

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ИНКЛИНОМЕТРИИ

О. В. Фадеева, асп.

Ключевые слова: инклинометрия, феррозонд, магниторезистор, точность, магниточувствительный элемент, преобразователь, магнитное поле

Постановка проблемы. Повышение эффективности наклоннонаправленного бурения скважин приводит к повышению продуктивности скважин, к уменьшению влияния бурения на рельеф и экологию, к минимизации затрат на создание новой буровой площадки. При этом наклоннонаправленное бурение дает возможность для выкачки сырья под недоступными, по разным причинам, участками земной поверхности, также для разгрузки фонтанирующих скважин и для вскрытия пластов, которые падают под крутым углом, и т. д.

Для повышения эффективности наклоннонаправленного бурения одной из самых необходимых задач является повышение точности измерения. При использовании точных первичных преобразователей в инклинометрах соблюдается направление проектного профиля скважины, при этом не происходит отклонения забоя скважины от заданного курса, вследствие чего забой скважины попадает в заданную точку продуктивного пласта [7].

Анализ публикаций. В 1956 г. В. Н. Пономарев разработал малогабаритные одностержневые феррозонды, на основе которых был создан первый скважинный магнитометр для поиска и разведки железорудных месторождений [8].

В дальнейшем, в 1970 г., Г. Н. Ковшовым были начаты исследования по созданию инклинометрических датчиков с повышенной точностью, вибро- и ударопрочностью. Поиск новых компонентов для создания точных первичных преобразователей в инклинометрии и усовершенствование инклинометрических датчиков продолжается и сегодня [8].

Цель статьи. Рассмотреть особенности магниточувствительных элементов, а также возможности применения магниторезистивного преобразователя в инклинометрии.

Основной материал. Основной целью инклинометрии является определение зенитного, азимутного, визирного угла (угла отклонителя). Для измерения азимута в инклинометрии применяются два основных принципа работы чувствительных элементов: магнитный и гироскопический. В данной статье рассмотрены магниточувствительные элементы, а также их сравнительные технические характеристики.

В инклинометрии в качестве преобразователя магнитного поля часто используют феррозонды. Феррозонды применяют для измерения и фиксирования постоянных и медленно меняющихся магнитных полей и их составляющих. Принцип их работы основан на изменении магнитного состояния ферромагнетика при воздействии на него двух магнитных полей с разной частотой [1 – 3; 8]. Простейшая конструкция феррозонда состоит из ферромагнитного сердечника и двух катушек: катушки возбуждения, которая питается переменным током, и измерительной катушки (рис. 1).

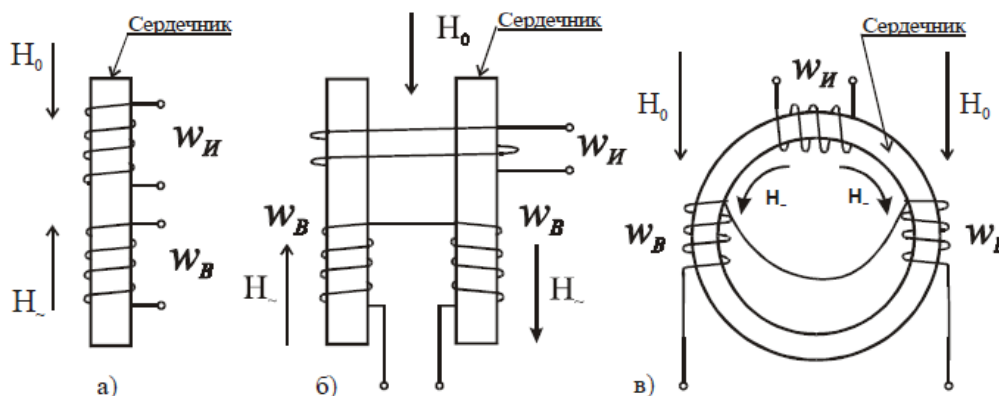


Рис. 1. Варианты конструкций феррозондов:

*а – одноэлементный стержневой; б – дифференциальный с разомкнутым сердечником;
в – дифференциальный с замкнутым сердечником*

Основное достоинство феррозондовых преобразователей – это высокая магнитная чувствительность и высокий диапазон порога удельной магнитной чувствительности.

В серийно выпускаемых феррозондовых преобразователях существует ряд недостатков: низкая геометрическая разрешающая способность, сильная зависимость основных параметров от воздействия климатических и механических факторов, невысокая механическая прочность, трудоемкий процесс изготовления феррозондов, сложность в эксплуатации, невысокий диапазон рабочих температур, большая стоимость и т. д.

Эти недостатки заставляют задуматься, а нельзя ли из широкого выбора магниточувствительных преобразователей подобрать серийный магниточувствительный элемент с такими же или лучшими достоинствами и с меньшим количеством недостатков, влияющих на быстрдействие и точность в процессе бурения. В таблице приведена сравнительная характеристика некоторых преобразователей магнитного поля.

Таблица

Сравнительная характеристика преобразователей магнитного поля

Тип преобразователя магнитного поля	Феррозондовый	Магнитоиндуктивный	Магниточувствительный Z-элемент	Полевые ГМР Магнитотранзисторы	ГМР-преобразователь	Многоколлекторный магнитотранзистор	Магнитодиод с р-п – переходом	Тонкопленочный магниторезистор	«Монолитный» магниторезистор	Полевой элемент Холла
Размер активной области, мм ²	от 1,0 до 100	10 × 8 × 4	5 × 2	Н/Д	от 0,5 до 2,0	от 5 · 10 ⁻⁵ до 0,1	от 0,05 до 2,0	от 0,1 до 10	от 0,3 до 100	от 2,5 · 10 ⁻⁵ до 1,0
R _{вх} , Ом	–	0,01 ... 0,1	–	–	5 · 10 ³ ... 5 · 10 ⁴	–	(1... 6) × 10 ³	10 ³ ... 10 ⁵	20 ... 10 ³	10 ⁴ ... 1,2 · 10 ⁵
Магнитная чувствительность, В/Тл	~10	от 1 до 10	от 500 до 600	от 70 до 100	от 6 до 60	до 100	от 10 до 90	от 3 до 500	от 1 до 60	от 0,01 до 1,1
Удельная магнитная чувствительность, В/(ТлА)	–	–	от 2 · 10 ⁵ до 5 · 10 ⁵	от 8,7 · 10 ⁴ до 1,25 · 10 ⁵	от 7,5 · 10 ³ до 6 · 10 ⁴	от 1 · 10 ³ до 1 · 10 ⁵	от 3 · 10 ³ до 3 · 10 ⁴	от 9 · 10 ² до 1 · 10 ⁴	от 4 · 10 ² до 8 · 10 ³	от 50 до 1 · 10 ⁴
Порог чувствительности (мТл)	от 5 · 10 ⁻⁴ до 1	от 0,001 до 0,1	~10	–	–	1	–	Менее 0,001	1	Менее 0,001
Динамический диапазон, мТл	от 0,1 до 1,0	от 1 до 200	от 10 до 50	от 0,001 до 100	от 0 до 80	до 100	от 20 до 90	от 0,8 до 40	от 300 до 1000	100 ... 200
Диапазон ν _p , Гц	от 0 до 10 ⁴	от 0 до 10 ⁶		Н/Д	Н/Д	(3... 10) × 10 ³	(3... 10) × 10 ³	от 0 до 1 · 10 ⁷	от 0 до 1 · 10 ⁹	от 0 до 1 · 10 ⁶

Окончание таблицы

Параметры источника питания	$U, В$	–	–	от 5 до 30	более 100	–	–	–	от 5 до 9	–	от 5 до 9
	$I, А$	до 100	до 1,0	от 1,0 до 3,0	от 0,8 до 11,0	от 0,8 до 1,0	от 1,0 до 3,0	от 1,0 до 5,0	от 1,0 до 5,0	от 0,5 до 40,0	от 0,05 до 0,5
$P_{рас.мах}$ при $T=20^{\circ}C$, мВт	до 100	до 1,0	–	Н/Д	Н/Д	Н/Д	200	от 5 до 10	от 5 до 700	20	
Диапазон $T_p, ^{\circ}C$	от -40 до +85	от -20 до +70	от -60 до +60	от -60 до +60	от -60 до +60	от -60 до +125	от -60 до +100	от -55 до +150	от -60 до +110	от -269 до +250	

Примечание:

U – напряжение;

I – ток;

$P_{рас.мах}$ – максимальная рассеиваемая мощность;

$R_{вх}$ – входное сопротивление;

T_p – рабочая температура;

ν_p – рабочая частота.

Основными параметрами для выбора магниточувствительного преобразователя для инклинометрии являются:

1. Магниточувствительность.
2. Диапазон рабочих температур.
3. Габаритные размеры.
4. Виброустойчивость.
5. Скорость обработки информации.

Следуя данным таблицы, к требованиям магниточувствительных преобразователей для инклинометрии можно отнести и подробнее рассмотреть: магнитоиндуктивный преобразователь, многоколлекторный магнитотранзистор, тонкопленочный магниторезистор, а также феррозондовые преобразователи, которые были рассмотрены выше.

Магнитоиндуктивный преобразователь. Магнитоиндуктивный датчик состоит из микроминиатюрной катушки индуктивности и ферромагнитного сердечника. Катушка индуктивности представляет собой одну обмотку, которая регистрирует магнитное поле в направлении одной из осей. Принцип работы датчика основан на том, что при изменении окружающего магнитного поля меняется индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником.

На рисунке 2 приведена упрощенная схема включения магнитоиндуктивного датчика. Схема представляет собой релаксационный LR – генератор, в котором MI – датчик выполняет задание основного элемента. Изменение напряженности воздействующего магнитного поля приводит к изменению частоты генератора [3].

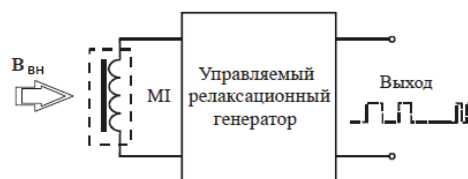


Рис. 2. Упрощенная схема включения магнитоиндуктивного датчика

К достоинствам и недостаткам можно отнести: по сравнению с феррозондами меньшие габаритные размеры, высокая надежность, маленький ток потребления, ограниченный динамический диапазон при удовлетворительной линейности, ограниченный диапазон рабочих температур.

Магниторезистивный преобразователь. По конструкции магниторезистивные магнитометры не сложнее феррозондовых приборов.

Отличительной особенностью магниторезистивных датчиков является сохранение работоспособности при статических магнитных полях в широком температурном диапазоне. Также к преимуществам магниторезистивных датчиков можно отнести:

- отсутствие зависимости от расстояния между магнитом и датчиком;
- широкий диапазон рабочих температур (от -55 до 150°C);
- датчики зависят только от направления поля, а не его интенсивности;
- длительный срок службы, независимость от магнитного дрейфа.

Магниторезисторы обладают большой чувствительностью – в пределах от 10×10^{-13} до 10×10^{-14} А/м. Самые чувствительные магниторезисторы изготовлены из InSb (полуметаллы индий и сурьма) – NiSb (металл никель и полуметалл сурьма).

Магниторезисторы определяются такими параметрами как чувствительность, номинальное сопротивление, рабочий ток, быстродействие, большой диапазон рабочих температур, термостабильность.

При использовании в ограниченном динамическом диапазоне (до 10 мТл) тонкопленочные магниторезисторы выгодно отличаются от других преобразователей магнитного поля.

На рисунке 3 приведены выходные характеристики различных преобразователей магнитного поля при одинаковом напряжении питания, равном 5 В [4].

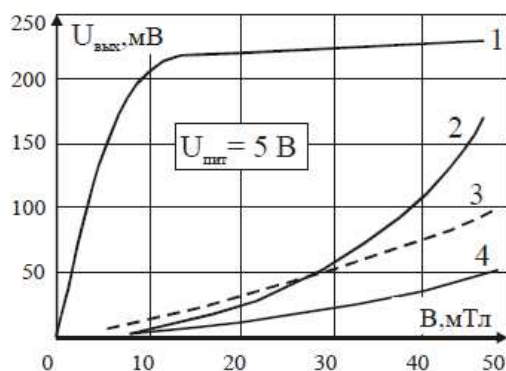


Рис. 3. Выходные характеристики различных ПМП: 1 – тонкопленочный магниторезистор; 2 – «монолитный» магниторезистор; 3 – элемент Холла на основе InSb; 4 – элемент Холла на основе GaAs

Из рисунка 3 видно, что при магнитной индукции порядка 5 мТл, соответствующей линейным участкам всех приведенных характеристик, чувствительность тонкопленочных магниторезисторов в 5 раз выше чувствительности других магниточувствительных приборов [4].

Магниторезистивные датчики применяются в магнитометрии для решения различных задач: определения угла поворота, положения объекта относительно магнитного поля Земли, измерения частоты вращения зубчатых колес и др.

Из ряда магниторезисторов в последнее время широко применяются GMR (Giant Magneto Resistor) – гигантские магниторезисторы (ГМР). Структура ГМР приведена на рисунке 4.

ГМР (рис. 4) представляет собой многослойную тонкопленочную структуру из прослоек металлов, которые, в свою очередь, чередуются с ферромагнитными и немагнитными слоями толщиной несколько нанометров (нм). С каждым годом магниторезистивные преобразователи минимизируют свою структуру и улучшают при этом свои технические характеристики. Появились туннельные магниторезистивные датчики (ТМР), структура которых настолько усовершенствована, что для описания принципа работы обычной физики не достаточно, в их основе лежит квантовая физика на уровне атомов и молекул.

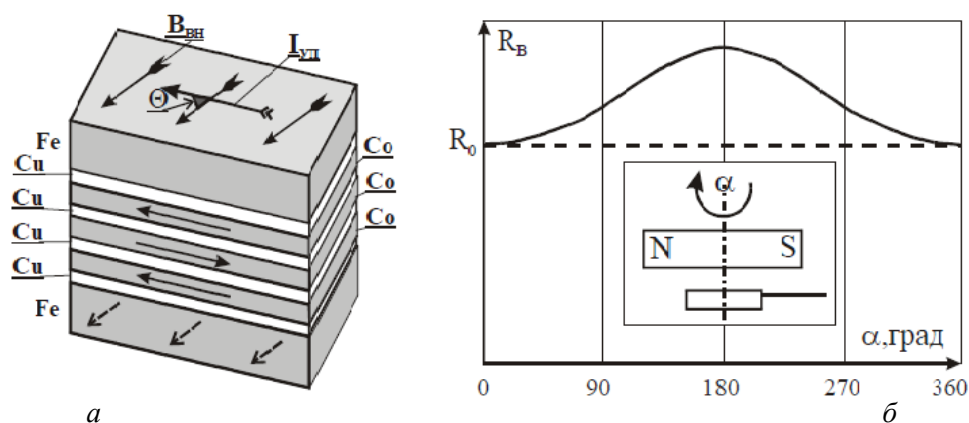


Рис. 4. GMR магниточувствительный элемент: а – структура; б – ориентационная характеристика

Магнитотранзисторы. Магнитотранзистором называется такая конструкция транзистора, у которого рабочий параметр устроен для получения максимальной чувствительности коллекторного тока к магнитному полю.

Из известных полупроводниковых преобразователей магнитного поля наиболее перспективными считаются магниточувствительные транзисторы – приборы, обладающие высокой чувствительностью и разрешающей способностью [3; 5; 6].

Магнитотранзисторы условно подразделяются на вертикальные и горизонтальные в зависимости от того, параллельно или перпендикулярно технологической поверхности кристалла протекает рабочий ток.

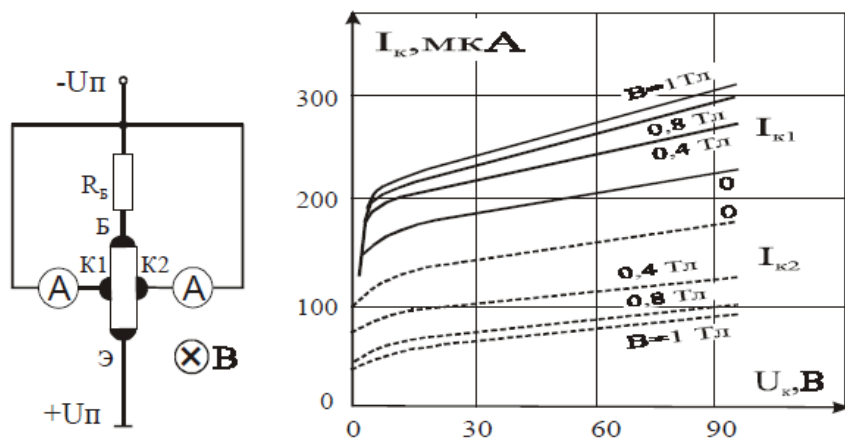
Вертикальные магнитотранзисторы – транзисторы, которые реагируют лишь на лежащую в плоскости кристалла продольную компоненту магнитного поля. А горизонтальные транзисторы также реагируют и на перпендикулярную этой плоскости поперечную компоненту. Ниже приведен принцип работы германиевого двухколлекторного магнитотранзистора ДМТ.

На рисунке 5 изображены выходные характеристики торцевого ДМТ, изготовленного из германия с размером кристалла $1 \times 1 \times 4$ мм [3].

При воздействии магнитного поля ток одного коллектора увеличивается, а ток другого коллектора уменьшается, что напоминает принцип мостовой схемы. Напряжение между коллекторами с увеличением индукции магнитного поля возрастает и при $B > 0,7$ Тл достигает насыщения.

Максимальная магнитная чувствительность и линейность характеристики магнитотранзистора наблюдаются в области слабых магнитных полей. Удельная магнитная чувствительность германиевого магнитотранзистора достигает значений $\gamma_{уд} = (2...4) \times 10^5$ В/ТлА при $B < 0,4$ Тл, что на 2 – 4 порядка выше чувствительности элементов Холла.

Магнитотранзисторы не полностью исследованы в магнитометрии, но у них высокий потенциал, и по мере дальнейшего освоения дискретные магнитотранзисторы найдут широкое применение в качестве чувствительных элементов в функционально-ориентированных магнитных датчиках: скорости и направления вращения, угла поворота и преобразования типа «угол-код», датчики уровня, бесконтактные реле предельного тока и т. д.



а
 Рис. 5. Торцевой германиевый двухколлекторный магнитотранзистор:
 а – структура; б – статические выходные характеристики

Современная групповая технология исполнительных систем позволяет выпускать интегральные преобразователи магнитного поля на основе магнитотранзисторов, которые могут формироваться как в линейные, так и в матричные магниточувствительные структуры с различным способом их организации. Основное назначение таких приборов – это использование их в системах визуализации магнитного поля и устройствах считывания информации с магнитных носителей (лент, карт и т. п.) [3; 5; 6].

Выводы. По данным вышеописанных характеристик, применение магниторезистивных, магнитоиндуктивных и магнитотранзисторных преобразователей в инклинометрии возможно. Их характеристики совпадают с характеристиками феррозондов, а некоторые параметры имеют лучшие показания, чем у серийно выпускаемых феррозондовых преобразователей. Если выбирать из магнитотранзисторов и магниторезисторов, то для применения в инклинометрии сегодня больше подходят магниторезисторы, из-за своего широкого применения в разных областях производства. Они уже прошли полное исследование и их внедрение в инклинометрию более безопасно. А также магниторезисторы на сегодняшний день имеют больший температурный диапазон из рассмотренных серийно выпускаемых магниточувствительных преобразователей и обладают очень высокой магнитной чувствительностью, что и необходимо для внедрения их в инклинометрию. Однако в дальнейшем не исключено применение магнитотранзисторов в инклинометрии.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Афанасьев Ю. В.** Магнитометрические преобразователи, приборы, установки / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, А. П. Щелкин. – Л. : Энергия, 1972. – 272 с.
2. **Афанасьев Ю. В.** Феррозонды / Ю. В. Афанасьев. – Л. : Энергия, 1969. – 168 с.
3. **Бараночников М. Л.** Микромагнитоэлектроника / М. Л. Бараночников. – Т. 1. – М. : ДМК Пресс, 2001. – 544 с.
4. **Бараночников М. Л.** Магниторезисторы / М. Л. Бараночников // Радио. – 1994. – № 7. – С. 42.
5. **Викулин И. М.** Гальваномагнитные приборы / И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, В. И. Стафеев. – М. : Радио и связь, 1983. – 104 с.
6. **Викулин И. М.** Двухколлекторные магнитотранзисторы / И. М. Викулин, М. А. Глауберман, Г. А. Егиазарян и др. // Приборы и системы управления, 1981. – № 10. – С. 6–5.
7. **Исаченко В. Х.** Инклинометрия скважин / В. Х. Исаченко – М. : Недра, 1987. – 216 с.
8. **Ковшов Г. Н.** Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Г. Н. Ковшов, Г. Ю. Коловертов. – УФА : Изд-во УГНТУ, 2001. – 228 с.

УДК 621.317.44

Возможность использования магниторезистивных преобразователей в инклинометрии / О. В. Фадеева // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА, 2013. – № 6. – С. 13 – 18. – рис. 5. – табл. 1. – Библиогр.: (8 назв.).

Рассмотрен ряд магниточувствительных, серийно выпускаемых измерительных приборов для повышения эффективности наклоннонаправленного бурения, которые могли бы улучшить характеристические показатели уже применяющихся в инклинометрии серийно выпускаемых феррозондов. Из рассмотренных магниточувствительных преобразователей для дальнейшего изучения и возможности внедрения его в инклинометрию был выбран магниторезистивный преобразователь.

Ключевые слова: инклинометрия, феррозонд, магниторезистор, точность, магниточувствительный элемент, преобразователь, магнитное поле.

Можливість використання магніторезистивних перетворювачів в інклінометрії / О. В. Фадеева // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2013. – № 6. – С. 13 – 18. – рис. 5. – табл. 1 – Бібліогр.: (8 назв.).

Розглянуто кілька магніточутливих вимірювальних приладів для підвищення ефективності похилонаправленого буріння, які серійно випускаються. Вони могли б поліпшити характеристичні показники серійних ферозондів, що вже застосовуються в інклінометрії. З розглянутих магніточутливих перетворювачів для подальшого вивчення та можливості впровадження в інклінометрію обрано магніторезистивний перетворювач.

Ключові слова: інклінометр, ферозонд, магніторезистор, точність, магніточутливий елемент, перетворювач, магнітне поле.

The possibility of using magnetoresistive transducers inclinometry / O. Fadeeva // Visnyk of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D. : PSACEA, 2013. – № 6. – P. 13 – 18. – pic. 5. – tabl. 1. – Bibliog.: (8 names).

To improve the efficiency of pan-directional drilling, the article was cited several magnetically sensitive, commercially available, measuring instruments, which could improve the performance characteristic is used in the commercially available inclinometry ferroprobes. Of those surveyed magnetically converters for further study and possible implementation of it in the inclinometer was selected magnetoresistive transducer.

Key words: inclinometer ferroprobes, magnetoresistor, precision, magnetically sensitive element transducer, a magnetic field.