітотранзистора наведена на рис.1в. Струм базового кола магнітотранзистора МТ задається резисторами R_{B1} , R_{B2} . Інформативними величинами процесу вимірювання є часова залежність напруг V_{C1} , V_{C2} на конденсаторах C_1 , C_2 . Схема керується мікропроцесором (мікроконтролером), лічильник якого забезпечує безпосереднє формування двійкового коду без використання аналого-цифрових перетворювачів.

Типові епюри напруг у процесі вимірювального перетворення наведені на рис.2. Процес вимірювання відбувається циклічно

з періодом T (епюра $E1$). Тривалість пауз t_s між вимірюваннями визначається кількістю вимірювань за одиницю часу. Тривалості t_{M1} (епюра $E2$) і t_{M2} (епюра $E3$) процесів заряду конденсаторів до заданого порогового рівня V_{HR} визначаються співвідношеннями:

$$t_{M1} = \frac{C_1 \cdot V_{HR}}{I_{C1}}, \quad t_{M2} = \frac{C_2 \cdot V_{HR}}{I_{C2}}.$$

Можливі декілька алгоритмів реалізації процесу вимірювання інформативних сигналів. Зокрема, для визначення B_Z проекції вектора індукції магнітного поля необхідно виміряти різницеву складову сигналу. Для цього використовують лише один лічильник, який підраховує кількість тактів N_M між моментами досягнення напругою на конденсаторах C_1 , C_2 порогового рівня V_{HR} (епюра $E4$). Для вимірювання B_Y проекції необхідно виміряти сумарну складову сигналу. Для цього використовують два лічильники, які підраховують кількість тактів N_{M1} і N_{M2} (епюри $E5$, $E6$, відповідно). Універсальний алгоритм вимірювання різницевої і сумарної складових інформативних сигналів можна реалізувати і за допомогою лише одного лічильника. Спочатку цей лічильник підраховує кількість імпульсів N_{M1} , протягом яких відбувається заряд конденсатора з меншим часом заряду, а тоді, після обнулення, підраховує кількість імпульсів $N_M=N_{M2}-N_{M1}$.

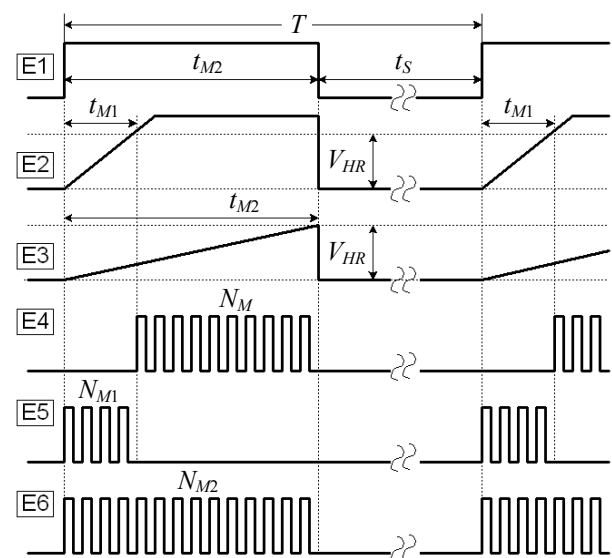


Рис. 2. Типові епюри напруг у процесі вимірювального перетворення.

Різницевою складовою сигналу такого вимірювання є N_M , а сумарною – $2N_{M1} + N_M$.

2. Стабілізації режимів роботи перетворювачів

Наведене в даній праці нове схемне рішення високостабільного магнітотранзисторного сенсора з часовим перетворенням на комутованих конденсаторах, яке забезпечує стабілізацію роботи пристрою при дрейфі напруги живлення, має особливу актуальність у низьковольтних пристроях з малопотужними джерелами живлення (акумулятори, сонячні батареї тощо). У відповідності до запропонованого рішення таке перетворення здійснюється без прецизійних аналого-цифрових перетворювачів і базується на вимірюванні часу заряду конденсаторів, що слугують динамічним навантаженням колекторних кіл магнітотранзисторів.

Структурна схема базового варіанту розробленого сигнального перетворювача (рис.3) складається з формувача протифазних напруг на OA_1 і T_1 , кола стабілізації емітерного струму магнітотранзистора MT на OA_2 , опорної інтегруючої ланки часового перетворення на OA_3 , конденсаторів динамічного навантаження C_1, C_2 та трьох компараторів CM_1, CM_2, CM_3 .

Висока стабільність роботи при зміні напруги живлення забезпечується сигнальним перетворенням, яке ініціюється імпульсом опорної напруги V_{REF} . Керування процесом вимірювання, формування тактових імпульсів, вимірювання часових інтервалів заряду конденсаторів тощо здійснюється на основі програмованих систем на кристалі – *PSoC (Programmed System on Chip)* компанії *Cypress* [10].

Початкове перетворення опорної напруги здійснюється формувачем протифазних напруг на операційному підсилювачі OA_1 та польовому транзисторі T_1 . Внаслідок дії від'ємного зворотного зв'язку напруга на витоці транзистора T_1 дорівнює опорній напрузі V_{REF} , а падіння напруги V_{R4} на резисторі R_4 в колі витоку становить

$$V_{R4} = \frac{V_{REF} R_4}{R_1 + R_2}.$$

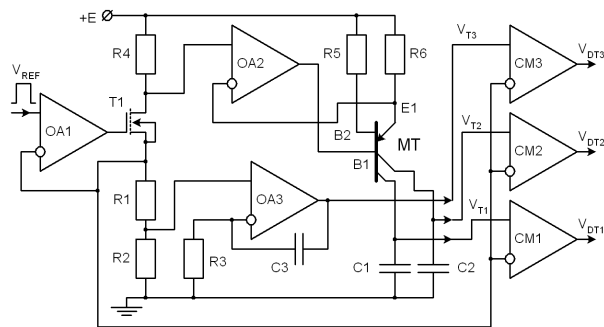


Рис. 3. Структурна схема сигнального перетворювача.

Саме ця напруга стабілізує роботу магнітотранзистора, що відбувається внаслідок стабілізації його емітерного струму і забезпечується колом від'ємного зворотного зв'язку на операційному підсилювачі OA_2 . Інформативними сигналами магнітного поля є часові інтервали t_{C1}, t_{C2} заряду конденсаторів C_1, C_2 колекторних кіл магнітотранзистора. Ці часові інтервали формуються відповідними перемикуваннями компараторів CM_1, CM_2 .

Частина сформованої на витоці транзистора T_1 напруги, що ділиться резистивним подільником R_1, R_2 , використовується для формування вхідної напруги опорної інтегруючої ланки часового перетворення на операційному підсилювачі OA_3 та ланці R_3, C_3 . На виході OA_3 формується лінійно наростаюча напруга, час t_{REF} наростання якої до певного порогового рівня V_{T0} не залежить від напруги живлення схеми і визначається співвідношенням

$$t_{REF} = \frac{C_3(V_{T0} - V_{R3})}{I_{C3}},$$

де $V_{R3} = \frac{V_{REF} R_2}{R_1 + R_2}$, $I_{C3} = \frac{V_{R3}}{R_3}$.

Опорний часовий інтервал t_{REF} формується компаратором CM_3 .

Для відладки і дослідження стабільності вимірювального перетворювача розроблено апаратно-програмний комплекс, інтерфейс робочого вікна якого наведено на рис.4а, а приклад результату дослідження – на рис.4б. У результаті проведених експериментальних досліджень було встановлено, що при зміні напруги живлення вимірювального

перетворювача у межах від 3 В до 5 В (типові межі роботи низьковольтної апаратури) нестабільність вимірювання магнітного

поля не перевищує 1%, що в повній мірі відповідає вимогам поставленої задачі.

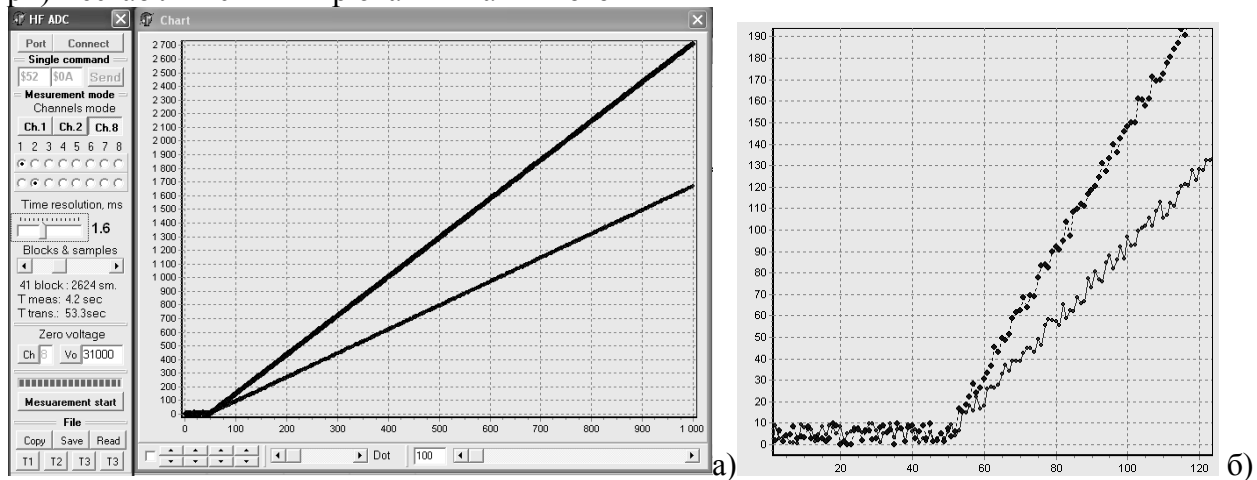


Рис. 4. Інтерфейс вікна програмного забезпечення (а) та результат експериментального дослідження вихідного сигналу (б).

Висновки

Розглянуто нові підходи у побудові сенсорних пристроїв магнітного поля на інтегральних структурах латеральних магнітотранзисторів. Основним результатом є нове схемне рішення високостабільного магнітотранзисторного сенсора з часовим перетворенням на комутованих конденсаторах, яке забезпечує стабілізацію роботи пристрою при дрейфі напруги живлення. Розроблений апаратно-програмний комплекс по відладці і дослідженню стабільності вимірювального перетворювача.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Popovic R.S. Hall effect devices. Second edition. – Bristol, Philadelphia and New York: Adam Hilger,, 2002.
2. Большакова І.А., Гладун М.Р., Голяка Р.Л. та ін. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля / За ред. З.Ю. Готри. – Львів: Вид. Національного університету "Львівська політехніка", 2001.
3. Lenz J., Edelstein A.S. Magnetic sensors and their applications // IEEE Sensors Journal. – 2006. - 6(3). – P. 631-649.
4. Leepattarapongpan Ch., Phetchakul T. Magnetotransistor based on the carrier recombination-deflection effect // IEEE Sensors Journal. – 2010. – 10(2). – P. 294-299.
5. Avram M., Neagoe O., Codreanu C. et all. An optimised bipolar lateral magnetotransistor // International Semiconductor Conference, CAS'2002. - Vol.1. – P. 83-86.

6. Phetchakul T., Sottip P. The deflection length and emitter width on sensitivity of magnetotransistor // 6th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Kaohsiung, Taiwan. – P. 359-362.
7. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв / За ред. З. Готри, Р. Голяки. – Львів: Вид. Державного університету "Львівська політехніка", 1999.
8. Schmalzel J.L., Rauth D.A. Sensors and signal conditioning // Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE. – 2005. – 8(2).– P. 48-53.
9. Quinn P.J., van Roermund A.H.M. Switched-capacitor techniques for high-accuracy filter and ADC design. – Springer., 2007.
10. Ashby R. Designer's guide to the cypress PSoC™. – Elsevier Inc., 2005.