

Магнитные микросхемы на основе тонкопленочных магниторезисторов и возможности их использования в системах управления и автоматики

А. Юров¹, В. Полевилов², А. Федина³

УДК 681.586.78 | ВАК 2.2.2

Статья посвящена микросхемам на основе тонкопленочных анизотропных магниторезистивных преобразователей, разработанных в АО «ЗНТЦ». Рассматриваются основные принципы работы данных преобразователей, а также области их применения, включая системы управления и автоматики. Приводятся данные по разработанным в АО «ЗНТЦ» устройствам, которые в сочетании с магнитными микросхемами позволяют создавать полноценные датчики различного функционального назначения.

Проблема контроля магнитных полей является актуальной для разработчиков техники различного назначения. Данное направление имеет ключевое значение, так как открывает возможности как для решения задач ориентирования по магнитному полю Земли, так и для создания приборов и устройств, позволяющих управлять самыми различными процессами. К настоящему времени в АО «Зеленоградский нанотехнологический центр» (АО «ЗНТЦ») разработан и производится целый ряд микросхем на основе тонкопленочных анизотропных магниторезистивных (АМР) преобразователей для использования как в специальной, так и в гражданской технике.

Целью настоящей статьи является демонстрация возможностей разработанных микросхем гражданского назначения на основе АМР-преобразователей.

Для измерения магнитных полей в течение многих лет используются устройства на основе эффекта Холла в полупроводниках. Данный эффект возникает из-за магнитной силы Лоренца, которая отклоняет движущиеся носители заряда электрического тока в магнитном поле. Однако появление тонкопленочных анизотропных магниторезистивных преобразователей существенно потеснило позиции датчиков на эффекте Холла. Это объясняется более высокими техническими характеристиками АМР-устройств, такими как:

- высокая чувствительность к малым магнитным полям;
- стабильность функционирования датчика вне зависимости от полярности и размера магнита;
- устойчивость к воздействию широкого диапазона температур (–60 ... +150 °C);
- высокая радиационная стойкость;
- отсутствие необходимости калибровки;
- невосприимчивость к воздействию вибрации;
- относительно невысокая стоимость производства.

Всё вышперечисленное открывает возможность применения данных преобразователей как в изделиях специального назначения, так и при решении многих народно-хозяйственных задач (измерение магнитных полей Земли, магнитных аномалий и т.д.; измерение электрических величин: электрического тока или электрической мощности; бесконтактное измерение механических величин с помощью датчиков углов поворота, давления, уровня и т.д.).

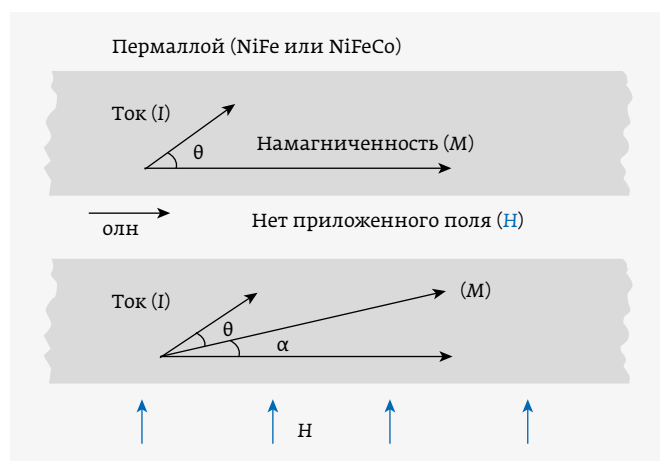
АМР-преобразователи, в самом простом случае, состоят из полоски тонкой магнитной пленки из сплава железо-никель (NiFe) или железо-никель-кобальт (NiFeCo) с контактами, сопротивление которой меняется в планарном магнитном поле, приложенном перпендикулярно длине полоски и оси легкого намагничивания (ОЛН), как видно на рис. 1а. Величина магниторезистивного эффекта ~ 2.2% (для сплавов 80% Ni 20% Fe) и чуть больше ~ 3.5% (для сплавов 74% Ni 10% Fe 16% Co).

На практике гораздо чаще используют АМР-преобразователи с более сложной топологией. В большинстве случаев это структуры, в которых на магнитной пленке

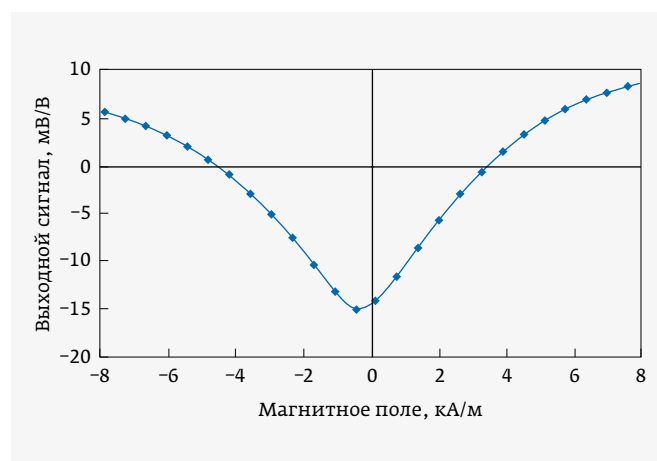
¹ АО «ЗНТЦ», руководитель группы, yurov@zntc.ru.

² АО «ЗНТЦ», директор дизайн-центра, polevikov@zntc.ru.

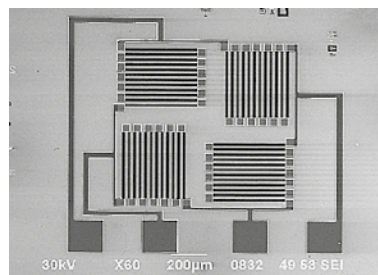
³ АО «ЗНТЦ», инженер, fedina@zntc.ru.



а)



б)



в)

Рис. 1. АМР-преобразователь с четной передаточной характеристикой:

а – структура и принцип работы; б – передаточная характеристика

АМР-преобразователя; в – топология АМР-преобразователя, состоящая

из четырех магнетосопротивлений, соединенных в мостовую схему Уитстона

под углом 45° расположены тонкие полоски из материала с высокой проводимостью, что делает передаточную характеристику нечетной и позволяет приблизить ее к линейному виду, как показано на рис. 2.

В результате преобразователи с такой структурой способны определять полярность воздействующего магнитного поля. Для построения эффективных устройств регистрации магнитного поля отдельные тонкопленочные магниторезисторы, как правило четыре, включают в мостовую схему Уитстона, что позволяет устранить негативное влияние постоянного уровня напряжения на выходе и существенно увеличить выходной сигнал. Таким образом, АМР-преобразователь в виде четырех магниторезисторов, включенных в мостовую схему, является основным элементом для создания датчиков различного функционального назначения.

Процесс контроля какого-либо объекта с помощью магнитных преобразователей заключается в регистрации магнитного поля или его изменений, связанных с этим объектом. Технические возможности магнитных датчиков на основе АМР-преобразователей позволяют использовать их в следующих целях:

- регистрация и измерение магнитных полей при ориентации и навигации;
- определение конечного положения и перемещения (как линейного, так и углового);
- определение скорости и частоты вращения;
- регистрация и измерение электрического тока.

Данный перечень не исчерпывает все варианты использования АМР-преобразователей, но дает представление об их большом потенциале.

К настоящему времени в АО «Зеленоградский нанотехнологический центр» разработан и производится ряд микросхем на основе АМР-преобразователей.

Задачи регистрации и измерения магнитных полей при ориентации и навигации в пространстве решаются с помощью микросхемы К1382ПП02 АДКБ.431320.493ТУ, выпускаемой АО «ЗНТЦ» [1], основные характеристики которой приведены в табл. 1.

Главным предназначением микросхемы является измерение малых магнитных полей, в том числе поля Земли, по которому производится определение положения объекта в пространстве.

Микросхема одноосевая, то есть регистрирует только одну компоненту поля, и является функциональным аналогом датчиков HMC1021 от Honeywell (США) и AFF756 от Sensitac (Германия) [2-3]. Данная микросхема может устанавливаться как на стационарные объекты, так и на подвижные (автомобили, самолеты, беспилотные летательные аппараты) и функционировать как часть их навигационных систем. Она имеет в своем составе встроенные тонкопленочные катушки управления, в частности катушку перемагничивания (set/reset) и компенсационную катушку (offset), позволяющую производить калибровку, а также компенсировать наводки от близко расположенных ферромагнитных деталей и узлов. Микросхема выполняется в металлопластиковом корпусе 4303.8 (рис. 3).

В настоящее время в АО «ЗНТЦ» готовится производство микросхемы К1382ЧЭ01Т (рис. 4), которая

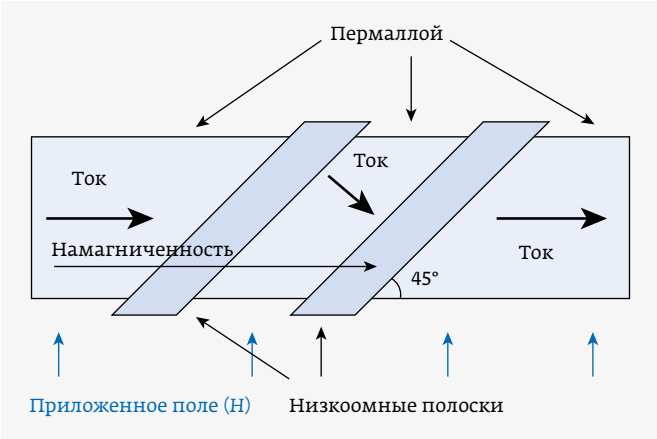
Таблица 1. Основные характеристики микросхемы К1382ПП02

Наименование параметра	Значение параметра
Суммарный диапазон измерения поля, Гс	±9
Чувствительность к магнитному полю, мВ/В/Гс	0,7 ... 1,5
Нелинейность передаточной характеристики, %	Не более 3
Сопротивление магниторезистивного моста, кОм	0,7 ... 1,5
Сопротивление катушки перемagnичивания, Ом	Не более 3,0
Сопротивление катушки компенсации, Ом	Не более 145 ... 190
Постоянная катушки компенсации, мА/Гс	4,0 ... 4,6
Начальное смещение, мВ/В	Не более ±2,5
Напряжение питания магниторезистивного моста, В	2,5 ... 8
Рабочий диапазон температур, °С	-60 ... +85

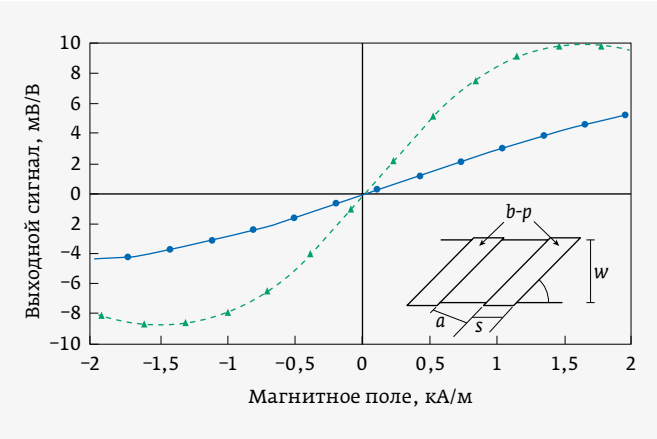
является двухосевой, то есть регистрирует уже две компоненты поля [1]. Микросхема – функциональный аналог датчика НМС1022 от Honeywell (США) [2]. По своим характеристикам она аналогична микросхеме К1382ПП02, выполняется в металлопластиковом корпусе 4307.16-1.

Для решения задач определения конечного положения и перемещения, как линейного, так и углового, используются микросхемы К1382ЧП01 и К1382НХ065, которые также разработаны и производятся в АО «ЗНТЦ».

Конечное положение элементов различных систем управления можно определять с помощью микросхемы



а)



б)



в)

Рис. 2. АМР-преобразователь с нечетной передаточной характеристикой: а – структура и принцип работы; б – передаточная характеристика преобразователя с чувствительностью 3,0 мВ/В/кА/м (сплошная линия; w = 10 мкм, a = 15 мкм, s = 6 мкм) и 9,0 мВ/В/кА/м (прерывистая линия; w = 40 мкм, a = 6 мкм, s = 6 мкм); в – топология АМР-преобразователя



Рис. 3. Микросхема K1382ПП02 (K1382ЧП01) в металлопластиковом корпусе 4303.8

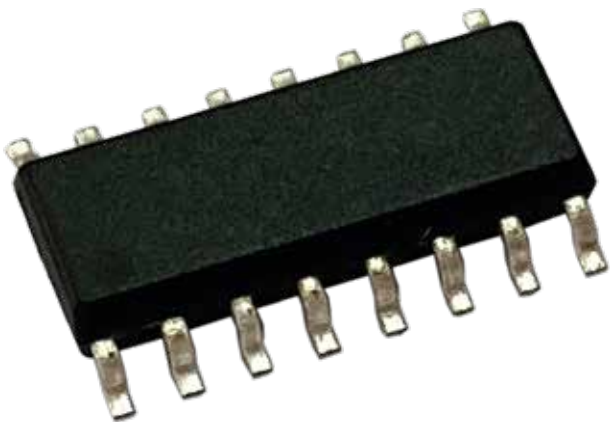


Рис. 4. Микросхема K1382ЧЭ01T в металлопластиковом корпусе 4307.16-1

K1382ЧП01 АДКБ.431320.466ТУ, основные характеристики которой приведены в табл. 2. Для определения положения или перемещения при помощи данной микросхемы может использоваться либо постоянный магнит, устанавливаемый на элемент, положение которого необходимо определить, либо отметчик из ферромагнитного металла. В последнем случае необходимо размещение микросхемы на постоянном магните для создания поля смещения. Тогда наличие ферромагнитного металла приводит к изменению поля, создаваемого магнитом, и микросхема, в силу высокой чувствительности к магнитному полю, преобразует его в электрический сигнал.

Микросхема K1382ЧП01 имеет встроенный постоянный магнит, что обеспечивает высокую линейность передаточной характеристики в достаточно широком диапазоне регистрируемых полей (рис. 5). Конструктивно она выполняется также в металлопластиковом корпусе 4303.8. Микросхема может использоваться для построения концевых датчиков для робототехнических и других систем

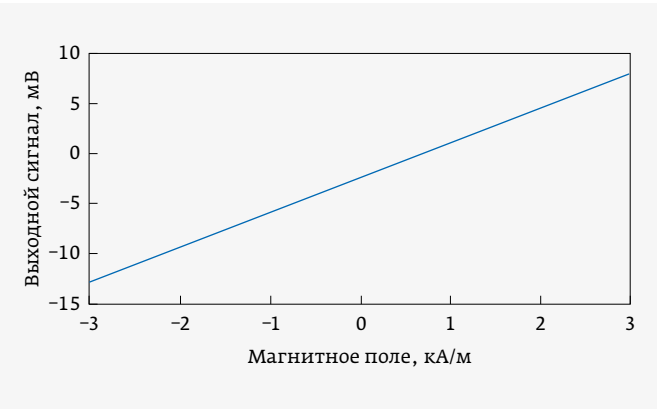


Рис. 5. Передаточная характеристика микросхемы K1382ЧП01, $U_{пит} = 5\text{ В}$

Таблица 2. Основные характеристики микросхемы K1382ЧП01 [1]

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон полей, кА/м	± 3
Чувствительность к магнитному полю, мВ/В/кА/м	0,7 ... 1,3
Сопротивление магниторезистивного моста, кОм	0,7 ... 1,25
Начальное смещение, мВ/В	± 1
Температурный коэффициент чувствительности, %/°C при $U = \text{const}$	0,35
Температурный коэффициент напряжения смещения, (мкВ/В)/°C	± 3
Температурный коэффициент сопротивления моста, %/°C	0,3
Напряжение питания, В	2,5 ... 10
Диапазон рабочих температур, °C	-60 ... +125

Таблица 3. Основные характеристики микросхемы K1382NH065 [1]

Наименование параметра	Значение параметра
Напряжение питания, В	5 ... 10
Амплитуда выходного напряжения, мВ при U = 5 В	Не менее 75
Сопротивление одного моста, кОм	2.5 ... 3.5
Напряжение смещения, мВ/В	±1,5
Гистерезис выходного напряжения, %	Не более 0,1
Синхронизм выходных сигналов, %	99 ... 101
Диапазон измеряемых углов, °	0 ... 180
Температурный коэффициент выходного напряжения, %/°C при U = 5 В	Не более 0,35
Температурный коэффициент выходного напряжения, %/°C при I = 2 мА	Не более 0,13
Температурный коэффициент напряжения смещения, (мкВ/В)/°C	±2
Температурный коэффициент сопротивления одного моста, %/°C	0,28
Диапазон рабочих температур, °C	-60 ... +125

управления и является функциональным аналогом датчика KMZ10C от Philips (Нидерланды) [4].

Для определения угла поворота и углового положения предназначена микросхема K1382NH065 PABЦ.431321.011ТУ, характеристики которой представлены в табл. 3. Микросхема регистрирует поворот планарного магнитного

поля, которое может создаваться различными источниками, в основном постоянными магнитами, в диапазоне углов 0...180° (±90°). В составе микросхемы восемь тонкопленочных магниторезисторов, включенных в две мостовые схемы. В результате поворота внешнего поля на выходах микросхемы формируются два синусоидальных сигнала, сдвинутых по фазе на 45°, как показано на рис. 6, с помощью которых определяют величину угла поворота:

$$\varphi = 1/2 (\arctg(U_1 / U_2))$$

Микросхема выполнена в корпусе 4303.8. По своим техническим характеристикам она может использоваться в автомобильной технике, для построения на ее основе датчиков положения дроссельной заслонки в микропроцессорной системе управления двигателем, а также датчиков угла поворота рулевого колеса, датчиков наклона фар, датчиков положения сидения и т.д. Может использоваться для контроля углов при ориентировании антенн. Является функциональным аналогом датчиков KMZ41 и KMZ49 от NXP (Нидерланды), HMC1512 от Honeywell (США), AA747 от Sensitec (Германия) [5-8].

Определение скорости и частоты вращения может производиться одним из следующих способов:

- регистрация полюсов магнита, установленного на объект;

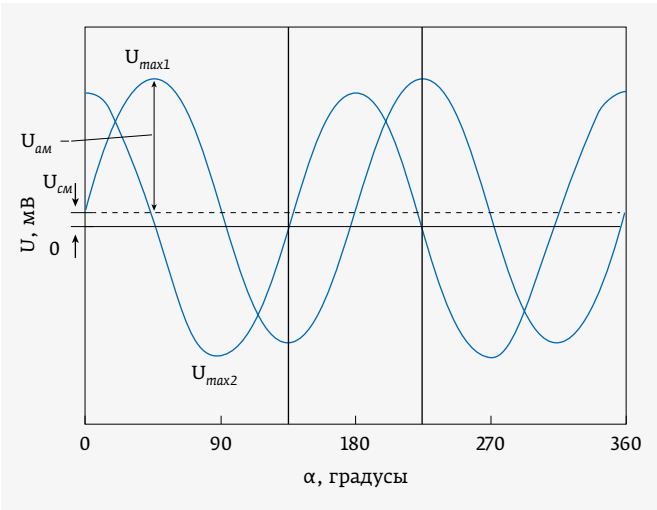


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения микросхемы K1382NH065 от угла поворота магнитного поля

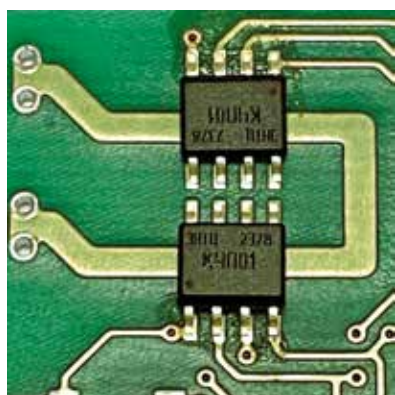


Рис. 7.
Микросхема
с АМР-пре-
образователем
на проводнике
печатной платы

- регистрация зубьев стальной мишени;
- измерение вихревых токов, возникающих в проводящей пластине при движении ее в магнитном поле.

Для этих целей может использоваться микросхема К13824П01, основные характеристики которой рассмотрены выше (табл. 2). Первый способ не требует никаких дополнительных элементов для работы, тогда как для второго и третьего необходимо устанавливать микросхему на постоянный магнит с целью создания поля смещения. При регистрации зубьев микросхема формирует синусоидальный выходной сигнал с частотой следования зубьев, тогда как при измерении вихревых токов – монотонно-изменяющийся выходной сигнал с определенной степенью линейности.

Задача регистрации и измерения электрических токов решается с помощью микросхем на АМР-преобразователях очень эффективно. Такие микросхемы позволяют измерять электрический ток с полной гальванической развязкой измеряемой и измерительной цепей. Это связано с тем, что, обладая высокой чувствительностью, АМР-преобразователи регистрируют магнитное поле, создаваемое проводником с током.

Наиболее удачным является размещение микросхемы непосредственно на проводнике печатной платы, как показано на рис. 7, поскольку при этом обеспечивается минимальный зазор между чувствительным элементом преобразователя и проводником.

Для измерения электрического тока используются микросхемы К13824П01 и К1382ПП02. Первая позволяет измерять токи от единиц до десятков ампер, вторая – в более широком диапазоне, в силу своей более высокой чувствительности к магнитному полю. Микросхемы способны регистрировать токи как постоянные и переменные, так и импульсные в широком диапазоне частот до 1 МГц. Необходимо отметить, что микросхемы на основе АМР-преобразователей не нуждаются в концентраторах магнитного поля, характерных для датчиков Холла. По своим функциональным

возможностям микросхемы близки к магниточувствительным элементам датчиков тока МСR1101-5, МСR1101-20 от Memsic (США) [9].

Рассмотренные в настоящей работе микросхемы на АМР-преобразователях представляют собой магниточувствительную часть, однако для создания датчика того или иного назначения необходима электронная схема, которая усилит и преобразует выходной сигнал чувствительной части в форму, соответствующую требованиям потребителя. Для этих целей в АО «ЗНТЦ» разработан и выпускается целый ряд микросхем, в том числе:



Рис. 8. Датчик угла поворота рулевого колеса

- К1382НМ015 – микросхема, которая может быть использована для преобразования синусно-косинусного сигнала от микросхемы К1382НХ065 в линейный цифровой код, соответствующий фазе синусно-косинусного сигнала (производит вычисление арктангенса от входных сигналов) [1].
- К1382НУ01А5 – микросхема, которая, работая совместно с микросхемой К13824П01, обеспечивает бесконтактное измерение электрического тока [1].

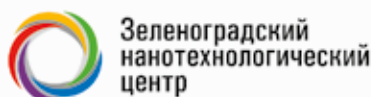
На данный момент также ведется разработка датчика угла поворота рулевого колеса (ДУП), который является элементом электроусилителя рулевого колеса (рис. 8). Он находится под рулем или на валу колонки. Микросхема служит для определения угла поворота, направления поворота и угловой скорости рулевого колеса. Разрабатываемый

в ходе реализации проекта ДУП – магниторезистивный. Магниторезисторы определяют положение подвижных магнитов и передают информацию на электронный блок управления, который на основе полученных данных рассчитывает угол поворота руля, скорость, а также направление поворота.

Таким образом, в АО «ЗНТЦ» разработан и производится целый ряд магнитных микросхем, использующих АМР-преобразователи, которые могут применяться в качестве чувствительных элементов для построения датчиков различного функционального назначения. Кроме того, разработаны микросхемы, способные обеспечить обработку выходных сигналов чувствительных элементов, что позволяет создавать полностью функционально законченные датчики для решения большого числа задач. Это, в свою очередь, значительно расширяет возможности потенциальных потребителей, так как они могут приобретать готовые датчики или разрабатывать собственные.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://zntc.ru/catalog/>
2. https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/sensors/datasheet/N61-2056-000-000_MagneticSensors_HMC-ds.pdf
3. https://www.sensitec.com/fileadmin/sensitec/Service_and_Support/Downloads/Data_Sheets/AFF700_800/SENSITEC_AFF756_DSE_09.pdf
4. <https://www.chipfind.ru/datasheet/philips/kmz10c.htm>
5. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/KMZ41.pdf>
6. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/KMZ49.pdf>
7. https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/sensors/datasheet/N61-2042-000-000_MDS_HMC15011512-ds.pdf
8. <https://docs.rs-online.com/9a77/0900766b816028f8.pdf>
9. https://hypertech.co.il/wpcontent/uploads/2015/12/MCA1101_MCR1101_Data_Sheet_-11-3-16_Preliminary.pdf



**Зеленоградский
нанотехнологический
центр**

МЭМС и ФИС
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО
ПОЛНЫЙ ЦИКЛ

**Зеленоградский Нанотехнологический Центр -
предприятие полного цикла разработки и
производства современной элементной базы
микроэлектроники.**



- Высокая степень локализации производства
- Поддержка на всех этапах интеграции

- Производство изделий любой сложности
- Индивидуальный подход к каждому заказчику



Продукция:

- Преобразователи физических величин
- Микросхемы стабилизаторов направления
- Кремниевые односторонние/двусторонние детекторы
- Магниторезистивные преобразователи
- Мультиплексоры (DWDM)
- Энкодеры
- Датчик тока

sales@zntc.ru | +7 (499) 720-69-44

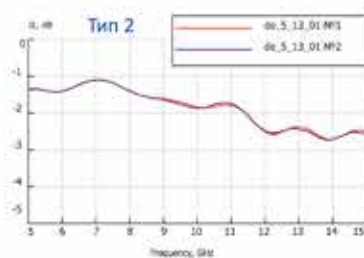
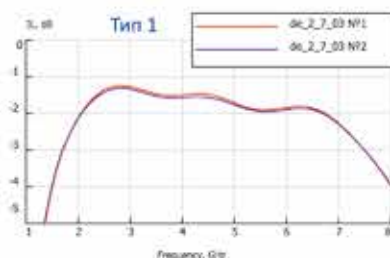


СВЧ СИММЕТРИРУЮЩИЙ ТРАНСФОРМАТОР

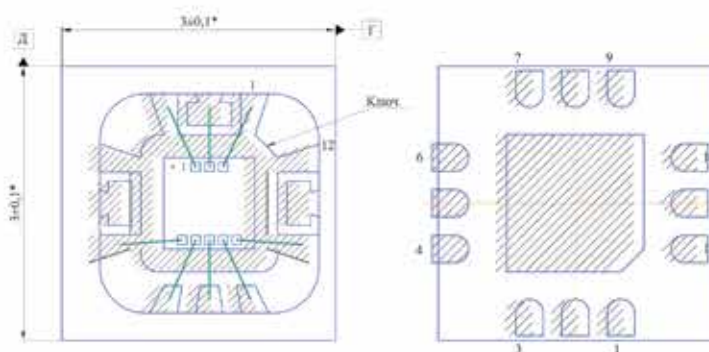
Серийное производство

- Радиолокация
- Навигация
- В трактах радиосвязи и аппаратуре РЭП

	Тип 1	Тип 2
Диапазон рабочих частот, ГГц	2,6 - 6,0	5,5 - 11,2
Потери преобразования (IL), дБ	2,5	2,7
Амплитудная ошибка (Mag_Err), дБ	1,2	2,0
Фазовая ошибка (Ph_Err), град.	6	11



- Переход от несимметричных сигналов к симметричным и наоборот
- Преобразование импеданса для согласования
- Повышение или понижение напряжения или тока
- Обеспечение развязки по постоянному сигналу между схемами
- Увеличение ослабления синфазного сигнала
- Обеспечение постоянного тока в некоторых сегментах схемы



Преимущества:

- Разработка АО «ЗНТЦ»
- Полностью локализованное производство
- Исполнение по ГОСТ РВ 20.39.414.1

Аналоги:

- MTX2-73+ (Mini-Circuits, США)
- MTX2-143+ (Mini-Circuits, США)