

МАГНИТОТРАНЗИСТОРНЫЙ ДАТЧИК С ЦИФРОВЫМ ВЫХОДОМ

Р. Д. ТИХОНОВ

НПК «Технологический Центр» МИЭТ, Москва, Россия, e-mail: R.Tikhonov@tcen.ru

Для построения датчика на основе высокочувствительного двухколлекторного латерального биполярного магнитотранзистора pnp-типа с базой – диффузионным карманом – разработана схема, которая преобразует аналоговый сигнал разбаланса токов коллекторов в цифровой. Рассмотрена возможность создания интегрального преобразователя индукции магнитного поля в цифровой код в виде резистивной коллекторной нагрузки нового типа «И-лестница» и цифровых схем счетчиков и дешифраторов по КМОП-технологии 2 мкм.

Ключевые слова: биполярный магнитотранзистор, аналого-цифровые КМОП-схемы, интегральные датчики магнитного поля.

The reported CMOS microsystem with digital output is a key element for accurate magnetic measurements. The integrated system includes a magnetic microsensor – double collector lateral bipolar magnetotransistor and signal conditioning CMOS circuitry. The imbalance in collector currents is compensated for by the change of resistance of the collector load in the control circuit of a «И-ladder». The chip is fabricated in a generic 2 μm CMOS process.

Key words: magnetotransistor, CMOS microsystem, integrated current-magnetic sensor.

В настоящее время для создания аналитической и исследовательской аппаратуры необходимы малопотребляющие миниатюрные преобразователи физических величин. Наиболее востребованными являются магниточувствительные датчики, выполненные на основе интегральных полупроводниковых магниточувствительных элементов [1], в качестве которых обычно выступают простые и хорошо изученные магниторезисторы и датчики Холла. Двухколлекторный биполярный магниточувствительный транзистор (БМТ), функционирование которого связано с множеством эффектов [2] и до конца не изучено, имеет ряд досто-

инств: высокие магниточувствительность, рабочую частоту, отношение сигнал–шум, разрешение, линейность выходного сигнала, а также избирательность к направлению магнитного поля, микрометровые размеры, возможность интегрального микроэлектронного исполнения. Для реализации этих достоинств необходимо разрабатывать схемы датчиков, которые наиболее точно преобразуют измеряемый сигнал разности сил токов коллекторов магнитотранзистора в выходной сигнал датчика.

Датчики магнитного поля на основе магнитотранзисторов. Исследование первого двухколлекторного биполярного магнитотранзистора проведено в [3]. Планарный *ppp*-транзистор был изготовлен по биполярной технологии интегральных схем и имел два коллектора и два контакта к подложке-базе. Контакты к базе обеспечивают создание тянущего поля порядка 100 В/см. Инжектированные из эмиттера дырки в тянущем поле идут в сторону двух коллекторов. При достаточно сильном поле уменьшается начальный разбаланс токов коллекторов. При воздействии магнитного поля с вектором индукции, направленным перпендикулярно плоскости подложки под действием силы Лоренца, поток дырок отклоняется в сторону одного из коллекторов и возникает разница сил токов коллекторов, которая является полезным сигналом, пропорциональным магнитному полю.

Магнитотранзистор был частью кремниевой интегральной схемы с резисторами в нагрузке коллекторов и выходным усилителем. Получена чувствительность 10 мВ/Тл при рассеиваемой мощности 125 мВт. При силе тока эмиттера 1 мА абсолютная чувствительность по току самого магнитотранзистора $S = 70$ мкА/Тл, относительная чувствительность по току $0,23$ Тл⁻¹. Выходной сигнал составлял 10 В/Тл, что превышает Холловский сигнал 3 В/Тл, полученный в данной структуре. При измерениях в магнитном поле с индукцией до 2 Тл сигнал сохранял линейность. Температурная зависимость схемы 3 мВ/°С может быть снижена за счет выбора схемы, учитывающей температурную зависимость тока эмиттера. Температурная зависимость чувствительности схемы составляла $-0,7$ %/°С.

В [4] представлена разработанная интеллектуальная микросистема в виде универсального магнитооперационного усилителя (МОУ) на основе латерального БМТ с подавлением боковой инжекции. Схема МОУ состоит из магнитодетектора, усилителя с большим коэффициентом усиления и выходного каскада. Магнитотранзистор использован как нагрузка во входном каскаде дифференциального усилителя. На-

чальный разбаланс 10 мВ, чувствительность системы 93 мВ/Тл, мощность потребления 53 мВт. Максимальное изменение чувствительности ниже 2,1 % при температурах от -30 до $+50$ °С. Чип изготовлен по биполярной технологии с площадью кристалла $5,24 \times 4,64$ мм.

В [5] сообщается о КМОП-микросистеме (КМОП – интегральные микросхемы на основе транзисторов со структурой металл–окисел–полупроводник комплементарного типа) с латеральным биполярным магнитотранзистором с подавлением боковой инжекции. Эта система в комбинации с постоянным магнитом является ключевым элементом для точных угловых бесконтактных измерений и используется для контроля угловых систем управления в автоматике и в промышленности. Интегрированная система включает двухмерный магнитный микродатчик, интерфейс, устанавливающий рабочую точку магнитотранзистора, схему компенсации начального разбаланса, формирователь сигнала, аналого-цифровой преобразователь (АЦП). На выходе системы обеспечивается цифровое представление углового положения. Цифровой блок выполняет линеаризацию цифрового сигнала, обнаружение квадранта и компенсацию начального разбаланса, достигающего 200 мТл, с применением последовательного алгоритма приближения. Система имеет угловое разрешение 1° в поле постоянного магнита 100 мТл при расходе энергии 9 мВт. Температурный коэффициент ниже $0,3$ мТл/°С, шум – $0,2$ мТл/Гц^{1/2}. Чип изготовлен по КМОП-технологии 2 мкм, с двухслойным поликремнием, двухслойной металлизацией при площади кристалла $2,6 \times 4,1$ мм.

Влияние схем включения на работу магнитотранзисторов. При формировании двухколлекторного латерального БМТ не в равномерно легированной подложке, а в диффузионном кармане изменяется знак сигнала и возрастает максимальное значение относительной чувствительности по напряжению с 1,2 до 1,8 В/Тл [6]. При подсоединении контакта к подложке и контактов к базе магнитотранзистор становится трехколлекторным. Основная часть потока инжектированных носителей уходит в подложку, и возникает пороговый уровень тока эмиттера, при котором появляется заметный ток коллектора и увеличивается ток эмиттера до выхода транзистора в насыщение. В этой схеме включения чувствительность повышается до 3,9 В/Тл. На увеличенный ток эмиттера в большей степени действует сила Лоренца. При малом токе коллектора его приращение больше из-за отклонения тока эмиттера в магнитном поле. При этом возрастает относительная чувствительность по току, что при том же сопротивлении нагрузки коллекторов приводит

к увеличению чувствительности по напряжению. Сила тока коллекторов значительно меньше силы тока перехода карман – подложка. При малом токе коллектора можно увеличивать коллекторное сопротивление и повышать относительную чувствительность по напряжению за счет нагрузки.

В [7] показано, что в двухколлекторном латеральном БМТ с базой в диффузионном кармане (БМТБК) максимальное значение относительной чувствительности по напряжению больше, чем в БМТ, и составляет в максимуме 45 В/Тл. Высокая относительная чувствительность по напряжению обусловлена неравномерным легированием базы, увеличенным расстоянием между эмиттером и коллекторами, использованием схемы включения с общим потенциалом базы и кармана, высокоомной нагрузки в коллекторах.

Начальный разбаланс между напряжениями двух коллекторов зависит от схемы включения [8] и различия сопротивлений нагрузки. Для уменьшения разности сопротивлений и обеспечения пропорциональности изменения сопротивлений в коллекторе и базе изготовлены интегральные датчики на основе БМТБК и поликремниевых резисторов. Резисторы, задающие ток в базу, подключаются к коллектору, что уменьшает начальный разбаланс между напряжениями двух коллекторов до 1 мВ [9].

Схема включения двухколлекторного биполярного латерального магнитотранзистора с базой, сформированной в кармане, обеспечивает высокую чувствительность и малый начальный разбаланс между напряжениями двух коллекторов, а интегральное исполнение с поликремниевыми резисторами – температурную стабильность благодаря компенсации температурных изменений чувствительности магнитотранзистора и резисторов.

Магнитный датчик на латеральном двухколлекторном БМТ с цифровым выходом. Как показано выше, в двухколлекторном магнитотранзисторе происходит преобразование магнитного поля в разность сил токов коллекторов при одинаковом напряжении на них. Для работы преобразователя в схеме датчика в коллекторы необходимо включить нагрузочные сопротивления. На его выходах (коллекторах) появляются напряжения, разница которых является полезным сигналом, снимаемым с датчика. Обычно далее применяется АЦП, который превращает разность напряжений в цифровой отсчет показаний датчика. При таком подходе к построению датчика нарушается принцип получения полезного сигнала магнитотранзистора, так как вместе с изменением токов коллекторов изменяется напряжение на коллекторах, т. е. изменяется режим работы БМТ.

По сути дела, согласно предлагаемой схеме интегрального датчика выполняется аналого-цифровое преобразование, но только без использования отдельной схемы АЦП. Нагрузочные резисторы в коллекторах магнитотранзистора делятся на части. Значения коллекторных сопротивлений изменяются за счет резистивной перемычки между частями нагрузочных сопротивлений. Такая конструкция резистивного делителя названа «И-лестница». Для выравнивания потенциалов коллекторов применяют компараторы, что обеспечивает соответствие принципу действия магнитотранзистора. Датчик обладает тем преимуществом, что позволяет получить цифровую форму сигнала с магнитотранзисторного преобразователя без нарушения основного принципа работы БМТ.

Схема «И-лестницы» показана на рис. 1, где коллекторные резисторы представляют собой две цепочки резисторов $R_{к1}/n$, $R_{к2}/n$, между узлами которых включается резистивная перемычка $R_{и}$. Включение перемычки с помощью p МОП-ключей между разными узлами изменяет сопротивление в цепи коллекторов в соответствии с изменением их токов.

Потенциалы двух коллекторов сравниваются на компараторах. При достаточной разности потенциалов между коллекторами компаратор выдает сигнал для запуска счетчика. Счетчик предварительно устанавливается в нулевое состояние и запускается логическим элементом «ИЛИ» по сигналу от одного из компараторов. Цифровой сигнал счетчика поступает одновременно на выход и дешифратор. Дешифратор выбирает ключи, которые изменяют место присоединения резистивной перемычки между узлами в сопротивлении нагрузки коллектора с большей силой тока. Другой конец резистора перемычки подключается непосредственно к коллектору с меньшей силой тока. Положение перемычки изменяется до тех пор, пока не сравняются потенциалы на коллекторах. При равенстве потенциалов коллекторов счетчик останавливается, и его показания определяют в цифровом виде результат измерения индукции магнитного поля.

Эквивалентная схема резистивного делителя типа «И-лестница», показана на рис. 2. Расчет сопротивлений нагрузки коллекторов БМТ проводится при потенциале U_k , одинаковом для двух коллекторов. Резисторы и протекающие через них токи пронумерованы соответственно. Для этой схемы составлены уравнения Киргофа:

$$I_2 + I_5 = I_1;$$

$$I_4 = I_3 + I_5;$$

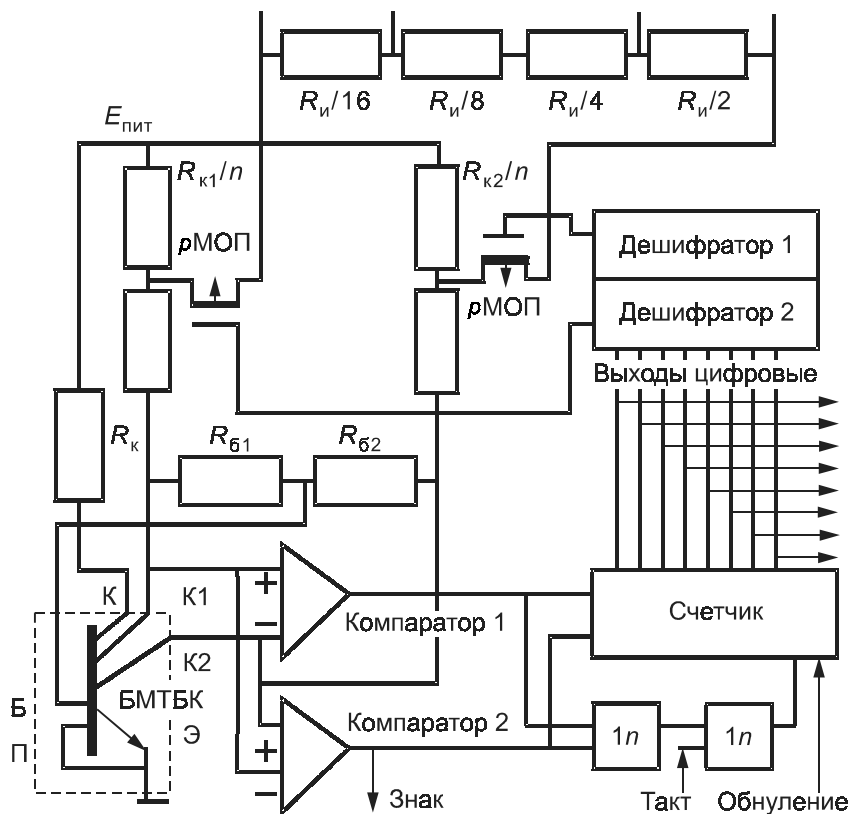


Рис. 1. Схема получения цифрового сигнала двухколлекторного БМТ с нагрузкой коллекторов в виде резистивного делителя типа «И-лестница» с резистивной перемычкой, переключаемой с помощью цифрового кода

$$I_1 R_1 - I_3 R_3 + I_5 R_5 = 0;$$

$$I_2 R_2 - I_5 R_5 - I_4 R_4 = 0;$$

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = U = E_{\text{пит}} - U_{\text{к}} = I_3 R_3 + I_4 R_4.$$

Решение системы этих уравнений приводит к формуле для разности сил токов, протекающих через коллекторы и сопротивления R_2 и R_4 :

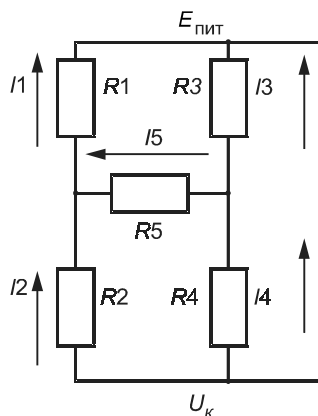


Рис. 2. Электрическая схема резистивной нагрузки двухколлекторного магнитотранзистора типа «И-лестница»

$$I_2 - I_4 = (U/R_5) \times (2x - 2y - x^2 + y^2) / (-1 - x - y + x^2 + y^2), \quad (1)$$

где $x = R_2/R_5$, $y = R_4/R_5$ при $R_1/R_5 = 1 - x$, $R_3/R_5 = 1 - y$.

Разность сил токов линейно зависит от напряжения и нелинейно от сопротивления элементов нагрузки. На рис. 3 представлена зависимость нормированной разности сил токов коллекторов $Z = (I_2 - I_4)R_5/U$ от нормированных значений сопротивлений X, Y . Если коллекторные резисторы разделить на равные части, то при линейной зависимости разности сил токов коллекторов от индукции магнитного поля цифровой результат будет представлять нелинейную зависимость магнитной индукции.

Для линейной передачи необходимо делить сопротивления в нагрузке коллекторов в соответствии с формулой (1), принимая $x = 0$ или $y = 0$ и разбивая диапазон разности сил токов на равные части (например, на 128 или другое количество частей). Можно также задать какую-либо другую функцию преобразования, необходимую для частных случаев применения преобразователя на основе резистивного делителя типа «И-лестница» или датчика с другой функцией преобразования.

Создание интегральной схемы для получения выходного сигнала интегрального магнитотранзисторного датчика на основе двухколлекторного БМТ в виде разности сил токов коллекторов и в цифровом виде увеличивает точность измерения выходного сигнала. Цифровой вид выходного сигнала интегрального магнитотранзисторного датчика удобен для его последующего использования в сложных системах с большим количеством датчиков.

Конкретное выполнение интегрального магнитотранзисторного датчика с цифровым выходом проведено для схемы, в которой сопротивления коллекторов разделены на 128 частей, счетчик имеет семь разрядов, размерность дешифратора матричного типа 14 столбцов \times 128 строк, он построен на n МОП-транзисторах с p МОП-нагрузочными транзисторами в каждой строке. Каждому числу на выходе счетчика соответствует

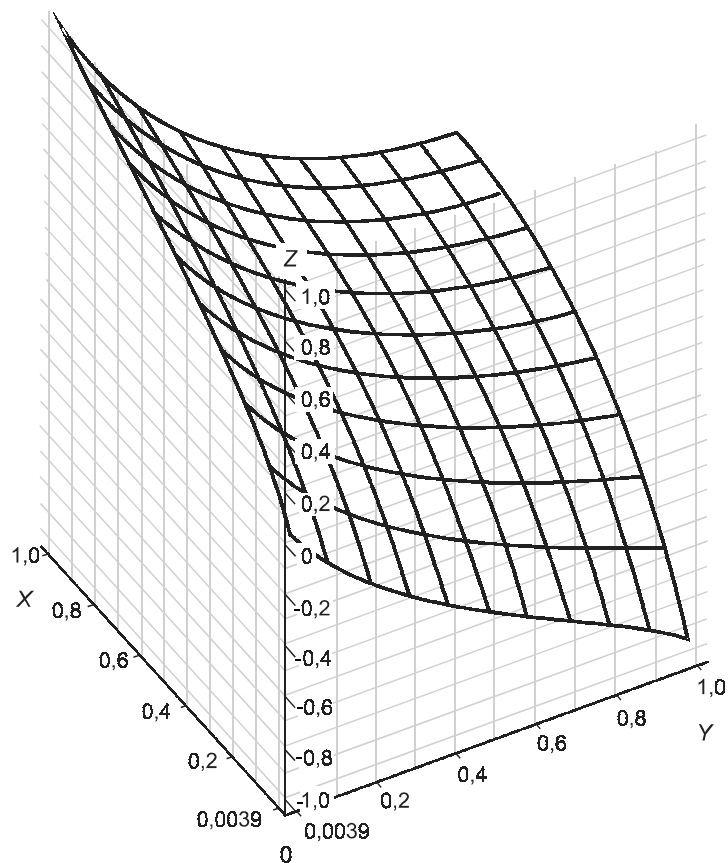


Рис. 3. Зависимость $Z(x, y)$ нормированной разности сил токов коллекторов магнитотранзистора от нормированных значений сопротивлений резистивной нагрузки двухколлекторного магнитотранзистора типа «И-лестница»

выбранная строка. Инвертор на выходе строки открывает p МОП-ключ, соединяющий один из узлов цепочки сопротивлений нагрузки одного коллектора двухколлекторного латерального БМТ с одним концом сопротивления перемычки. Другой его конец присоединяется через другой p МОП-ключ ко второму коллектору. Рабочий режим двухколлекторного латерального магнитотранзистора с базой в кармане задается сопротивлениями тока смещения кармана R_k , базы R_{o1} , R_{o2} . Проект кри-

сталла выполнен по КМОП-технологии 2 мкм с однослойным поликремнием, однослойной металлизацией при площади кристалла 2,6×3,2 мм.

В режиме «обнуления» цифровых выходов на них устанавливаются логические нули. При выходе из нулевого состояния счетчик считает тактовые импульсы. Дешифратор по порядку перебирает строки. При равенстве потенциалов двух коллекторов на выходах компараторов устанавливаются низкие уровни потенциалов, и логические схемы прекращают подачу тактирующих импульсов на вход счетчика. Цифровой выход со счетчика фиксирует значение, которое после экспериментальной или расчетной калибровки соответствует магнитной индукции, действующей на магнитотранзистор.

В магнитном поле сила тока одного коллектора увеличивается, а второго уменьшается. Изменение направления вектора магнитной индукции на противоположное приводит к изменению знака разности сил токов коллекторов в магнитном поле. Соответствующим образом изменяются падения потенциалов на коллекторных сопротивлениях и напряжения на коллекторах. При разности потенциалов между коллекторами на выходе одного из компараторов напряжение будет высоким, а на другом низким. Выход одного компаратора создает на выходе схемы сигнал «знак», указывающий направление вектора магнитной индукции относительно коллекторов в виде логического нуля или единицы.

Сравнение магнитотранзисторного датчика с цифровым выходом с описанными выше датчиками дано в таблице. Чувствительность по току двухколлекторного латерального БМТ с базой в диффузионном кармане существенно выше, чем у других известных магнитотранзисторов. Она сильно зависит от напряжения питания и схемы включения нагрузок, а также схемы, определяющей назначение датчика. Для латерального магнитотранзистора с четырьмя коллекторами [5] вместо чувствительности датчика указано угловое разрешение для определения угла поворота.

В интегральном магнитотранзисторном датчике с цифровым выходом принят принцип измерения разности сил токов двух коллекторов с нуль-индикатором разности потенциалов коллекторов на компараторах, что обеспечивает получение высокой точности результата измерений для малой разности сил токов коллекторов в слабых магнитных полях. Для обеспечения измерений в нескольких диапазонах магнитной индукции в схеме имеется набор сопротивлений перемычки. Сопро-

Чувствительность магнитотранзисторов по току и выходные сигналы датчиков

Тип магнитотранзистора	Чувствительность магнитотранзистора по току: абсолютная, мкА/Тл, относительная, Тл ⁻¹	Характеристика схемы	Чувствительность датчика
Планарный двухколлекторный магнитотранзистор с тянущим полем в базе [3]	70 0,23	Напряжение питания 5 В; сопротивление нагрузки коллекторов 15 кОм; дифференциальный каскад и выходной усилитель на биполярных транзисторах	10 мВ/Тл (выходной сигнал 10 мВ)
Латеральный биполярный магнитотранзистор с подавлением боковой инжекции [4]	- 0,6	Напряжение питания 5 – 15 В; магнитотранзистор является нагрузочной дифференциальной операционной усилителя; дифференциальный каскад и выходной усилитель с обратной связью на вход дифференциального операционного усилителя на биполярных транзисторах	93 мВ/Тл (системная чувствительность)
Латеральный с подавлением боковой инжекции биполярный магнитотранзистор с четырьмя коллекторами [5]	20 0,16	Напряжение питания 5 В; нагрузка коллекторов на рМОП-транзисторах; КМОП-схема задания режима работы и компенсации разбаланса с выходом на вычислитель с обратной связью через цифроаналоговый преобразователь	Угловое разрешение положения 1° в поле постоянного магнита 100 мТл
Двухколлекторный латеральный биполярный магнитотранзистор с базой в диффузионном кармане [7]	90 4,5	Напряжение питания 9 В; сопротивление нагрузки коллекторов $R_k = 546$ кОм с разделением на 128 частей; КМОП-схемы компараторов, счетчика, дешифраторов управления положением переключки «И-лестницы»	49 мВ/Тл (единица младшего разряда соответствует магнитной индукции 2,5 мТл при $R_n = R_k$, 41 мкТл при $R_n = 8R_k$)

тивление переключки $R_{\text{н}}$ разделено на секции с кратностью секций 2. Внешнее соединение выводов набора сопротивлений переключки позволяет расширить диапазон измеряемых значений магнитной индукции с кратностью, пропорциональной основанию двоичного кода. Использование сопротивлений переключки с более высокими значениями сопротивления, чем сопротивление в нагрузке коллекторов, позволяет повысить разрешающую способность преобразования разности сил токов коллекторов на единицу младшего разряда цифрового кода.

Выводы. В интегральном магнитотранзисторном датчике с цифровым выходом электрическая схема обеспечивает измерение разности сил токов двух коллекторов при равенстве напряжения на них, что соответствует принципу формирования полезного сигнала латерального двухколлекторного БМТ с базой в кармане и дает высокую точность преобразования магнитной индукции в выходной электрический сигнал.

Резистивная нагрузка типа «И-лестница» может служить универсальным элементом для применения в других случаях высокоточного преобразования разницы сил токов в цифровой код.

Цифровое представление результатов измерений делает возможным включение интегрального магнитотранзисторного датчика с цифровым выходом в информационные системы, содержащие большое количество датчиков, при обеспечении малых габаритных размеров и низкого потребления энергии благодаря микроэлектронному исполнению.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Бараночников М. Л.** Микромагнитоэлектроника. М.: ДМК Пресс, 2001.
2. **Тихонов Р. Д.** Механизмы чувствительности биполярного магнитотранзистора. Ч. 1 //Измерительная техника. 2006. № 11. С. 39 – 44; **Tikhonov R. D.** The sensitivity mechanisms of a bipolar magnetotransistor. Pt. 1 //Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 11. P. 1125 – 1133.
3. **Тихонов Р. Д.** Механизмы чувствительности биполярного магнитотранзистора. Ч. 2 //Измерительная техника. 2007. № 1. С. 55 – 59; **Tikhonov R. D.** The sensitivity mechanisms of a bipolar magnetotransistor. Pt. 2 //Measurement Techniques. 2007. V. 50. N 1. P. 78 – 84.
4. **Davies L.W., Wells M. S.** Magneto-transistor incorporated in an integrated circuit //Proc. IREE. Australia, 1971. P. 235 – 238.
5. **Маенака К., Okada H., Nakamura T.** Universal magneto-operational amplifier (MOP) //Sensor and actuators. 1990. A21 – A23. P. 807 – 811.

6. **Häberli A. e. a.** 2D magnetic microsensor with on-chip signal processing for contactless angle measurement //IEEE Solid-state circuits. 1996. V. 31. P. 1902 – 1907.
7. **Tikhonov R. D.** Investigation of bipolar magnetotransistor //Proc. SPIE. Micro- and nanoelectronics. 2005. V. 6260. P. 443 – 454.
8. **Тихонов Р. Д.** Физико-технические характеристики двухколлекторного магнитотранзистора //Прикладная физика. 2008. № 4. С. 147 – 152.
9. **Тихонов Р. Д., Козлов А. В., Поломошнов С. А.** Разбаланс потенциалов двухколлекторного латерального биполярного магнитотранзистора //Измерительная техника. 2008. № 8. С. 57 – 61; **Tikhonov R. D., Kozlov A. V., Polomoshnov S. A.** Imbalance of the potentials of a dual-collector lateral bipolar magnetotransistor //Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 8. P. 896 – 902.
10. **Тихонов Р. Д.** Интегральный магнитотранзисторный датчик //Измерительная техника. 2009. № 4. С. 50 – 54; **Tikhonov R. D.** An integrated magnetotransistor sensor //Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 4. P. 410 – 415.

Дата принятия 07.09.2010 г.

