

С.И. Федоров

(Украина, Днепропетровск, Государственное высшее учебное заведение “Национальный горный университет”)

ВЫБОР ТИПА МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ УСТРОЙСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЛЕЗНОГО КОМПОНЕНТА В РУДАХ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Введение. В последнее время в мировой науке интенсивно развивается направление по разработке разнообразных датчиков. Разрабатываются новые конструкции датчиков, предназначенных для измерения давления, плотности, температуры и других физических параметров, определение которых необходимо для управления технологическими процессами. Одно из наиболее плодотворно развивающихся направлений – разработка датчиков, воспринимающих изменение магнитного поля. Разработанные или улучшенные с использованием достижений современной науки датчики и системы нашли свое применение в измерительной технике, дефектоскопии, в приборах по определению параметров веществ, в системах управления технологическими процессами и т.п.

Цель исследования. Провести обзор датчиков, предназначенных для измерения параметров постоянных, переменных и импульсных электромагнитных полей. Исследовать характеристики этих датчиков и их конструкции. Выбрать тип датчика, наиболее пригодного для применения в устройстве для определения концентрации полезного компонента в рудах черных и цветных металлов.

Анализ публикаций. Для измерения параметров постоянных, переменных, пульсирующих и импульсных полей разработано большое количество датчиков. Наиболее широкое применение получили датчики Холла, датчики Виганда, феррозонды, SQUID (на основе сверхпроводящего квантового интерферометра) сенсоры, магнитоэлектрические датчики, магнитотранзисторы, магнитодиоды, магниторезисторы, магнитооптические системы, индукционные катушки, в том числе системы из нескольких индукционных катушек и многие другие. Такие датчики находят широкое применение в качестве чувствительных устройств для измерения параметров магнитного поля и магнитных свойств материалов, поиска магнитных включений, в металлоискателях, для измерения электрических сигналов, в измерительной технике. В зависимости от величины, которую измеряют эти устройства, возможно их применение и для измерения: магнитной индукции (тесламетры), напряженности магнитного поля (эрстедметры), магнитного потока (веберметры или флюксметры), коэрцитивной силы (коэрцитиметры), магнитной проницаемости (мю-метры), магнитной восприимчивости (каппа-метры) и т.п. Кроме того, эти датчики нашли свое применение при поиске полезных ископаемых, в археологии, в навигационных системах, на суше и в воздухе [1– 5, 9, 10].

Одним из новых направлений в технике является микромагнитоэлектроника, изучающая работу современных преобразователей магнитного поля, к которым относятся магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы, магнитотиристоры, элементы Холла, а также изделия микромагнитоэлектроники, созданные на их основе: магнитоочувствительные и магнитоуправляемые ИС, магнитные датчики и др. [2, 3]. Рассмотрим некоторые виды датчиков, предназначенных для измерения параметров магнитных полей.

Магниторезистивные датчики. Принцип действия магниторезистивных датчиков основан на зависимости сопротивления ферромагнитных материалов от интенсивности магнитного поля. В зависимости от угла между вектором магнитной индукции и направлением тока происходит изменение сопротивления датчика. В промышленности нашли применение очень дешевые и миниатюрные по размеру магниторезистивные датчики. Они представляют собой измерительный, резистивный элемент в форме меандра (рис. 1) сопротивлением от десятков до тысяч Ом [2].

Магниторезистивные датчики обладают высокой чувствительностью и позволяют измерять незначительные изменения магнитного поля от десятков мкТс. Эти датчики нашли свое применение в магнитометрии, магнитных сканерах, измерениях слабых полей, навигации, компенсации поля Земли, электронных и цифровых компасах, установках неразрушающего контроля и т.д. Преимуществами магниторезистивных датчиков являются: широкий диапазон рабочих температур ($\pm 100^\circ\text{C}$), отсутствие магнитного дрейфа, простота, надежность, долговечность и то, что работа датчиков не зависит от интенсивности магнитного поля [2, 3].

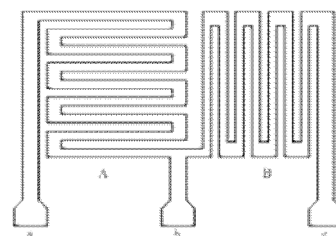


Рис. 1. Конструкция магниторезистивного датчика

Анизотропные магниторезистивные датчики (AMR). Подробное описание физических принципов некоторых датчиков AMR – типа можно найти в работе [26]. Недостатками таких датчиков являются их ограниченный динамический диапазон (при насыщении); чувствительность к неоднородности постоянного магнитного поля, которая может привести к сильным нарушениям характеристик датчика. На характеристики датчика могут повлиять как внешние источники, так и наведенные вихревые токи [24].

Сверхмагниторезистивные датчики (GMR). Характеристики GMR– датчиков приведены в работе [27]. Чувствительность таких датчиков в большой степени зависит от частоты (для них характерна высокая чувствительность в области средних частот, которая заметно уменьшается на низких частотах). К их недостаткам можно отнести: ограниченный динамический диапазон и узкие линейные характеристики. Влияние магнитного поля приводит к тому, что выходной сигнал не зависит от направления поля. Они нечувствительны к магнитным полям, перпендикулярным по направлению их чувствительности. Кроме этого характеристики таких датчиков не зависят от величины магнитного поля.

Датчики Холла. Для контроля магнитной индукции самым известным и используемым устройством являются датчики Холла. Измерительные элементы на основе этих датчиков отличаются небольшими размерами и состоят из одного, двух или трех кристаллов полупроводникового материала. Датчики магнитного поля, использующие эффект Холла в своей работе, являются активными, они сами вырабатывают измерительное напряжение, связанное с магнитным полем (рис. 2).

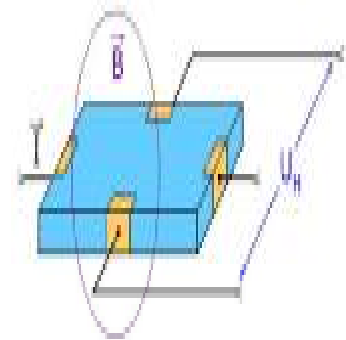


Рис. 2 Датчик Холла

Датчики Холла широко используют для измерений перемещения и положения. Если постоянный магнит поместить на мембране, то датчик Холла можно использовать и как датчик давления. Достоинствами этих датчиков являются: возможность измерения постоянных и переменных магнитных полей, хорошее пространственное разрешение из-за малых размеров преобразователей, высокая чувствительность. Недостатком является узкий диапазон рабочих температур и низкая стойкость к внешним воздействиям [1, 3].

Датчики Виганда. Новейшей разработкой в области датчиков магнитного поля является датчики Виганда. Принцип действия этих датчиков основан на так называемом эффекте Виганда. Датчик Виганда представляет собой двухполюсник, реагирующий на магнитные поля и вырабатывающий сигналы до нескольких вольт при условии, что напряженность управляющего магнитного поля превышает величину напряженности порога срабатывания (зажигания). Датчик Виганда состоит из механически обработанной проволоки из викалоя (малого диаметра), намотанной в виде катушки, имеющей более тысячи витков (рис. 3). Когда датчик попадает в магнитное поле с определенной напряженностью, то направление намагничивания спонтанно изменяется. В результате этого возникает импульс напряжения длительностью до десятков микросекунд и с амплитудой в несколько вольт [1, 3].

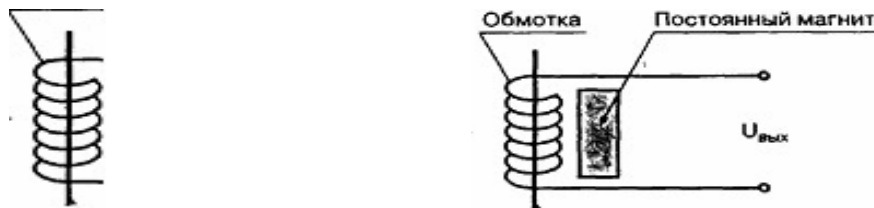


Рис. 3. Конструкция датчика Виганда с обмоткой, а также с обмоткой и постоянным магнитом

Преимуществами датчиков Виганда являются: широкий диапазон рабочих температур (± 200 °C), отсутствие источника питания, искробезопасность, отсутствие коротких замыканий, большая величина (несколько вольт) и независимость сигнала от частоты, с которой меняется магнитное поле.

Область применения этих датчиков простирается от задач измерения и контроля до систем управления доступом.

Феррозонды. Устройства, предназначенные для измерения напряженности внешних магнитных полей. Феррозонд представляет собой сердечник или комплект сердечников из магнитомягкого материала с обмотками. Применяются для измерения магнитной индукции слабых, постоянных и медленно изменяющихся с частотой не более сотен герц магнитных полей, для обнаружения ферромагнитных объектов, для измерения магнитной восприимчивости и магнитного момента слабомагнитных веществ. Благодаря высокой чувствительности, простоте конструкции, малым габаритам и высокой надежности феррозондовые преобразователи, широко используются в качестве полямеров (определение наличия магнитного поля и его напряженности), градиентомеров (градиент напряженности магнитного поля), портативных тесламетров, в магнитной дефектоскопии и при поиске полезных ископаемых [2]. Недостаток этих

датчиков в том, что феррозонды являются относительными индикаторами поля. Измеренные с их помощью значения представляют собой результат сравнения напряженностей внешнего поля с «эталонным».

Электростатические датчики – емкостные, основанные на эффекте периодического изменения емкости. Электростатические, в частности емкостные, датчики обладают высокой чувствительностью и добротностью, малой нелинейностью характеристики, малыми тепловыми потерями. Однако широкое применение емкостных датчиков ограничено большим выходным сопротивлением, необходимостью жесткой герметизации, трудностью исключения влияния паразитных емкостей [14].

Электромагнитные датчики, использующие эффект периодического изменения индуктивности или взаимоиנדуктивности.

Электромагнитные индуктивные датчики. Принцип действия этих датчиков заключается в периодическом изменении индуктивности (коэффициента самоиндукции) катушки или взаимоиנדуктивности при изменении сопротивления вещества, находящегося в ее магнитной цепи. Магнитное сопротивление изменяется либо при воздействии внешних магнитных полей либо при попадании в рабочую зону магнитных элементов.

Электромагнитные индуктивные датчики уступают емкостным по чувствительности и линейности характеристики, но превосходят их по выходной мощности, помехоустойчивости, надежности в условиях производства (где возможны колебания температуры и влажности окружающей среды)[14].

Высокочастотные индуктивные датчики используются для контроля размеров электропроводных (как правило, немагнитных) элементов. Частота питания выбирается достаточно высокой, для большей глубины проникновения электромагнитной волны в контролируемый объект. В случае высокой частоты – свойства материала практически не влияют на точность измерения. Контролируемый объект при поднесении к обмотке или помещению внутрь последней вытесняет магнитное поле, и этим изменяет (снижает) индуктивность обмотки [15].

Принцип работы высокочастотного индуктивного датчика основан на действии вихревых токов (для материалов с высокой проводимостью) или намагничивания (для магнитных материалов). Если вблизи обмотки, питаемой переменным током, находится проводящее тело или магнитный материал, то в нем возникают соответственно вихревые токи или поле намагничивания, что приводит к изменению электрических параметров обмотки (индуктивность и добротность). Изменение добротности вызвано затратой мощности на создание вихревых токов, а изменение индуктивности – наличием вторичного магнитного поля, направленного в сторону ослабления первичного. Внутри обмотки возбуждения может находиться воспринимающая обмотка, настроенная в резонанс частоте генератора. При внесении материала в рабочую зону катушки добротность меняется и соответственно изменяется напряжение на воспринимающей обмотке [15].

Индукционные датчики. Индукционный датчик состоит из катушки индуктивности и предназначен для измерения переменного магнитного поля. Принцип действия индукционных датчиков основан на явлении электромагнитной индукции. Напряжение, индуцируемое на катушке, помещенной в переменное магнитное поле, пропорционально величине измеряемой магнитной индукции. Известны несколько разновидностей таких датчиков, например, магнитоиндукционные и индукционные электромагнитные. У магнитоиндукционных датчиков магнитное поле создается постоянными магнитами. У индукционных электромагнитных датчиков поле создается источником переменного напряжения (тока).

Гальваномагниторекомбинационные (ГМР) преобразователи.

Представляет собой полупроводниковый резистор, управляемый магнитным полем. Работа, его основана на использовании магнитоконцентрационного эффекта (в полупроводниках с проводимостью близкой к собственной), который заключается в изменении средней концентрации носителей заряда в полупроводнике при воздействии поперечного или продольного магнитного поля. Достоинством ГМР-преобразователей является высокая линейность в слабых магнитных полях, высокая магнитная чувствительность. Один из основных недостатков – очень высокая трудоемкость изготовления.

Существуют и другие датчики магнитного поля, например, на основе магнитного резонанса, но для наших целей (использования для измерения полей, создаваемых различными материалами и породами) рассмотренных датчиков вполне достаточно.

Изложение основного материала.

Для определения концентрации полезного компонента в рудах основной задачей является правильный выбор оптимального преобразователя магнитного поля (датчика, чувствительного элемента). Для решения этой задачи необходимо провести сравнение известных устройств. Характеристики некоторых из них приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Сравнительные характеристики преобразователей магнитного поля [2, 13, 16]

Тип преобразователя магнит-	Размер активной час-	Магнитная чувствите-	Диапазон измеряемой	Диапазон рабочих	Динамический диапа-	Потребляемая мощ-
-----------------------------	----------------------	----------------------	---------------------	------------------	---------------------	-------------------

Автоматизация виробничих процесів

ного поля	ти, мм ²	льність, В/Тл	индукции, мТл	частот, Гц	зон, мТл	ность, мВт
Магниторезистивный	0,3–100	1–60	10 ⁻⁴ –10 ²	0–10 ⁹	300–1000	30–90
Датчики Холла (дискретные)	0,02–50	0,02–5	10 ⁻⁴ –10 ³	0–10 ⁷	1000	10–50
Феррозонды.	1–100	10	10 ⁻⁷ –10	0–10 ⁴	0,1–1	5–50
Магнито-чувствительный Z-элемент	5–2	500–600	10 ⁻⁹ –10 ³	0–10 ⁵	10–50	
Магнитоэлектрический	25–50	25		0–10 ⁹	1000–2000	1–5
ГМР-преобразователь	0,5–2	6–60		н/д	0–80	
Магнито-индуктивный	10x8x4	1–10	10 ⁻³ –10 ³	0.1–10 ⁶	1–200	

Таблица 2

Качественное сравнение некоторых преобразователей [2, 13, 16]

Тип преобразователя	Достоинства, недостатки, особенности применения
Магниторезистивный	Тип преобразования: "магнитный поток – сопротивление". Высокая магнитная чувствительность в сильных магнитных полях. Большой динамический диапазон и достаточная линейность в сильных магнитных полях. Широкий диапазон рабочих температур. Значительный ток потребления. Нелинейная характеристика в слабых магнитных полях
Датчик Холла (дискретный)	Тип преобразования: "магнитный поток – ЭДС" Высокая чувствительность и разрешающая способность. Большой динамический диапазон при хорошей линейности выходной характеристики. Широкий диапазон рабочих температур. Значительная величина остаточного напряжения и его нестабильность
Феррозонд	Тип преобразования: "магнитный поток – индуктивность". Очень высокая удельная магнитная чувствительность. Сравнительно малый ток потребления. Ограниченный динамический диапазон при удовлетворительной линейности. Ограниченный диапазон рабочих температур
Магнито-чувствительный Z-элемент	Тип преобразования: "магнитный поток – сопротивление" или "магнитный поток – частота". Высокая магнитная чувствительность. Сравнительно малый ток потребления. Ограниченный динамический диапазон и удовлетворительная линейность. Ограниченный диапазон рабочих температур
ГМР-преобразователь	Тип преобразования: "магнитный поток – сопротивление" Высокая удельная чувствительность. Малый ток потребления. Ограниченный динамический диапазон и удовлетворительная линейность. Ограниченный диапазон рабочих температур
Магнито-индуктивные	Тип преобразования: "магнитный поток – индуктивность" или "магнитный поток - частота". Очень высокая магнитная чувствительность. Малый ток потребления. Достаточный динамический диапазон при удовлетворительной линейности. Ограниченный диапазон рабочих температур

Сравнить результаты, полученные разными исследователями, не представляется возможным из-за ряда объективных критериев. Это связано с высокой сложностью систем приведенных ранее типов датчиков, различными их конструкциями, различной геометрией и размерами чувствительных элементов, различными системами обработки полученных сигналов и т.д.

Проведем сравнение некоторых близких по конструкции и применению видов датчиков.

Попытки использовать очень сложные датчики магнитного поля, такие как SQUID и Fluxgate датчики, для регистрирования изменения полей от низкочастотных вихревых токов (в дефектоскопии) [21–23] приводят к выводу, что такие системы вряд ли можно использовать в производственных условиях из-за сложности, большой стоимости и недостаточной надежности. Сравнение традиционных катушек индуктивности с улучшенной чувствительностью с коммерчески доступными датчиками магнитного поля, такими как AMR и GMR, для использования в промышленных установках дало следующие результаты [24]: наиболее перспективный датчик с высокой производительностью может быть создан на базе высокочувствительных индуктивных катушек. Одним из главных недостатков таких датчиков является то, что их изготовление должно проводиться высококвалифицированным, специально обученным

персоналом, в противном случае это приведет к низкой производительности и разбросу параметров этих датчиков [25].

Высокочувствительные индуктивные катушки находят широкое применение во многих отраслях современной промышленности. Приведем сферу их применения:

- для измерения перемещения металлических тел относительно датчика в динамических и статических условиях (ИП-5К);
- для обнаружения металлических включений в изоляционном материале, движущемся по конвейеру;
- в бесконтактных выключателях;
- для измерения малых амплитуд вибраций [15];
- в индуктивных датчиках местоположения;
- в магнито-индуктивных датчиках приближения и т.д.

Возможность применения высокочастотных индуктивных датчиков для измерения концентрации полезного компонента в рудах черных и цветных металлов в значительной мере определяется поверхностным эффектом (затухание магнитного поля и вихревых токов, им наведенных, при увеличении глубины проникновения в исследуемый материал). Несмотря на то, что индуктивные катушки снижают свою чувствительность на низких частотах, они могут успешно применяться на низкой частоте при измерениях полей, созданных вихревыми токами и вторичными магнитными полями. Приведем несколько способов повышения чувствительности индуктивных приемных катушек:

- увеличение диаметра катушек (который ограничивается только рабочим пространством);
- увеличение числа витков – использование тонкого эмалированного медного провода менее 20 мкм в диаметре с количеством витков до 8000;
- применение рабочих частот до 350 Гц для получения большой глубины зондирования материала в рабочей зоне [24].

Из данных, представленных для сравнения в табл. 1 и 2, можно сделать вывод, что для определения концентрации полезного компонента в рудах наиболее приемлемыми являются магнито-индуктивные датчики, в частности, высокочувствительные катушки индуктивности.

Датчики на основе катушек индуктивности охватывают широкий спектр детектируемого поля по своей протяженности, перекрывающий все виды других датчиков. Важным параметром при определении концентрации являются размеры охватываемого датчиками пространства: они должны превышать размеры проб материала. Если измерения не ограничены геометрическими размерами (например, величина проб может быть увеличена), то можно предположить, что индуктивные датчики более чувствительны, чем fluxgates на частоте около 0,003 Гц [28]. При сравнении с датчиками малого размера эта граница смещается к 10 Гц [29].

Чувствительность многих датчиков в большой степени зависит от возможности достижения высокой помехоустойчивости. При сравнении различных датчиков магнитного поля [28] по помехоустойчивости были получены следующие результаты (см. табл.3):

Таблица 3

Сравнение магнитных преобразователей по помехоустойчивости

Типы магнитных преобразователей	Уровни допустимых «шумов»
На основе SQUID– датчиков	Примерно $50 \text{ фТ Гц}^{-1/2}$
На основе индукционных катушек	Менее $100 \text{ фТ Гц}^{-1/2}$
fluxgates	Примерно $100 \text{ фТ Гц}^{-1/2}$
Магнитометры с оптической накачкой	Около $1 \text{ пТ Гц}^{-1/2}$
На магниторезистивных датчиках	Около $100 \text{ пТ Гц}^{-1/2}$
На элементах Холла	На уровне $10 \text{ нТ Гц}^{-1/2}$

Заключение

Анализ приведенных устройств показал, что современные датчики магнитного поля обладают рядом недостатков:

- нелинейность в сильных магнитных полях;
- узкий динамический диапазон;
- ограниченный диапазон рабочих температур;
- необходимость подачи питающего напряжения;
- наличие остаточных напряжений;
- низкая стойкость к статическому электричеству и радиоактивным излучениям [12].

На этом фоне выгодно отличаются индуктивные катушки. Использование катушек индуктивности в качестве приемника, измеряющего магнитное поле, дает ряд преимуществ, таких как:

- защита от внешних источников электромагнитных помех;
- линейность. Внешние факторы, влияющие на датчик, например, такие как температура, имеют линейную зависимость;
- низкий уровень насыщаемости при достаточно большом уровне магнитных полей;
- высокая гибкость в конфигурации датчиков, легкая адаптация к имеющимся электронным считывателям сигнала;
- простота работы и конструкции;
- простота в расчетах при конструировании катушек. Точный расчет параметров датчика (индукционной катушки) возможен благодаря прямой зависимости параметров от величины магнитной индукции в рабочей зоне датчика (количество витков, площадь поперечного сечения могут быть точно определены);
- широкий частотный и динамический диапазон;
- из-за отсутствия магнитных элементов в конструкции, датчик практически не зависит от измеряемого магнитного поля (по сравнению, например, с феррозондовыми датчиками) [17–20].

Однако, катушки датчиков обладают и некоторыми недостатками:

- чувствительность только к переменным магнитным полям;
- выходной сигнал зависит от частоты;
- необходимость в подключении интегрирующих цепей датчика, что вводит дополнительные погрешности при обработке сигнала;
- низкая технологичность производства;
- значительное время на изготовление;
- достаточно высокая цена.

Таким образом, современные индуктивные датчики являются наиболее приемлемым чувствительным элементом для измерения концентрации полезного компонента в рудах, а также могут с успехом применяться для измерения магнитных величин. С их помощью можно осуществлять тестирование вещества, находящегося в рабочей зоне с очень высокой чувствительностью, точностью и стабильностью.

Список литературы

1. Алейников А.Ф. Датчики (перспективные направления развития): учебное пособие / под ред. М.П. Цапенко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 176 с.
2. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника / М.Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 554 с.
3. Джексон Р.Г. Новейшие датчики / Р.Г. Джексон. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
4. Ермолов И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества / И.Н. Ермолов, Ю.Я. Останин. – М.: Высш. шк., 1988. – 368 с.
5. Bichurin M.I. Magnetolectric Sensor of Magnetic Field/ M.I. Bichurin, V.M. Petrov, R.V. Petrov, Y.V. Kiliba, F.I. Bukashev, Yu.V. Smirnov, D.N. Eliseev //Proceedings of The Fourth Conference On Magnetolectric Internation Phenomena In Crystals (MEIPIC-4)/Ferroelectrics, 2002, V. 280,
6. Бичурин М.И. Датчики электромагнитного поля/ М.И. Бичурин, Ю.В. Килиба, Р.В. Петров // VIII Всеросс. Науч.-техн. конф.: тез. докл. –Н. Новгород. НГТУ. Т. 2, 1996. С. 324.
7. Килиба Ю.В. Магнитоэлектрические датчики/ Ю.В. Килиба, Р.В. Петров // XXI Гагаринские чтения: Тез. докл. - М. МГАТУ. 1996, Ч.3. С. 148.
8. Большая Энциклопедия Нефти и Газа [Электронный ресурс]– Режим доступа <http://www.ngpedia.ru> – Дата доступа: 5.06.2012– Название с экрана.
9. Бичурин М.И. Исследование магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики цтс и метгласа / М.И. Бичурин, Р.В. Петров, И.Н. Соловьев, А.Н. Соловьев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1;
10. Каперко А.Ф. Анализ состояния, тенденции развития и новые разработки датчиков преобразователей информации систем измерения, контроля и управления/ А.Ф. Каперко // Измерительная техника. 1998.– № 1. – С. 3–7.
11. Электромагнитные методы разведки нефти и газа // ТИИЭР, 1989.2.
12. Трошин А. В Перспективы применения композиционных магнитоэлектрических структур при разработке современных датчиков / А. В. Трошин, С. В. Трошин //Вестн. СевКавГТУ :СКГТУ 2006 . –Вып. 2.
13. Кузнецов А.О. Выбор датчиков для системы магнитного зрения / А.О. Кузнецов // Научно-технический вестн. СПбГУ ИТМО. Выпуск 64.1 сессия научной школы «Задачи механики и проблемы точности в приборостроении»
14. Энциклопедия промышленности. Контрольно-измерительные средства [Электронный ресурс]. – Режим доступа www.krona-sm.com/kontrolno-izmeritelnye-sredstva.html – Дата доступа: 7.06.2012– Название с экрана.
- 15 . Высокочастотный индуктивный датчик / Большая Энциклопедия Нефти и Газа. Электронная библиотека «Нефть-Газ» [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://ngpedia.ru/>– Дата доступа: 11.06.2012– Название с экрана.
16. Иванов В. Тонкое чутье магнитного поля земли/ В. Иванов, М. Бабошко, Е. Келпш// БДИ № 5(68) 10 -11 2006.
17. Tumanski S. Principles of Electrical Measurement/ S.Tumanski// Taylor & Francis, 2006. 472 стр.
18. S. Tumanski S. Induction coil sensors - a review/ S. Tumanski // Measurement// Science & Technology, Vol. 18, 2007, pp. R31-R46.

19. Kunihiisa Tashiro Sensitivity Limits of a Magnetometer with an Air-core Pickup Coil. [Електронний ресурс]/Kunihiisa Tashiro, Shin-ichiro Inoue and Hiroyuki Wakiwaka// Sensors & Transducers 2010 by IFSA – Режим доступа <http://www.sensorsportal.com> – Дата доступа: 2.06.2012– Название с экрана.
20. Lenz J. Magnetic sensors and their applications/ J. Lenz, A. S. Edelstein// IEEE Sensors J., Vol. 6, No. 3, 2006, pp. 631-649.
21. Hohmann R. SQUID-System mit Joule-Thompson-Kuhlung zur Wirbelstromprüfung von Flugzeugfelgen/ R. Hohmann// Dissertationsschrift, 1999, Justus-Liebig-Universität Gießen.
22. Vertesy G. Fluxset Sensor Analysis/ Gabor Vertesy, Antal Gasparics// Journal of Electrical Engineering,– 2002.–Vol. 53, ISSN 1335-3632.
23. Kreuzbruck M. Wirbelstromprüfsystem mit integriertem Fluxgate-Magnetometer / M. Kreuzbruck, K. Allweins, C. Heiden// DACH-Jahrestagung DGZfP, DGfZP, SGZP, Innsbruck, 29.– 31.5.2000, BB 73.2, pp. 871-881.
24. Hesse O. Usage of Magnetic Field Sensors for Low Frequency Eddy Current Testing / O. Hesse, S. Pankratyev // Measurement science review, Volume 5, Section 3, 2005
25. Cherepov S. Optimisation of Low Frequency Eddy Current Sensors Using Improved Inductive Coils and Highly Sensitive AMR and GMR Sensor Modules /S. Cherepov, O. Hesse, G. Mook, S. Pankratyev, V. Uchanin//Proceeding of the 13th IMEKO TC-4 International Symposium, vol. 2, 29th Sept. – 1st Oct. 2004, Athens, Greece. Athens: National Technical University of Athens, 2004, pp. 568-576.
26. Philips Semiconductor Handbook SC17.
27. NVE Corporation, GMR Sensors Data Book, April 2003
28. Prance R J. Room temperature induction magnetometers/ R.J. Prance, T. D. Clark and H. Prance //Encyclopedia of Sensors vol 10ed C A Grimes, E C Dickey and M V Pishko (Valencia, CA American Scientific Publishers) 2006. pp 1–12
29. Tumanski S. Analysis of induction coil performances in application for measurement of weak magnetic field / S. Tumanski// Przegląd Elektr. 62 1986137–41

Рекомендовано до друку: проф. Шкрабцем Ф.П.