

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 53.087.4:681.5

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АМОРФНЫХ МИКРОПРОВОДОВ В МАГНИТОИМПЕДАНСНЫХ ДАТЧИКАХ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Статья поступила в редакцию 24.05.2016, в окончательном варианте 26.06.2016.

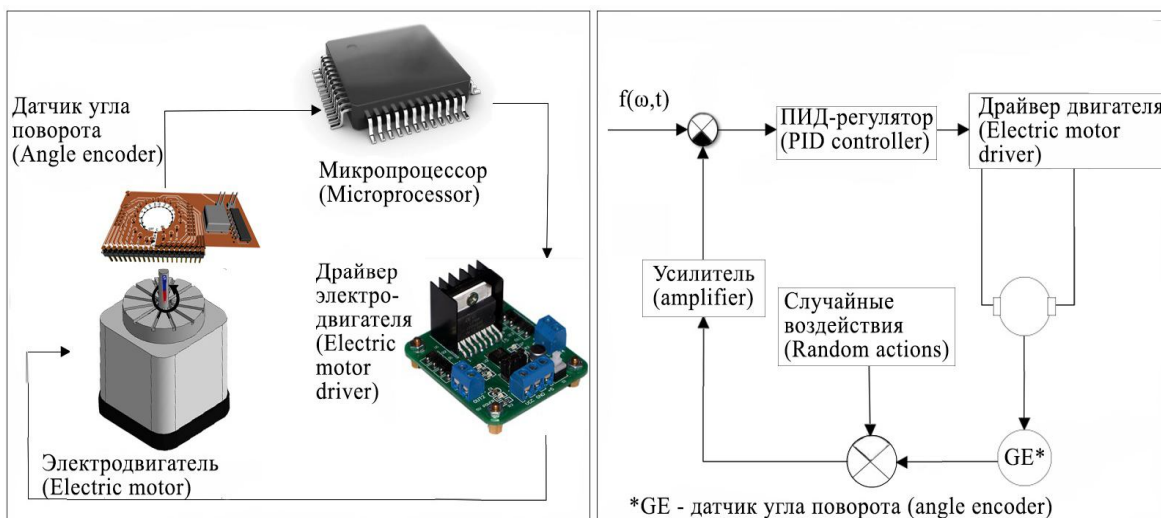
Аксенов Олег Игоревич, ассистент, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: oleg_aksenov@inbox.ru

Рыбаков Алексей Владимирович, кандидат физико-математических наук, директор Института исследований и решения технологических задач, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: rybakov_alex@mail.ru

Проведен анализ принципов действия существующих конструкций датчиков угла поворота (ДУП), которые могут использоваться в информационно-измерительных и управляющих системах. Предложено использовать в качестве ДУП магнитоимпедансные датчики (МИД), в частности МИД на основе магнитострикционных материалов. Проведено исследование особенностей применения таких датчиков. Выполнено сравнение различных типов магнитострикционных материалов с точки зрения целесообразности их использования в составе МИД. Разработан макет конструкции МИД на основе аморфных микропроводов (АМП) в качестве ДУП. Описаны принципы работы МИД данного типа; особенности их подключения к аналого-цифровому преобразователю или микроконтроллеру – при различных количествах микропроводов в МИД с АМП. Произведена оценка стоимости МИД данного типа. Сделан вывод о целесообразности применения МИД на основе АМП в качестве ДУП в виде энкодеров.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, магнитоимпедансный датчик, энкодер, магнитный датчик угла поворота, эффект гигантского магнитоимпеданса, скин-эффект, эффект Холла, микропровод, магнитострикция, микросенсор.

Графическая аннотация (Graphical annotation)



ANALYSIS OF POSIBILITIES FOR USING OF AMORPHOUS MICROWIRES IN MAGNETOIMPEDANCE SENSORS DEVELOPED FOR DATA MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Aksenov Oleg I., Assistant, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: oleg_aksenov@inbox.ru

Rybakov Aleksey V., Ph.D. (Physics and Mathematical Sciences), Director of Institute of Researches and Solutions to Technological Tasks, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: rybakov_alex@mail.ru

The article describes principles of angle encoders (AE) existing constructions operation which can use in data measuring and control systems. It's proposed to use magnetoimpedance sensors (MIS) as AE, in particular, for AE based on magnetostrictive materials. In article is researched the peculiarities of application for this type of sensors. Authors analyzed in the relatively different types of magnetostrictive materials in the view of advisability for using of them as part of MIS. It's developed the model of MIS construction based on amorphous microwires (AMW) as AE. In article is described principles of definite type device operation; peculiarities of connection to analog-to-digital converter or microcontroller – with different number of microwires in MIS with AMW. Authors fixed the price of definite type MIS. It's concluded that application of MIS based on AMW as AE is expedient.

Keywords: data measuring system, magnetoimpedance sensor, rotary encoder, magnetic angle encoder, giant magnetoimpedance effect, skin effect, Hall effect, microwire, magnetostiction, microsensor.

Введение. Магнитоимпедансные датчики (МИД) находят широкое применение в различных областях науки и техники, в т.ч. в рамках построения и использования информационно-измерительных и управляющих систем. Частным, но достаточно важным, случаем является их использование для определения параметров вращения вала двигателя и/или управления скоростью этого вращения. От качества решения этой задачи напрямую зависит точность позиционирования подвижных механизмов различных устройств промышленного и бытового назначения: координатных станков (в т.ч. с ЧПУ); устройств чтения оптических дисков; 3D-принтеров; сервоприводов в различных робототехнических системах и пр. Однако особенности использования некоторых новых технических решений для МИД и, в частности, для датчиков угла поворота (ДУП), в существующей литературе исследованы недостаточно полно [7]. Это касается, например, МИД углов поворота, использующих аморфные микропровода (АМП). Поэтому цель данной статьи – обоснование целесообразности использования для повышения точности ДУП конструкций МИД на основе АМП, являющихся перспективным классом магнитоимпедансных материалов.

Общая характеристика существующих конструкций ДУП, их достоинств и недостатков. В настоящее время, для обеспечения точного позиционирования инструментов и/или обрабатываемых деталей применяются, как правило, шаговые электродвигатели (ШЭД), позволяющие осуществлять перемещение объектов с достаточно высокой точностью. Однако ШЭД имеют существенные недостатки, в частности, связанные с уменьшением момента при повышении скорости вращения. В ряде случаев, технологически выгоднее было бы использовать бесколлекторные электродвигатели. Однако такое решение требует реализации цепи обратной связи в схеме управления их вращением с использованием ДУП в виде энкодеров.

Существует три основных типа ДУП по принципу их действия.

1. Оптические ДУП. Они представляют собой диск с оптическим растром, который закреплен на валу двигателя и вращается вместе с ним. При повороте вала изменяется световой поток, проходящий через отдельные элементы растра – эти изменения регистрируются фотодатчиком (фотодатчиками), укрепленными на корпусе устройства. Такие ДУП могут обеспечивать либо подсчет количества световых импульсов, прошедших через растр (т.е. отсчет углов поворота по отношению к начальному положению), либо давать возможность определять угловое положение вала на основе «индивидуальной комбинации элементов растра» соответствующих каждому из углов поворота (абсолютный энкодер – рис. 1) [10].

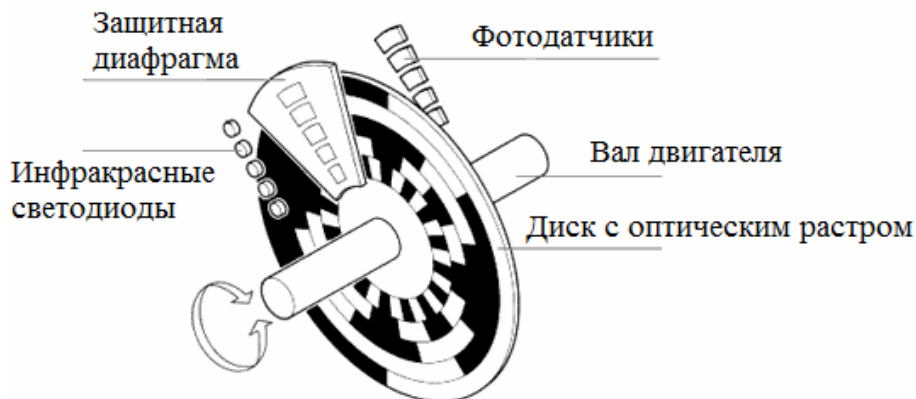


Рис. 1. Принципиальная схема оптического ДУП с абсолютным энкодером [5]

2. Магнитные ДУП (рисунок 2) основаны на принципе прохождения магнитных полюсов вращающегося магнитного элемента около чувствительного элемента – в большинстве случаев это датчик, построенный на использовании эффекта Холла [8] (рис.3). Последний заключается в возникновении поперечной разности потенциалов « $U_+ - U_-$ » проводника с током I , помещенного во внешнее магнитное поле с индукцией B . Указанным датчиком регистрируется последовательность прохождения мимо него полюсов (северные и южные) магнитных элементов, закрепленных на валу двигателя. На основе импульсов с такого датчика измеряются скорость и направление вращения [6] вала.

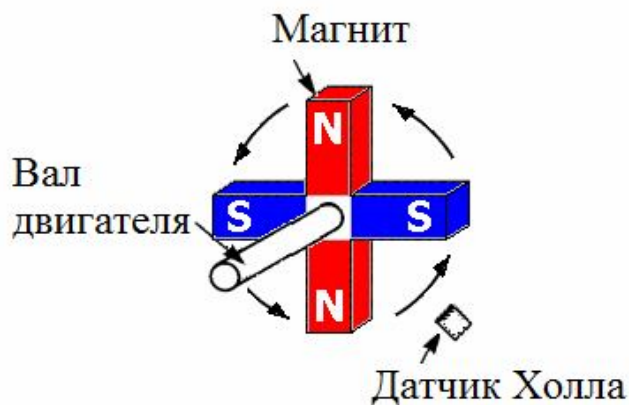


Рис. 2. Схема магнитного энкодера [12]

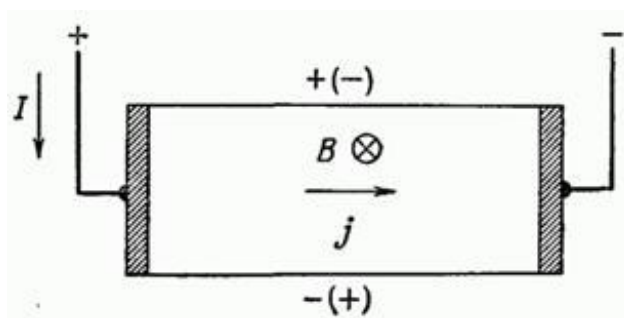


Рис. 3. Схема эффекта Холла [16]

3. Механические ДУП. Принцип действия - изменение состояния переключателей электрических цепей при помощи диска с нанесенными на него выпуклыми или токопроводящими участками (энкодер).

Наиболее точными из вышеперечисленных типов энкодеров являются оптические и магнитные. Однако оптимальными по соотношению цена/точность можно считать только последние. Это связано с высокой стоимостью оптических энкодеров и их малой устойчивостью к внешним механическим воздействиям по сравнению с магнитными энкодерами. Точность ДУП на основе магнитных энкодеров может достигать 1° . В технических приложениях это обычно является удовлетворительной характеристикой. Однако в ряде случаев представляет интерес повышение этой точности до долей градуса [7].

Основными материалами для изготовления ДУП на основе магнитных энкодеров являются германий и кремний, эпитаксальные слои GaAs, бинарные соединения полупроводников 3-ей и 5-ой групп периодической системы элементов Менделеева и другие. Однако датчики на основе эффекта Холла требуют использования специальных схем усиления и стабилизации сигнала, что усложняет технологический процесс их изготовления, повышает стоимость и пр.

Принципы действия магнитоотрицательных МИД. Применение магнитоотрицательных материалов в конструкциях датчиков величины магнитного поля является перспективным направлением исследований и разработок. В тех структурах, в которых проявляется эффект магнитоотрицательности, имеет место связь магнитных свойств с уровнем приложенных к материалу механических напряжений. А связь между механическими и магнитными характеристиками может быть использована как для управления параметрами элементов датчика, так и для разработки новой методики регистрации поворота вала двигателя на определенный угол [2, 25].

Одним из эффектов, возникающих в магнитоотрицательных материалах, является эффект гигантского магнитоимпеданса (ГМИ). Он заключается в многократном увеличении электрического сопротивления материала при внесении его во внешнее магнитное поле. Чувствительность МИД магнитного поля может достигать порядка 1 мГс. Это на три порядка лучше по сравнению с датчиками Холла, в которых предел чувствительности находится в пределах 1 Гс [24].

Для определения относительной величины эффекта ГМИ обычно используют [3,4] следующее соотношение:

$$\Delta Z / Z(\%) = [Z(H) - Z(H = H_{нас})] / Z(H = H_{нас}), \quad (1)$$

где $Z(H)$ – импеданс образца в магнитном поле напряженностью H ; $Z(H = H_{нас})$ – импеданс образца в магнитном поле насыщения. В этом случае величина $\Delta Z/Z$, которую принято называть ГМИ-отношением, всегда положительна, и может достигать значений, больших, чем 100 %.

В работах других авторов [3,4] ГМИ-отношение рассчитывалось иначе:

$$\Delta Z / Z(\%) = [Z(H) - Z(H = 0)] / Z(H = 0), \quad (2)$$

где $Z(H = 0)$ – величина импеданса образца в отсутствие внешнего магнитного поля. В таком случае величина ГМИ-отношения может быть не только положительной, но и отрицательной.

В настоящее время различают продольный и поперечный эффекты гигантского магнитоимпеданса [22]. Продольным эффектом принято называть эффект, возникающий при приложении внешнего магнитного поля параллельно направлению протекающего через исследуемый образец электрического тока. Поперечным эффектом принято называть эффект магнитоимпеданса, возникающий в случае, когда внешнее магнитное поле приложено перпендикулярно направлению протекания электрического тока (рис. 4).

Магнитоимпеданс обусловлен влиянием внешнего магнитного поля на распределение плотности высокочастотного переменного тока по поперечному сечению проводника, что связано с проявлением так называемого скин-эффекта. Толщина скин-слоя (δ), или, иными словами, глубина проникновения переменного тока в объем проводника, определяется по формуле [3, 4]:

$$\delta = \sqrt{c^2 / 2\pi\Omega\omega\mu_t}, \quad (3)$$

где «с» – скорость света в вакууме [м/с], Ω – проводимость [Кл/м²], ω – циклическая частота переменного тока [рад/с], μ_t – эффективная магнитная проницаемость (ЭМП) образца, включающая в себя комплексную компоненту магнитной проницаемости для учета влияния вихревых токов.

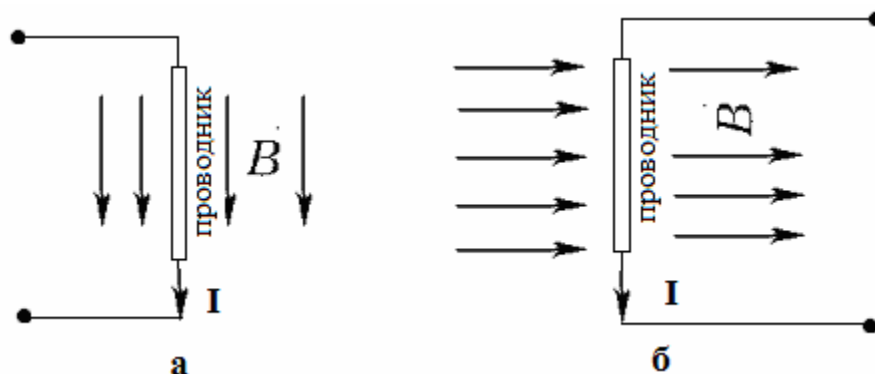


Рис. 4. Схемы ГМИ-эффекта: а) продольного; б) поперечного

Как известно, величина ЭМП во многом определяется доменной структурой материала и процессами его перемагничивания. Внешнее постоянное магнитное поле напряженностью H , приложенное к проводнику, вызывает в нем процессы перестройки доменной структуры, и, как следствие, изменяет величину магнитной проницаемости μ_θ . В свою очередь изменение величины μ_θ приводит к изменению глубины скин-слоя, по которому протекает высокочастотный электрический ток. А это ведет к изменению импеданса образца-ферромагнетика Z . Связь между импедансом Z и его эффективной магнитной проницаемостью может быть, в общем случае, представлена в виде [3, 4].

$$Z \sim (\mu_\theta f)^{-1/2}. \quad (4)$$

Подобные рассуждения верны для частот переменного тока порядка мегагерц. В этом случае толщина скин-слоя δ намного меньше некоторого характерного размера проводника (радиус проволоки, толщина фольги). При этом существенно, чтобы характерная величина неровностей поверхности проводника была существенно меньше толщины скин-слоя – иными словами поверхность должна быть достаточно гладкой.

При частотах ниже десятка килогерц скин-эффект мал и плотность тока практически одинакова по всему поперечному сечению проводника. При этом изменение импеданса в магнитном поле связывают с так называемым магнитоиндуктивным эффектом. Он является следствием наличия внутренней индуктивности проводника $L_i(\mu_t)$, которая, как и толщина скин-слоя, зависит от эффективной магнитной проницаемости μ_t . Импеданс проводника, определяемый магнитоиндуктивным эффектом, может быть записан в виде [3, 4]:

$$Z = R_{dc} - (j\omega / c^2)L_i(\mu_t), \quad (5)$$

где R_{dc} – сопротивление проводника постоянному току.

В общем случае импеданс проводника будет определяться как магнитоиндуктивной составляющей, так и толщиной скин-слоя. Однако на высоких частотах магнитоиндуктивная компонента мала и для упрощения расчетов ей обычно пренебрегают [4].

Таким образом, для появления ГМИ-эффекта необходимо, чтобы поперечная магнитная проницаемость датчика имела большую величину и значительно изменялась во внешнем магнитном поле. Следовательно, для существования ГМИ-эффекта принципиальным является магнитная мягкость материала [18].

Обоснование преимуществ и характеристика направлений использования МИД на основе аморфных микропроводов в качестве ДУП. Миниатюрные магнитные датчики магнитного поля на основе магнитоимпедансного эффекта в аморфных ферромагнитных сплавах могут служить базовым элементом для создания приборов магнитной дефектоскопии; различных устройств автоматики и робототехники. Правильный подбор состава аморфного сплава и режимов его термоманитной и/или термомеханической обработки позволяет добиться диапазона постоянного или низкочастотного магнитного поля, переключаемого с помощью магнитоимпедансного датчика, порядка 100 Э [26].

Основное преимущество МИД магнитного поля от датчика Холла – это высокая температурная стабильность, что исключает необходимость использования специальных схем температурной компенсации или стабилизации. Кроме того, МИД имеет всего два контакта. Соответственно, его подключение к электрической схеме устройства контроля/управления осуществляется всего двумя проводами, а не четырьмя, как в датчике Холла. Это существенно повышает простоту и надежность использования выносного варианта датчика магнитного поля.

Значительное падение напряжения на аморфных и нанокристаллических проводниках под действием магнитного поля при прохождении по проводнику переменного или импульсного электрического тока позволяет применить магнитоимпедансный эффект в разнообразных по конструкции датчиках магнитного поля.

Дифференциальный коэффициент преобразования лучших МИД составляет 0,5-2,0 мкВ/нТл на узком участке возрастающей ветви характеристики при подходе к максимуму изменения импеданса. На спадающей ветви характеристики чувствительности этот коэффициент значительно (на один-два порядка) ниже. Чувствительность на участке возрастания импеданса зависит от размеров датчика. Таким образом, МИД магнитного поля могут найти широкое применение в различных технических устройствах при работе в диапазоне магнитных полей средней напряженности – от 0,2 Э до 200 Э [17].

К недостаткам МИД относятся следующие: чувствительность к механическим воздействиям; необходимость смещения в магнитном поле или приложения соответствующего механического напряжения.

Эффект ГМИ имеет место не только в магнотриксционных материалах. Однако, именно в них возможно гибкое варьирование магнитных параметров датчика путем изменения локальных механических напряжений, приложенных к его магниточувствительной части. В данном случае можно считать, что эффект ГМИ во многом связан с поверхностью, так как лишь тонкий поверхностный слой материала оказывается вовлеченным в процесс изменения сопротивления.

Для достижения высокого эффекта ГМИ требуется значительная зависимость магнитной проницаемости от приложенного внешнего магнитного поля. Поэтому, как отмечалось выше, целесообразно использование магнитомягких магнотриксционных материалов, так как они легко намагничиваются в слабых полях; обладают низкой коэрцитивной силой; высокой магнитной проницаемостью.

Использование аморфных магнитомягких материалов выгоднее в связи с преимущественным вкладом в получаемые эффекты магнитоупругой анизотропии (связанной с внутренними напряжениями, магнотриксцией), а также «наведенной анизотропии» (она связана с механическими напряжениями, отжигом материалов под такими напряжениями или в магнитном поле). Это позволяет варьировать параметры указанных датчиков путем изменения условий (технологий) их изготовления.

Магнитомягкие материалы, предназначенные для использования в МИД, могут иметь различную форму.

1. Ленты (поперечное сечение $S \geq 4 \times 10^4 \text{ мкм}^2$). Достоинства: быстрый и дешевый процесс получения путем прокатки; хорошие магнитомягкие свойства (малая коэрцитивная сила - десятки А/м, высокая магнитная проницаемость). Недостатки: для изготовления датчиков из магнитомягких материалов необходимы размеры лент в несколько раз превышающие размеры магнитных датчиков на основе эффекта Холла.

2. Провода (поперечное сечение $S \geq 2 \times 10^3 \text{ мкм}^2$). Достоинства: быстрый и дешевый процесс получения (например, протяжкой через фильеры); хорошие магнитомягкие свойства (малая площадь внутренней части кривой магнитного гистерезиса). Недостатки: слишком велики для изготовления микросенсоров по сравнению с аналогичными магнитными датчиками на основе эффекта Холла.

3. Тонкие магнитные пленки. Достоинства: хорошее технологическое сочетание с процессом получения интегральных микросхем. Недостатки: медленный и дорогостоящий процесс получения (электролитическим осаждением, напылением в вакууме и пр.); магнитомягкие свойства хуже, чем у лент; значительное влияние оказывает подложка и, особенно, ее рельеф.

4. Микропровод (поперечное сечение $4 < S \leq 2 \times 10^3 \text{ мкм}^2$). Достоинства: быстрый и дешевый процесс получения; хорошие магнитомягкие свойства (коэрцитивная сила как у лент или пленок, высокая магнитная проницаемость); размеры удобные для применения в микросенсорах. Не имеют существенных недостатков.

Исходя из сравнительного анализа различных видов чувствительных элементов датчиков на основе магнитострикционных материалов в отношении их размеров и геометрии, можно сделать вывод о том, что применение микропроводов является наиболее подходящим решением для изготовления магнитных сенсоров, в частности апкдзначенных для ДУП. Микропровода отличаются большим неоднородным полем остаточных напряжений внутри металлической сердцевины, что вызвано особенностями технологий их производства.

Аморфные микропровода в стеклянной оболочке (АМвСО) получают методом Улитовского-Тейлора. Его суть состоит в непрерывном заполнении жидким металлом стеклянного капилляра, который вытягивается из вертикально расположенной стеклянной трубки вместе с заполняющим ее расплавом, расплавленных в микропечи-индукторе, а затем быстро охлаждается (закаляется) и сматывается на бобину (рис. 5) [20].

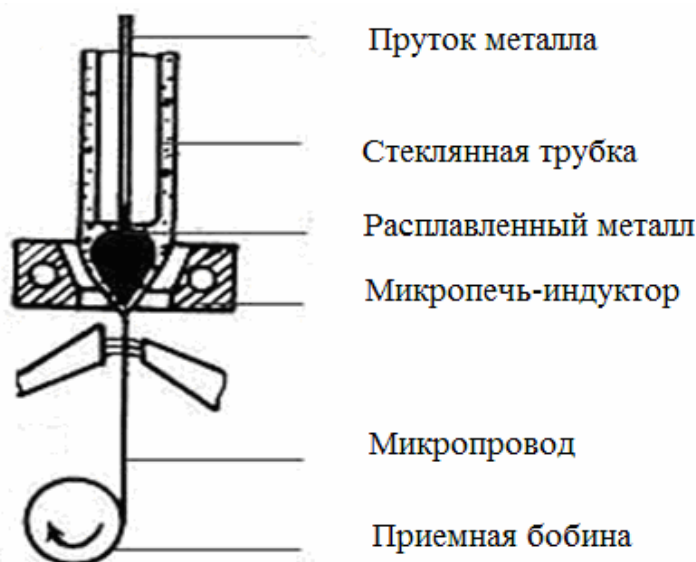


Рис. 5. Принципиальная схема получения АМвСО методом Улитовского-Тейлора

В процессе такого изготовления высокий уровень механических напряжений внутри металлической сердцевины микропровода возникает за счет трех основных факторов (видов воздействий): закалка; вытягивание и смотка; при охлаждении – за счет разницы коэффициентов термического расширения металлической сердцевины и стеклянной оболочки АМвСО.

Существует ряд примеров использования аморфных микропроводов (АМП) в качестве датчиков в информационно-измерительных системах. Так в [21] произведены анализ и обоснование применимости АМП, исполненных в виде устройства ИС КМОП (интегральные схемы комплементарных металлооксидных полупроводников), в качестве МИД. Показана применимость материалов данного типа при производстве чипов электронных компасов для мобильных устройств. Авторами работы описаны прототипы миниатюрных устройств, спроектированных на основе АМП диаметром 10-30 μm . Это могут быть датчики направления; магнитного поля; биомагнитного поля с пределом чувствительности 1 пикотесла, электронные компасы. В [21] приведены характеристики этих прототипов (теоретические и экспериментальные).

Отметим, что высокая чувствительность датчиков на основе АМП потенциально позволяет использовать их в рамках магнитокардиографических исследований. Сейчас для этой цели используются сквид-датчики (Superconducting Quantum Interference Device) на основе эффекта Джозефсона. Они имеют чувствительность по магнитному полю до 10^{-12} Тесла, но требуют охлаждения до очень низких температур. Для клинических целей это оказывается неприемлемым [9]. Использование нескольких миниатюрных датчиков на основе АМП потенциально позволяет осуществлять регистрацию пространствен-

ных характеристик переменного во времени магнитного поля при работе сердца. Это является некоторым аналогом многоканальной электрокардиографии, однако магнитокардиографический сигнал несет в себе информацию с иным содержанием. Возможности использования рассматриваемых датчиков для снятия многоканальной магнитоэнцефалограммы нуждаются в специальном обсуждении.

Статья [23] носит обзорно-дискуссионный характер. Её основным направлением является анализ / оценка работ, связанных с изучением и применением структур и устройств на основе ферромагнитных микропроводов. Описаны основные свойства данного вида материалов: динамика доменных стенок, характеризующаяся высокой скоростью изменения; наличие ГМИ; значительное влияние внешних напряжений на магнитные свойства. Авторами приведены примеры реализованных интерфейсов, в основе которых лежит использование ферромагнитных микропроводов, в частности, трехосевой электронный компас и датчики магнитного поля. Отмечается возможность организации массового производства таких устройств на основе материалов данного типа.

Авторами статьи [19] описана модель системы, предназначенной для измерения магнитоимпеданса, предназначенной для контроля выходных параметров микропроводов с целью применения их в устройствах электронной техники. Кроме того, авторами была исследована возможность создания электрических контактов микропроводов с медными контактами. Показаны различные варианты конструкции и приведена толщина слоя меди, используемого для создания электрического контакта. Предложены и реализованы несколько вариантов создания электрического соединения. Кроме того, авторами приведены зависимости величин ГМИ от частоты электрического тока. Произведена оценка стабильности работы устройства, использующего сочетание микропровода и медной подложки. Подобраны оптимальные параметры технологии металлизации медным покрытием: 147.12 А/дм^2 в течение 45 секунд. Результаты данной работы могут быть использованы при создании МИД на основе эффекта ГМИ.

В [18] представлена конструкция магнитометра, основанного на использовании недиагонального ГМИ эффекта в микропроводах из кобальта в стеклянной оболочке. Чувствительный элемент магнитометра представляет собой отрезок микропровода имеющего состав Co-Fe-Ni-B-Si-Mo длиной 10 мм, вокруг которого размещена катушка из 85 витков медного провода. В статье приводится прототип магнитометра, изготовленный на основе разработанной конструкции.

Итак, несмотря на очевидную практическую применимость АМвСО, на данный момент практически нет патентов и детальных описаний применений таких устройств в информационно-измерительных системах. Поэтому, в данной статье предлагается прототип конструкции МИД на основе АМП. Это техническое решение в настоящее время обсуждается с целью его доработки и последующего патентования.

Пример конструкции МИД на основе АМП. На вал электродвигателя устанавливается постоянный магнит или микрокатушка, через которую пропускается постоянный электрический ток. Датчик представляет собой печатную плату с вырезом для крепления на неподвижном корпусе двигателя вокруг его вала. В силу использования поперечного эффекта ГМИ направление внешнего поля задано перпендикулярно плоскости печатной платы датчика. По контуру отверстия (выреза) радиально запаиваются микропровода требуемого состава (рис. 6). Для обеспечения целостности элементов платы допустимо использование внешнего корпуса из пластика с прорезями, расположенными соответственно над микропроводами. Более детально конструкция платы будет приведена ниже.

Определяющими факторами для достижения наибольших величин ГМИ-соотношения являются следующие параметры: частота тока, протекающего через чувствительный элемент датчика (АМвСВ) и величина внешнего магнитного поля. Генерация высокочастотного тока (частотой порядка нескольких мегагерц) может быть осуществлена при помощи генератора Пирса [10] или другого источника. Принципиальная электрическая схема устройства датчика приведена на рисунке 7.

Каскад на основе микросхемы инвертора DD1, кварцевого резонатора Q1, резистора R1 и конденсаторов C1 и C2 задает высокочастотные пульсации напряжения требуемой частоты. Для каждого состава АМП необходимо экспериментально определять оптимальное соотношение частоты тока, генерируемого в цепи и величины внешнего магнитного поля, достаточного для изменения сопротивления вследствие проявления эффекта ГМИ. Такое определение осуществляется путем последовательного измерения ГМИ-отношения при варьировании частоты протекающего через микропровод тока и величины внешнего магнитного поля.

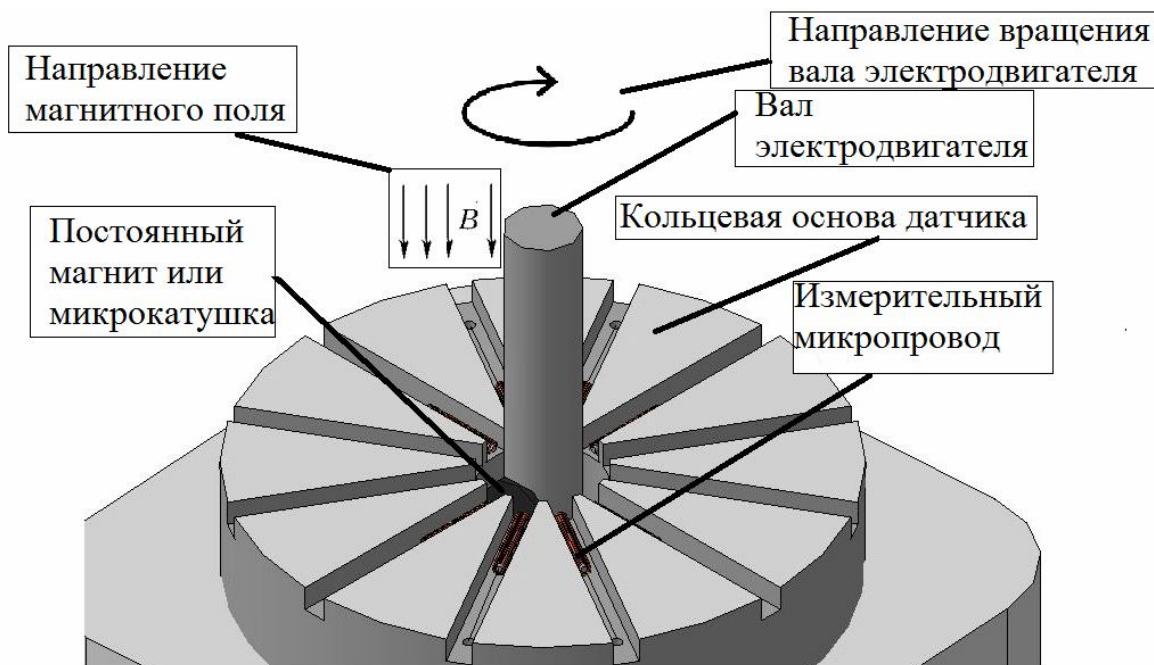


Рис. 6. Схема использования ДУП на основе ГМИ-эффекта

Через нагрузочные резисторы $R_2 \dots R_{21}$ высокочастотные импульсы поступают на отрезки АМП, показанных на схеме как переменные сопротивления $R_{22} \dots R_{41}$. Изменения падения напряжения на АМвСО, возникающие при прохождении мимо них источника магнитного поля (он закреплен на валу) в направлении перпендикулярном сопротивлениям $R_{22} \dots R_{41}$ (поперечный эффект ГМИ) передается через разъем X_1 для проведения измерений.

Для изменяющегося напряжения, поступающего через разъем X_1 , возможно его определение при помощи аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) в виде отдельной микросхемы или интегрированного в микроконтроллер. Для этого необходимо обработать выходные сигналы с каждого АМП при помощи интегрирующих каскадов, которые в свою очередь и будут подключены к АЦП. Отсюда вытекает необходимость использования АЦП с большим количеством входов в случае ДУП большой разрешающей способности (с большим количеством МИД на основе АМП) или же применения мультиплексора для поочередного опроса датчиков.

Таким образом, изменение сопротивления каждого АМвСО можно измерить на основе изменения величины падения напряжения на нем. Такой подход позволяет добиться высокой пространственной разрешающей способности МИД, в том числе за счет увеличения плотности компоновки чувствительных элементов в виде АМП на печатной плате.

Оптимально радиальное расположение АМП МИД относительно вала двигателя. При этом направление магнитного поля магнита, закрепленного на валу двигателя, задается перпендикулярно поверхности платы при использовании поперечного эффекта ГМИ и вдоль направления токов в АМП – при использовании поперечного эффекта ГМИ, как было сказано выше. Если же используется продольный ГМИ эффект, то необходимо предусматривать либо отверстие в печатной плате под вал двигателя с большим диаметром, либо применять постоянные магниты малой толщины для более компактного размещения их на валу. Нижняя сторона печатной платы представляет собой многоугольник со сплошной поверхностью металлизации и предназначена для экранирования схемы от внешних высокочастотных наводок. Для описанных технических решений средние размеры печатной платы датчика не будут превышать $40 \times 40 \times 3$ мм. Возможное размещение всех элементов устройства схематично показано на рисунке 8.

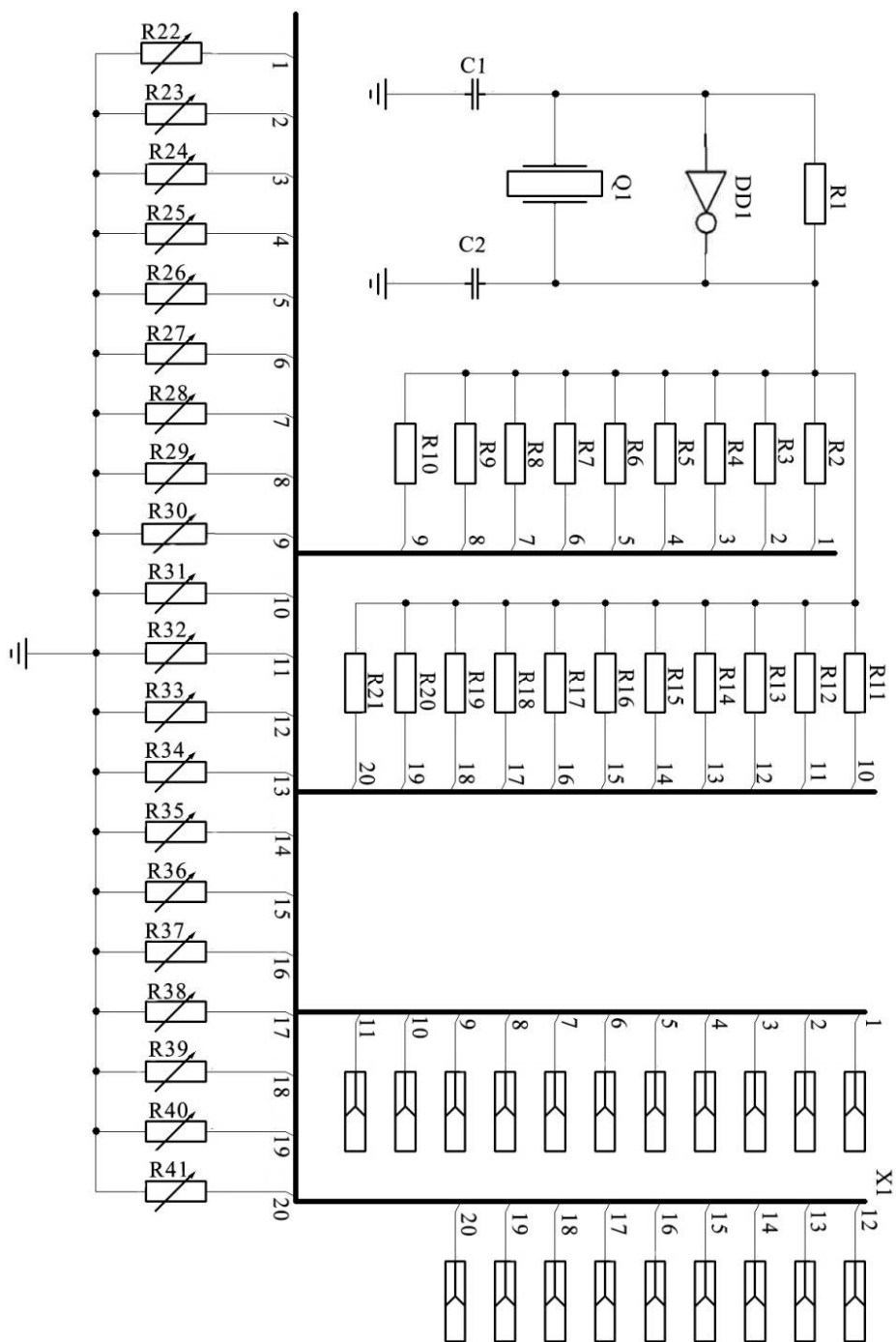


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема ДУП на основе аморфных микропроводов

Очевидная простота такого решения, а также широкий спектр функциональных возможностей, связанных с изменением разрешающей способности устройства в зависимости от количества АМП, показывает потенциальную применимость МИД на основе АМвСО для детектирования изменяющихся магнитных полей, в частности, применительно к использованию в ДУП.

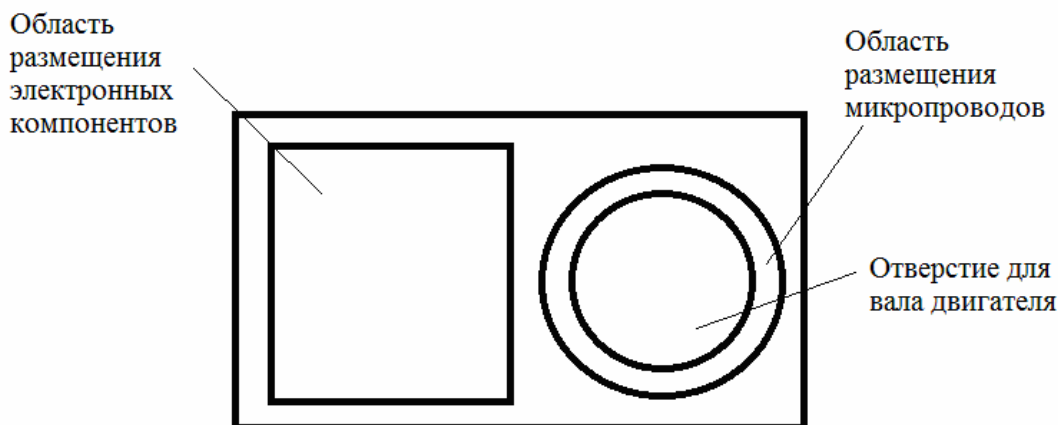


Рис. 8. Схематическое изображение взаимного расположения элементов печатной платы датчика

Оценка стоимости мелкосерийного изготовления МИД на основе АМвСО. В таблице 1 приведен список компонентов без расшифровки используемых номиналов и моделей, но с учетом средней рыночной стоимости электронных элементов соответствующих типов на 15.06.2016.

Таблица 1

Комплектующие и расходные материалы, необходимые для изготовления датчика

Комплектующий элемент или расходный материал	Необходимое количество, шт.	Стоимость единицы, руб.	Оценка общей стоимости, руб.
Резистор	20	3	60
Микропровод, 5 мм	20	0.05	1
Микросхема-инвертор	1	15	1
Пленочный конденсатор	2	3	6
Пины PLSC-10	2	30	60
Микроконтроллер	1	119	119
Фольгированный текстолит (0.01 м ²)	1	2	2
Хлорное железо (безводное), 150 г.	1	80	80
Персульфат аммония, 50 г.	1	20	20
Итого			349

Расходами на электроэнергию при изготовлении датчика и его использовании можно пренебречь, так как они будут невелики.

В приведенной таблице не учитываются трудозатраты на выполнение некоторых технологических операций (включая травление медного слоя на плате для получения необходимого «рисунка» печатных проводников); сборку устройства, его тестирование.

Оценим вклад в стоимость одного датчика операций по его изготовлению. Примем суммарные трудозатраты на изготовление одного датчика равным 4 часам. Согласно данным на 2016 год [13–15] примем среднюю ежемесячную зарплату (T_0) специалиста, занимающегося монтажом электрических соединений в Астрахани, равной 20 тыс. руб. Среднее количество рабочих часов N в месяц при 40-часовой рабочей неделе во втором квартале 2016 года составляет 173 ч. Стоимость трудозатрат на изготовление датчика примем определяемой по:

$$T = (T_0 t_p) / N, \quad (6)$$

где t_p – количество рабочих часов. Тогда в нашем случае $T = 462$ руб.

Следовательно, себестоимость одного датчика – примерно 811 руб. (это соответствует средней рыночной стоимости датчика Холла). Однако при переходе к средне- и крупносерийному производству рассматриваемых в статье МИД на основе АМвСО их себестоимость существенно снизится.

Выводы. 1. Показано, что точность определения напряженности магнитного поля с использованием МИД на основе АМП выше точности существующих датчиков на основе эффекта Холла. 2. Обосновано, что достоинствами использования АМП в конструкциях МИД являются следующие: хорошие характеристики чувствительности магнитомягких материалов; относительная простота технологий изготовления датчиков. 3. Описаны принципы работы МИД на основе АМП; особенности подключения таких датчиков к микроконтроллеру (или АЦП) информационно-измерительного комплекса. 4. Предложена оригинальная конструкция ДУП на основе МИД. 5. Произведена оценка стоимости изготовления МИД на основе использования АМП. Выявлено, что эта стоимость даже при мелкосерийном изготовлении не превышает стоимость датчиков на основе эффекта Холла.

Список литературы

1. Аксенов О. И. Магнитная структура аморфных микропроводов в стеклянной оболочке / О. И. Аксенов, Н. Н. Орлова, Ю. П. Кабанов, В. С. Горнаков, С. И. Божко, А. С. Аронин // Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях наноструктур и наноматериалов : тезисы докладов XXVI Российской конференции по электронной микроскопии и 4-й Школы молодых ученых. – 2016. – Т. 2. – С. 380–381.
2. Антонов А. С. Асимметричный гигантский магнитоимпеданс в аморфных микропроводах при воздействии скручивающих напряжений / А. С. Антонов, Н. А. Бузников, А. Б. Грановский // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, вып. 6. – С. 73–81.
3. Антонов А. С. Магнитоимпеданс, доменная структура и нелинейные эффекты в магнитомягких аморфных проволоках (обзор). Часть I / А. С. Антонов, Н. А. Бузников, А. А. Рахманов, И. Т. Якубов // Материаловедение. – 2008. – № 7. – С. 40–47.
4. Антонов А. С. Магнитоимпеданс, доменная структура и нелинейные эффекты в магнитомягких аморфных проволоках (обзор). Часть II / А. С. Антонов, Н. А. Бузников, А. А. Рахманов, И. Т. Якубов // Материаловедение. – 2008. – № 8. – С. 49–55.
5. Базанов П. Датчики положения для современных систем автоматизации в примерах и иллюстрациях / П. Базанов, И. Вербов // Компоненты и технологии. – 2006. – № 7.
6. Гуманюк М. Н. Магнито-упругие датчики в автоматике / М. Н. Гуманюк. – Киев : Техника, 1972. – 264 с.
7. Карпасюк В. К. Особенности построения датчиков магнитного поля на основе эффекта колоссального магнитосопротивления / В. К. Карпасюк, А. М. Смирнов, А. Г. Баделин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 291–297.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2000. – Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. – 656 с.
9. Мальвина А. С. Автоматизация, диспетчеризация и информатизация высокотехнологичных медучреждений как средство повышения эффективности их работы / А. С. Мальвина, Ю. М. Брумштейн, Е. В. Складенко, А. Б. Кузьмина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 1. – С. 122–138.
10. Платт Ч. Электроника: логические микросхемы, усилители и датчики для начинающих / Ч. Платт. – СПб. : БХВ-Петербург, 2015. – 464 с.
11. Прокошин А. Ф. Гигантский магнитоимпеданс в аморфных и нанокристаллических мультислоях / А. Ф. Прокошин, Н. А. Усов, А. Н. Лагарьков // ФММ. – 1997. – Т. 83, № 6. – С. 6071.
12. Сайт некоммерческого проекта, предоставляющего информацию по измерительным приборам. – Режим доступа: <http://www.devicesearch.ru/article/enkoderu> (дата доступа 15.06.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
13. Сайт поиска открытых вакансий. – Режим доступа: <http://ru.jobsora.com> (дата доступа 15.06.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
14. Сайт поиска открытых вакансий. – Режим доступа: <https://rabota.yandex.ru> (дата доступа 15.06.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
15. Сайт поиска открытых вакансий. – Режим доступа: <http://workius.ru> (дата доступа 15.06.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
16. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – Москва : УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – Т. 8, 9, вып. 8, 9: Квантовая механика. – С. 304.
17. Хабловски И., Скулимовски В. Электроника в вопросах и ответах / И. Хабловски, В. Скулимовски. – Москва : Радио и связь, 1984. – 304 с.
18. Gudoshnikov S. Highly sensitive magnetometer based on the off-diagonal GMI effect in Co-rich glass-coated microwire / S. Gudoshnikov, N. Usov, A. Nozdrin, M. Ipatov, A. Zhukov, V. Zhukova // Physical status solidi. – 2010. – Vol. 211. – P. 980–985.
19. Jing-Shun Liu. GMI output stability of glass-coated Co-based microwires for sensor application / Jing-Shun Liu, Xiao-Dong Wang, Fa-Xiang Qin, and Fu-Yang Cao, Da-Wei Xing, Hua-Xin Peng, Xiang Xue, and Jian-Fei Sun // Piers online. – 2011. – Vol. 7. – P. 661–665.

20. Larina V. S. Preparation and properties of glass-coated microwires / V. S. Larina, A. V. Torcunova, A. Zhukov, J. Gonzalez, M. Vazquez, L. Panina // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2002. – Vol. 249. – P. 39–45.

21. Mohri K. Recent advances of amorphous wire CMOS IC magneto-impedance sensors: Innovative high-performance micromagnetic sensor chip / K. Mohri, T. Uchiyama, Larissa V. Panina, M. Yamamoto // *Hindawi Publishing Corporation*. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–8.

22. Panina L. V., Makhnovskiy D. P., Mohri K. Magnetoimpedance in amorphous wires and multifunctional applications: From sensors to tunable artificial microwave materials / L. V. Panina, D. P. Makhnovskiy, K. Mohri // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2004. – Vol. 272/276 (2). – P. 1452–1459.

23. Vazquez M. On the state-of-the-art in magnetic microwires and expected trends for scientific and technological studies / M. Vazquez, H. Chiriach, A. Zhukov, L. Panina, T. Uchiyama // *Physical status solidi*. – 2010. – Vol. 208. – P. 493–501.

24. Wiggins J. Magneto-impedance of glass-coated Fe–Ni–Cu microwires / J. Wiggins, H. Srikanth, K.-Y. Wang, L. Spinu, J. Tang // *Journal of Applied Physics*. – 2000. – Vol. 87, № 9. – P. 4810–4812.

25. Zhukov A. Giant magnetoimpedance effect and domain wall dynamics in Co-rich amorphous microwires / A. Zhukov, A. Chizhik, M. Ipatov, Talaat A., J. M. Blanco, A. Stupakiewicz, V. Zhukova // *Journal of applied physics*. – 2015. – Vol. 117. – P. 043904-1 – 043904-7.

26. Zhukova V. Thin magnetically soft wires for magnetic microsensors / V. Zhukova, M. Ipatov, A. Zhukov // *Sensors*. – 2009. – Vol. 9. – P. 9216–9240.

References

1. Aksenov O. I., Orlova N. N., Kabanov Yu. P., Gornakov V. S., Bozhko S. I., Aronin A. S. Magnitnaja struktura amorfnyh mikroprovodov v stek-ljannoj obolochke [Glass-coated amorphous microwires magnetic structure]. *Sovremennye metody jelektronnoj i zondovoj mikroskopii v issledovanijah nanostruktur i nanomaterialov : tezisy dokladov XXVI Rossijskoj konferencii po jelektronnoj mikroskopii i 4-j Shkoly molodyh uchenyh* [The modern methods of electron and probe microscopy in researches of nanostructure and nanomaterials. Proceedings of the XXVI Russian conference of electron microscopy], 2016, vol. 2, pp. 380–381.

2. Antonov A. S., Buznikov N. A., Granovskij A. B. Asimmetrichnyj gigantskij magnitoimpedans v amorfnyh mikroprovodokah pri vozdeystvii skruchivajushchih napryazhenij [Asymmetrical giant magneto-impedance in amorphous microwires with structural stresses effect], *JETP Letters*, 2014, vol. 40, no. 6, pp. 73–81.

3. Antonov A. S., Buznikov N. A., Rahmanov A. A., Jakubov I. T. Magnitoimpedans, domennaja struktura i nelinejnye jeffekty v magnitomjagkih amorfnyh provodokah (obzor). Chast' I [Magnetoimpedance, domain structure and nonlinear effect in amorphous microwires with structural stresses effect (review), Part I]. *Materialovedenie* [Material science], 2008, no. 7, pp. 40–47.

4. Antonov A. S., Buznikov N. A., Rahmanov A. A., Jakubov I. T. Magnitoimpedans, domennaja struktura i nelinejnye jeffekty v magnitomjagkih amorfnyh provodokah (obzor). Chast' II [Magnetoimpedance, domain structure and nonlinear effect in amorphous microwires with structural stresses effect (review), Part 2]. *Materialovedenie* [Material science], 2008, № 8, pp. 49–55.

5. Bazanov P., Verbov I. Datchiki polozhenija dlja sovremennyh sistem avtomatizacii v primerah i illjustracijah [Position detectors for modern systems of automation with examples and illustrations], *Komponenty i tehnologii* [Components and technologies], 2006, no. 7.

6. Gumanjuk M. N. *Magnito-uprugie datchiki v avtomatike* [Magnetoelastic sensors in automation], Kiev, Tehnika Publ., 1972. 264 p.

7. Karpasjuk V. K., Smirnov A. M., Badelin A. G. Osobennosti postroenija datchikov magnitnogo polja na osnove jeffekta kolossal'nogo magnitosoprotivlenija [Peculiarities in the design of magnetic field sensors based on the colossal magnetoresistance effect]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: management and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 291–297.

8. Landau L. D., Lifshic E. M. *Teoreticheskaja fizika. Tom VIII. Jelek-trodinamika sploshnyh sred* [Theoretical physics. Vol. VIII. Electrodynamics of continua], Moscow, FIZMATLIT Publ., 2000. 656 p.

9. Malvina A. S., Brumshteyn Yu. M., Sklyarenko Ye. V., Kuzmina A. B. Avtomatizatsiya, dispetcherizatsiya i informatizatsiya vysokotekhnologichnykh meduchrezhdeniy kak sredstvo povysheniya effektivnosti ikh raboty [Automation, dispatching and informatization of hi-tech medical institutions as means of their operation efficiency increase] *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: management and High Technologies], 2014, no. 1, pp. 122–138.

10. Platt Ch. *Jelektronika: logicheskie mikroshemy, usiliteli i datchiki dlja nachinajushchih* [Electronics: micrologic units, amplifiers and sensors for beginners], Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2015. 464 p.

11. Prokoshin A. F., Usov N. A., Lagar'kov A. N. Gigantskij magnitoimpedans v amorfnyh i nanokristallicheskih multislajah [Giant magnetoimpedance in amorphous and nanocrystalline multilayers], *FMM*, 1997, vol. 83, no. 6, pp. 6071.

12. *Non-commercial project site about measuring devices*. Available at: <http://www.devicesearch.ru/article/enkodery> (accessed 15 June 2016).

13. *Open vacancies site*. Available at: <http://ru.jobsora.com> (accessed 15 June 2016).
14. *Open vacancies site*. Available at: <https://rabota.yandex.ru> (accessed 15 June 2016).
15. *Open vacancies site*. Available at: <http://workius.ru> (accessed 15 June 2016).
16. Fejnman R., Lejton R., Sjends M. *Fejnmanovskie lekcii po fizike* [Feynman physics lectures.], Moscow, URSS: Knizhnyj dom «LIBROKOM» Publ., 2013, vol. 8, 9, issue 8, 9: Quantum mechanics, pp. 304.
17. Hablovski I., Skulimovski V. *Jelektronika v voprosah i otvetah* [Electronics in questions and answers], Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1984. 304 P.
18. Gudoshnikov S., Usov N., Nozdrin A., Ipatov M., Zhukov A. and Zhukova V. Highly sensitive magnetometer based on the off-diagonal GMI effect in Co-rich glass-coated microwire. *Physical status solidi*, 2010, vol. 211, pp. 980–985.
19. Jing-Shun Liu, Xiao-Dong Wang, Fa-Xiang Qin, and Fu-Yang Cao, Da-Wei Xing, Hua-Xin Peng, Xiang Xue, Jian-Fei Sun. GMI output stability of glass-coated Co-based microwires for sensor application. *Piers online*, 2011, vol. 7, pp. 661–665.
20. Larina V. S., Torcunova A. V., Zhukov A., Gonzalez J., Vazquez M., Panina L. Preparation and properties of glass-coated microwires. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, vol. 249, pp. 39–45.
21. Mohri K., Uchiyama T., Panina Larissa V., Yamamoto M. Recent advances of amorphous wire CMOS IC magneto-impedance sensors: Innovative high-performance micromagnetic sensor chip. *Hindawi Publishing Corporation*, 2015, vol. 2015, pp. 1–8.
22. Panina L. V., Makhnovskiy D. P., Mohri K. Magnetoimpedance in amorphous wires and multifunctional applications: From sensors to tunable artificial microwave materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, vol. 272/276 (2), pp. 1452–1459.
23. Vazquez M., Chiriac H., Zhukov A., Panina L., Uchiyama T. On the state-of-the-art in magnetic microwires and expected trends for scientific and technological studies. *Physical status solidi*, 2010, vol. 208, pp. 493–501.
24. Wiggins J., Srikanth H., Wang K.-Y., Spinu L., Tang J. Magneto-impedance of glass-coated Fe–Ni–Cu microwires. *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 87, no. 9, pp. 4810–4812.
25. Zhukov A., Chizhik A., Ipatov M., Talaat A., Blanco J.M., Stupakiewicz A., Zhukova V. Giant magnetoimpedance effect and domain wall dynamics in Co-rich amorphous microwires. *Journal of applied physics*, 2015, vol. 117, pp. 043904-1 – 043904-7.
26. Zhukova V., Ipatov M. and Zhukov A. Thin magnetically soft wires for magnetic microsensors. *Sensors*, 2009, vol. 9, pp. 9216–9240.