

Игорь Евгеньевич Люминарский родился в 1960 г. Окончил в 1983 г. Завод-втуз при ЗИЛе. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Теоретическая механика и теория механизмов” ГОУ МГИУ. Автор более 20 научных работ, в том числе одной монографии, в области динамики и прочности зубчатых механизмов.

I.Ye. Lyuminarskii (b. 1960) — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “heoretical Mechanics and Theory of Mechanisms” department of the Moscow State Industrial University. Author of more than 20 publications including a monograph in the field of dynamics and strength of gearing mechanisms.

Станислав Евгеньевич Люминарский родился в 1960 г. Окончил в 1983 г. Завод-втуз при ЗИЛе. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Теоретическая механика и теория механизмов” ГОУ МГИУ. Автор более 10 научных работ в области расчета систем поддрессирования транспортных машин.

S.Ye. Lyuminarskii (b. 1960) — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Theoretical Mechanics and Theory of Mechanisms” department of the Moscow State Industrial University. Author of more than 10 publications in the field of design of systems of cushioning of transport vehicles.

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА

УДК 620.179.14

О. В. Санков, В. Н. Легкий

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ МАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ СИСТЕМ БЛИЖНЕЙ ЛОКАЦИИ

Рассмотрена возможность создания малогабаритных феррозондовых датчиков для бортовых систем обнаружения магнитных объектов. Описаны феррозонды с различной конструкцией сердечников. Приведены результаты исследований чувствительности и диаграммы направленности предложенных феррозондов.

Ключевые слова: система обнаружения, магнитный объект, магнитный датчик.

Системы ближней локации (СБЛ), устанавливаемые на вертолетах и других летательных аппаратах, предназначены для обнаружения заданных наземных или надводных объектов. Технические металло-содержащие объекты поиска (ОП) характеризуются некоторым пространственным распределением намагниченности.

Эффективность работы магнитного датчика определяется степенью неравномерности пространственного распределения намагниченности в окрестностях расположения ОП. Измерение параметров магнитного поля в низкочастотном диапазоне (единицы и десятки герц)

возможно с помощью различных магнитометров. Феррозондовые магнитометры применительно к СБЛ выгодно отличаются от ядерно-прецессионных и квантовых магнитометров простотой, высокой надежностью, устойчивостью к помехам, незначительным энергопотреблением, малыми массой и габаритными размерами. Однако классическая конструкция феррозонда предполагает прецизионную технологию изготовления и наличие многовитковых сигнальных обмоток. Индуктивность последних и магнитные свойства сердечников из материала с невысокой магнитной проницаемостью (ферриты, пермаллой) делают феррозонд инерционным датчиком. В настоящей работе авторы рассмотрели возможность создания миниатюрных феррозондовых датчиков (ФЗД), отличающихся быстродействием, технологичностью и устойчивостью к механическим нагрузкам.

Постановка задачи. Феррозондом называется устройство, чувствительное к внешним магнитным полям, содержащее ферромагнитные сердечники и обмотки, распределенные по их длине. Протекающие в них процессы всегда связаны с существованием двух полей: внешнего измеряемого поля и некоторого вспомогательного поля, образуемого током, протекающим в одной из обмоток. Взаимодействие этих полей в объеме сердечников, изготавливаемых из легко насыщаемых магнитных материалов, приводит к появлению в другой обмотке э.д.с, по значению которой судят о напряженности поля [1].

Возможность измерения магнитного поля с помощью ФЗД основана на нелинейности кривой намагничивания магнитомягких сплавов. При отсутствии внешнего постоянного поля э.д.с. в измерительной катушке не наводится, э.д.с. возникает только при наличии внешнего поля [1].

Электродвижущая сила сигнала E изменяется по закону

$$E = C\omega F \sin 2\omega t,$$

где ω — частота тока возбуждения.

Таким образом, изменение внешнего магнитного поля вызывает изменение переменной магнитной индукции ферромагнитного сердечника, поэтому в приемной (измерительной) катушке, размещенной на сердечнике, возникают различные по значению и направлению э.д.с.

Вторичная обмотка вместе с подключаемым к ней индикаторным прибором образует измерительную цепь. В дифференциальном феррозонде первичные обмотки соединены таким образом, что протекающий в них ток i создает в объеме сердечников поля H_1 , равные по величине, но противоположные по направлению. При наличии внешнего поля H_0 , направленного вдоль сердечников, в объеме одного из них действует разность напряженностей $H_0 - H_1$, в объеме другого —

сумма $H_0 + H_1$. Если сердечники идентичны, то выполняются соотношения:

$$B' = B(H_0 - H_1);$$

$$B'' = B(H_0 + H_1),$$

где B' и B'' — индукции магнитных потоков в сердечниках.

Электродвижущая сила во вторичной обмотке, охватывающей оба сердечника, определяется как

$$e = -sw_2 \frac{d}{dt}(B' + B''),$$

где s — поперечное сечение сердечников; w_2 — число витков вторичной обмотки; t — время.

Появление э.д.с. во вторичной обмотке дифференциального феррозонда с идентичными сердечниками принципиально возможно лишь при нелинейности характеристик $B = f(H)$.

В отличие от пассивных индукционных датчиков, э.д.с. в ФЗД появляется при наличии постоянного поля с пропорциональной ему величиной. Выходная э.д.с. имеет удвоенную частоту возбуждающего колебания. Работа на удвоенной частоте типична для феррозондов. Однако принципиально дифференциальный ФЗД может работать и на основной частоте.

Феррозонды используются в основном для измерения компонентов магнитного поля и углов между какими-либо осями в пространстве и вектором магнитного поля [1].

Основным недостатком классических ФЗД является чувствительность к магнитному полю Земли. Ограниченное пространство, занимаемое СБЛ в конструкции носителя, затрудняет получение приемлемой чувствительности и достаточно широкой (с учетом высокой скорости движения) диаграммы направленности (ДН). Для повышения чувствительности феррозонда необходимо применять сердечники с возможно большим отношением (длины к ширине) из материала с максимальной магнитной проницаемостью. Близкая к правильной “восьмерке” форма ДН может быть достигнута при высокой степени соосности сердечников и за счет подавления квадратурной составляющей внешнего магнитного поля [2].

Направленные свойства ФЗД определяются только направлением магнитных осей его сердечников и не зависят от углового положения измерительной катушки (вторичной обмотки) (рис. 1, а). При несовершенстве технологии изготовления или при воздействии механических нагрузок на конструкцию с недостаточной жесткостью стержневые сердечники дифференциального ФЗД оказываются нестрого параллельными (рис. 1, б). Если чувствительность полуэлементов феррозонда одинакова, то его магнитная ось совпадает с биссектрисой угла β (угла между продольными осями стержневых сердечников).

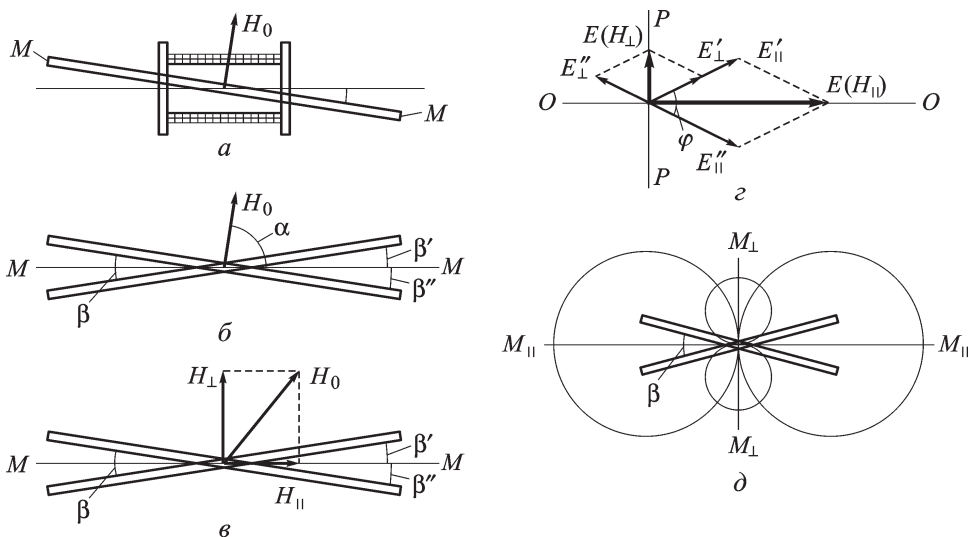


Рис. 1. Магнитная ось и ДН реального дифференциального ФЗД

На рис. 1 введены следующие обозначения: E'_{\parallel} и E''_{\parallel} — векторы продольной составляющей измеряемого поля для двух несоосных сердечников; H_0 — вектор измеряемого поля (лежит в плоскости угла β); MM — магнитная ось ФЗД, лежащая в плоскости угла β ; β' и β'' — углы между осью MM и соответствующими продольными осями сердечников.

При наличии угла β между сердечниками и разности фаз между э.д.с. e' и e'' , наводимых во вторичной обмотке, у дифференциального ФЗД возникает дополнительная ДН, связанная с поперечной осью (в плоскости угла β). В результате, кроме продольной магнитной оси $M_{\parallel}M_{\parallel}$, феррозонд имеет еще и поперечную магнитную ось $M_{\perp}M_{\perp}$ (рис. 1, δ).

Задачей проводимых исследований является разработка конструкции и оптимизация режима работы ФЗД для бортовых обнаружителей ферромагнитных объектов, которые должны иметь следующие свойства:

- серийно пригодную (непрецизионную) технологию изготовления;
- достаточно широкую ДН, обеспечивающую дальность обнаружения не менее 4...5 м при подходе к объекту под случайным углом в пределах $\pm 30^\circ$;
- устойчивость к электромагнитным помеховым полям с частотой до 20 кГц.

Метод решения. Авторами предложены новые конструкции ФЗД для СБЛ и исследованы их основные параметры: форма ДН и чувствительность к влиянию магнитного поля Земли.

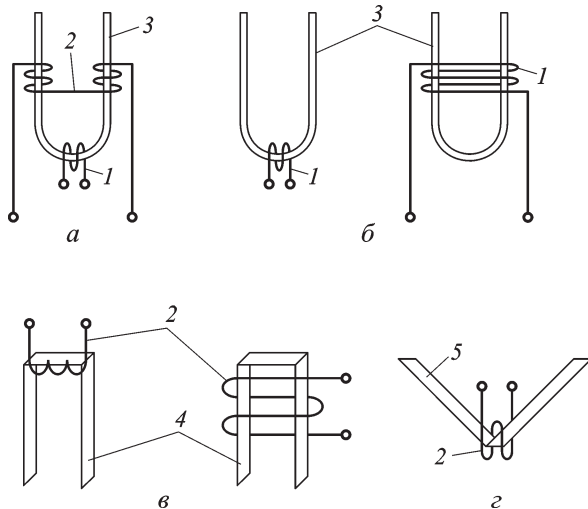


Рис. 2. Конструкция ФЗД:

1 — катушка возбуждения; 2 — измерительная катушка; 3 — U-образный сердечник; 4 — П-образный сердечник; 5 — V-образный сердечник

Все сказанное о ДН дифференциальных ФЗД относится и к недифференциальным, одностержневым ФЗД, сердечники которых имеют изгиб или излом. Подобные сердечники могут быть представлены в виде двух и более самостоятельных частей — плеч, продольные оси которых непараллельны.

Предложенные авторами конструкции ФЗД с общим U-, V- и П-образными сердечниками, также имеют два плеча. Сердечник изготовлен из аморфного сплава, который имеет высокую магнитную проницаемость.

Феррозондовый датчик с U-образным сердечником предложен в двух модификациях (рис. 2).

В первой модификации (рис. 2, а) вторичная (измерительная) катушка состоит из двух одинаковых катушек, расположенных на каждом плече датчика. Катушка возбуждения находится на изгибе сердечника. Во второй модификации ФЗД (рис. 2, б) катушка возбуждения одновременно является измерительной катушкой, что значительно упрощает процесс изготовления датчика.

Феррозондовые датчики с П- и V-образными сердечниками и одной катушкой (рис. 2, в, г) по конструкции аналогичны ФЗД с U-образным сердечником (см. рис. 2, б).

Изогнутая форма сердечника датчиков позволяет достаточно просто обеспечить жесткость конструкции и симметрию плеч. В результате достигается неизменность чувствительности плеч и, соответственно, стабильность ДН при воздействии внешних факторов (вибрация, перегрузки и т.д.).

Основной результат. Исследования ДН ФЗД с различными типами ленточных сердечников и оценка влияния геомагнитного поля

(ГМП) проводились по следующей методике. Собрана схема автоподстройки частоты (АПЧ), преобразующая отклонение частоты в выходной сигнал. Схема состоит из гетеродина, генератора, частота которого определяется включенным в контур феррозондом, и фазового детектора. При расхождении значений частоты генератора и гетеродина на выходе фазового детектора схемы АПЧ вырабатывается напряжение, пропорциональное разнице частот. При отсутствии объекта поиска частоты гетеродина и генератора одинаковы, поэтому на выходе схемы АПЧ присутствует сигнал, значение которого определяется как нормированное. При появлении ферромагнитного объекта в зоне чувствительности ФЗД магнитная проницаемость сердечника изменяется, меняется индуктивность контура генератора и его частота.

К сориентированному относительно сторон света неподвижному датчику под углом, изменяющимся с интервалом 10° , приближался объект поиска (стальной шар). При постоянном расстоянии от датчика до шара фиксировалось изменение показаний индикатора схемы обработки относительно исходного значения, что и характеризует чувствительность датчика, при этом абсолютный уровень напряженности магнитного поля не измеряется (рис. 3).

Были исследованы ФЗД следующих конструкций:

- с сердечником U-образной формы — тип 1 (см. рис. 2, а, б);
- с сердечником П-образной формы — тип 2 (см. рис. 2, в);
- с сердечником V-образной формы — тип 3 (см. рис. 2, г).

Также исследовалась ДН указанных датчиков с сердечниками разных геометрических размеров и различным положением катушки возбуждения на сердечнике.

По результатам измерений можно сделать следующие выводы.

Общие свойства ФЗД с любой формой сердечника. Феррозондовые датчики имеют дипольную ДН, т.е. в зависимости от угла подхода к ОП существует область отрицательных и положительных

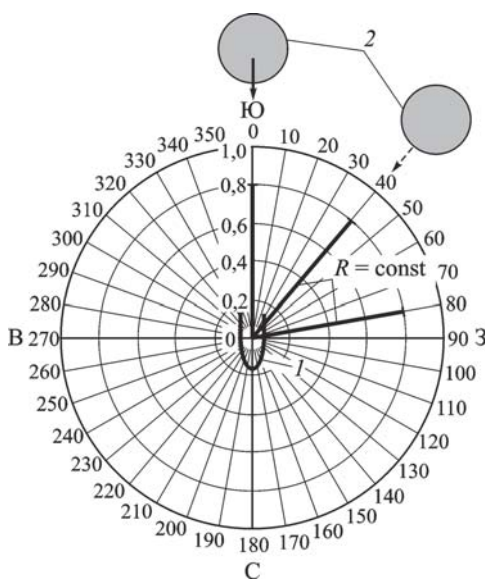


Рис. 3. Схема эксперимента для определения ДН ФЗД:

1 — феррозонд; *2* — объект поиска (стальной шар диаметром 3 см), $R = 10$ см — расстояние от датчика до шара

приращений выходного сигнала ФЗД. В двух точках ДН происходит смена знака приращений выходного сигнала ФЗД (рис. 4).

Знак приращения выходного сигнала можно сделать противоположным, изменяя направление включения ФЗД в генерирующую схему, что можно объяснить, скорее всего, асимметрией генерирующей схемы (рис. 4, *а, б* – штриховые линии). Данный эффект весьма полезен при необходимости не только обнаружения ОП, но и различения случаев сближения с ОП (точное наведение) и прохождения СБЛ на некотором расстоянии от ОП (промах).

Максимум и минимум ДН соответствуют продольной оси сердечника ФЗД.

Частные свойства ФЗД с различными типами сердечников. Феррозондовые датчики 1-го типа наименее подвержены влиянию

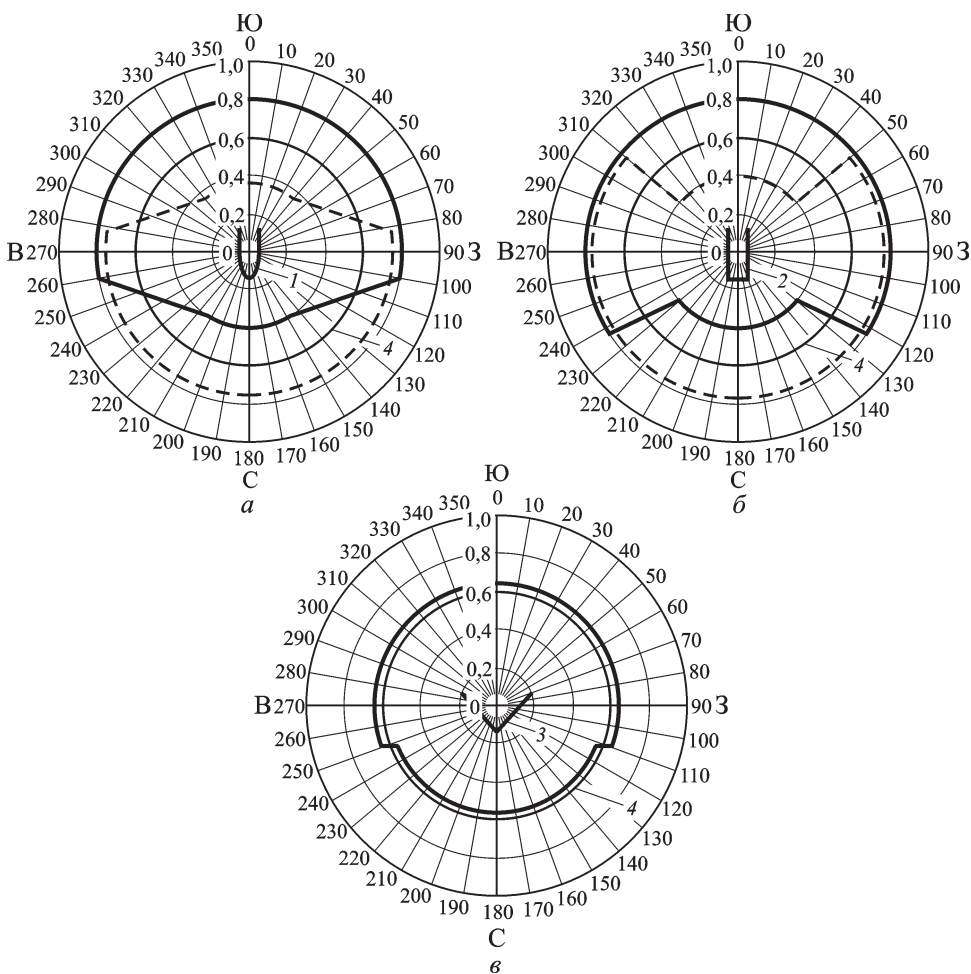


Рис. 4. Диаграммы направленности ФЗД 1, 2 и 3-го типов (*а, б, в*) соответственно:

1, 2, 3 – ФЗД 1, 2, 3-го типов соответственно; 4 – нормированный (исходный) уровень выходного сигнала ФЗД

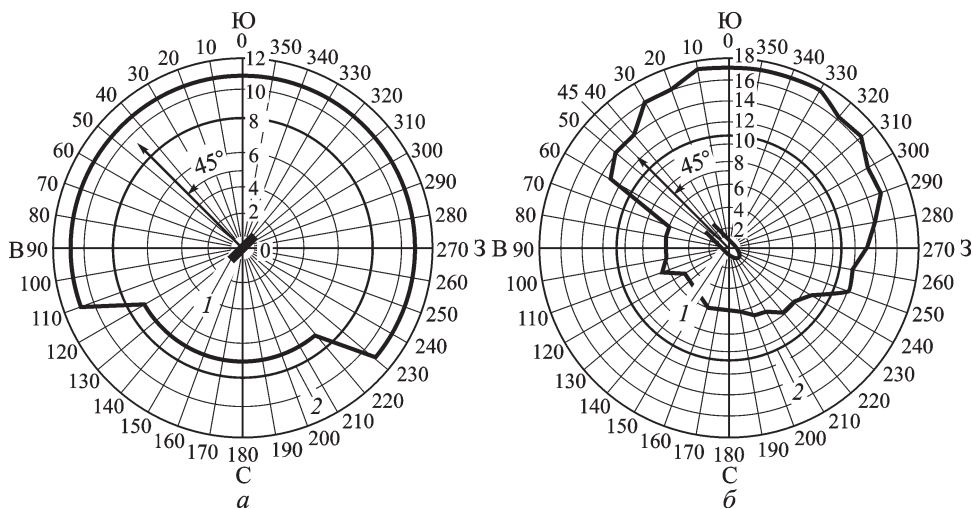


Рис. 5. Влияние геомагнитного поля на ДН ФЗД 1-го типа:

a, б — датчики повернуты на 45° относительно начального положения, продольная ось ФЗД расположена по нормали к плоскости земной поверхности (*a*) и в плоскости земной поверхности (*б*)

ГМП, причем при расположении продольной оси сердечника по нормали к плоскости земной поверхности (рис. 5, *a*) влияние ГМП на ФЗД пренебрежимо мало, однако чувствительность датчика уменьшается примерно на 50 % (рис. 5).

Феррозондовые датчики 2-го типа в значительной степени подвержены влиянию ГМП: при изменении положения ФЗД в пространстве наблюдается приращение выходного сигнала, соизмеримое с приращением от ОП.

Феррозондовые датчики 3-го типа имеют наименьшую чувствительность (см. рис. 4) и неустойчивы к влиянию ГМП, поэтому из дальнейшего рассмотрения их можно исключить.

Выводы по зависимости ДН датчиков от геометрических размеров сердечника. Диаграмма направленности изображена сплошной, штиховой и точечной линиями в соответствии с геометрическими размерами сердечников ФЗД.

Феррозонды 1-го типа: чувствительность датчика пропорциональна длине сердечника до тех пор, пока соблюдается определенное соотношение длины к ширине для сердечника, после чего зависимость не сохраняется (рис. 6, *a*).

Феррозонды 2-го типа: чувствительность датчика пропорциональна длине сердечника (рис. 6, *б*).

Выводы по влиянию на ДН ФЗД положения катушки возбуждения на сердечнике. Диаграмма направленности изображена сплошной, штриховой и точечной линиями в соответствии с расположением катушки возбуждения на сердечнике.

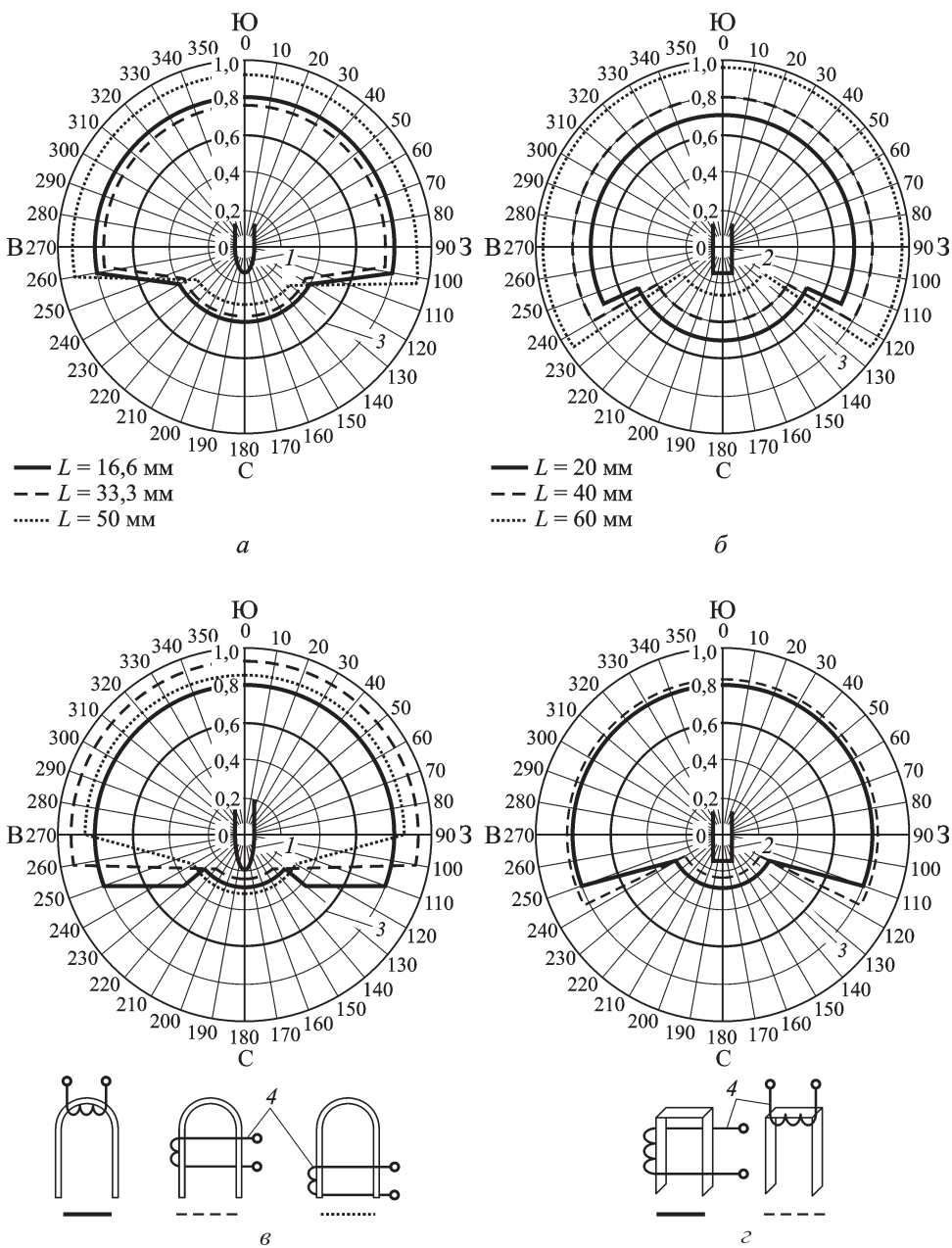


Рис. 6. Диаграммы направленности ФЗД 1-го типа (*а, в*); ФЗД 2-го типа *б, г*: *1* – ФЗД 1-го типа; *2* – ФЗД 2-го типа; *3* – исходный уровень выходного сигнала ФЗД (*а, б*) и нормированный уровень выходного сигнала ФЗД (*в, г*), *L* – длина сердечника (мм)

Феррозондовые датчики 1-го типа: чувствительность ФЗД и форма ДН практически не зависят от того, как располагается катушка возбуждения на сердечнике (рис. 6, в). Однако при расположении катушки возбуждения, охватывающей оба плеча по середине сердечника ФЗД, не подвержен влиянию ГМП, а также имеет более высокую чувствительность (вариант изготовления такого ФЗД наиболее предпочтительнее).

Феррозондовые датчики 2-го типа: чувствительность ФЗД и форма ДН практически не зависят от того, как расположена катушка возбуждения на сердечнике (рис. 6, з).

Из рисунков видно, что ДН ФЗД предложенных конструкций двухполярные и практически не отличаются по форме. Наличие в ДН областей с положительным и отрицательным приращением выходного сигнала при воздействии ОП можно объяснить на примере феррозонда с U-образным сердечником (рис. 7, а).

Реальный магнитный материал разделен по всему объему на множество замкнутых областей — доменов, в каждом из которых самопроизвольная намагниченность однородна и направлена по одной из осей легкой намагниченности (рис. 7, б). Кристалл в целом не намагничен, так как магнитные моменты доменов ориентированы в пространстве равновероятно. Между соседними доменами возникают граничные слои (стенки Блоха). Внутри доменных стенок векторы намагниченности плавно поворачиваются (рис. 7, в).

При подаче напряжения в катушке возбуждения возникает ток i , который создает в объеме сердечника поле H_1 . Под воздействием этого поля происходит обратимое смещение границ и увеличение объема тех доменов, вектор намагниченности которых образует наименьший угол с направлением H_1 (рис. 7, з). Таким образом, ДН феррозонда

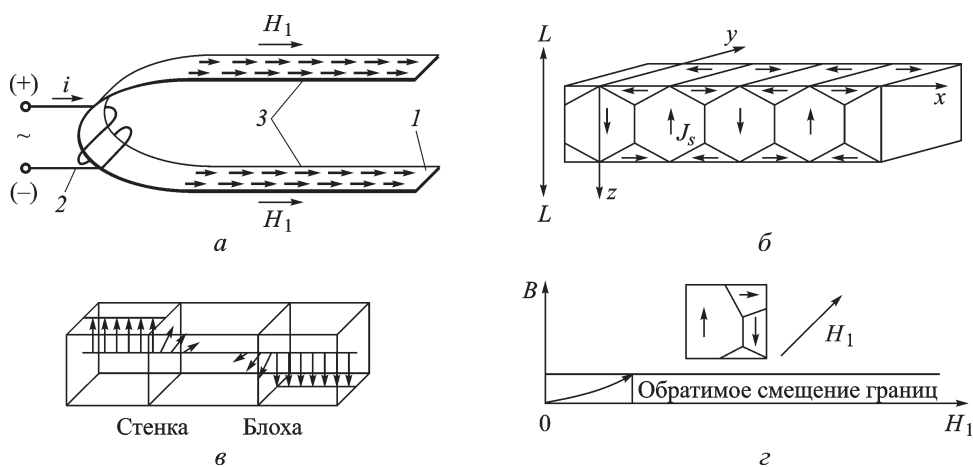


Рис. 7. Магнитная структура вещества сердечника ФЗД:

1 — U-образный сердечник; 2 — катушка возбуждения феррозонда; 3 — магнитные домены вещества сердечника; LL — ось легкой намагничивания

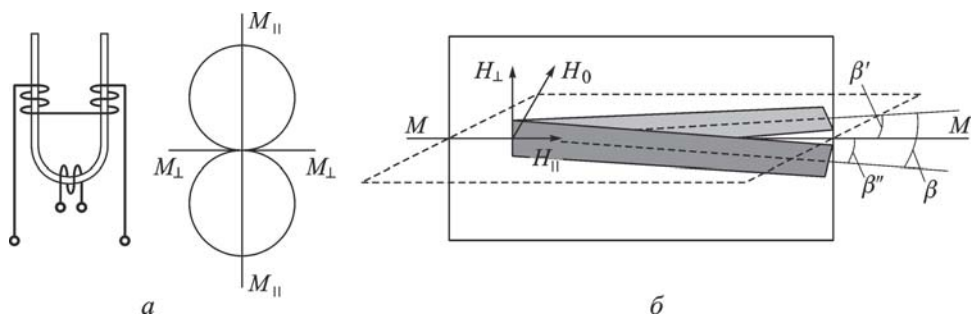


Рис. 8. Конструкция и ДН U-образного ФЗД

формируется в соответствии с распределением магнитных доменов. Полярность ДН зависит от ориентации доменов под воздействием наведенного поля H_1 .

Отличие формы ДН ФЗД с U-, V- и П-образными сердечниками от ДН дифференциальных ФЗД (правильная восьмерка) и U-образных ФЗД с тремя катушками (рис. 8, а) объясняется: 1) наличием только одной катушки, выполняющей функции измерительной и катушки возбуждения; 2) расположением катушки на изгибе сердечника. Таким образом, при возникновении тока i в катушке возбуждения в плечах сплошного сердечника наводится поле H_1 одного знака. В дифференциальном ФЗД и в U-образном ФЗД с тремя катушками ток катушек возбуждения наводит противоположные по знаку поля в каждом плече.

Диаграмму направленности в форме правильной восьмерки U-образного ФЗД с тремя катушками (рис. 8, а) можно объяснить следующим образом.

По принципу действия рассматриваемый ФЗД аналогичен дифференциальному ФЗД. Из-за не идеально точной технологии изготовления между продольными осями плеч феррозонда присутствует угол β , значение которого мало (рис. 8, б). Полуэлементы (плечи) ФЗД имеют одинаковую чувствительность, поэтому магнитная ось феррозонда совпадает с биссектрисой угла β (так как $\beta' = \beta''$, см. рис. 8, б). Если разложить вектор внешнего поля H_0 , лежащий в плоскости угла β , на продольную $H_{||}$ и поперечную H_{\perp} компоненты, то компонента $H_{||}$ дает проекции одного и того же знака на продольные оси сердечников:

$$H'(H_{||}) = H''(H_{||}) = H_{||} \cos \frac{\beta}{2}; \quad (1)$$

компонента H_{\perp} на те же оси сердечников даст проекции разных знаков:

$$H'(H_{\perp}) = H_{\perp} \sin \frac{\beta}{2}; \quad H''(H_{\perp}) = -H_{\perp} \sin \frac{\beta}{2}. \quad (2)$$

Полезным сигналом ФЗД служит вторая гармоника выходной э.д.с., однако можно взять любую другую четную гармонику э.д.с., или основную частоту, применительно к ФЗД, работающему в первом режиме [1]. Поскольку э.д.с. e' и e'' синфазны, т.е. разность фаз ϕ между

ними равна нулю, то суммарная э.д.с. в измерительной обмотке ФЗД с учетом уравнений (1) и (2) равна:

$$\begin{aligned}e_{2S}(H_{\parallel}) &= e'_{2S} \left(H_{\parallel} \cos \frac{\beta}{2} \right) + e''_{2S} \left(H_{\parallel} \cos \frac{\beta}{2} \right) = \\ &= E'_{2S} \sin 2\omega t + E''_{2S} \sin 2\omega t = 2E'_{2S} \sin 2\omega t, \\ e_{2S}(H_{\perp}) &= e''_{2S} \left(H_{\perp} \sin \frac{\beta}{2} \right) + e'_{2S} \left(-H_{\perp} \sin \frac{\beta}{2} \right) = \\ &= E''_{2S} \sin 2\omega t - E'_{2S} \sin 2\omega t = 0,\end{aligned}$$

т.е. компонента поля H_{\perp} не вызывает во вторичной обмотке появления дополнительной э.д.с., а следовательно, ФЗД не имеет дополнительной диаграммы направленности.

Заключение. С учетом требований к бортовым СБЛ для обнаружения магнитных объектов предложена новая конструкция ФЗД. Особенности конструкции исключают высокие требования к точности изготовления сердечников и необходимость прецизионной сборки датчика.

Измеренные ДН предложенных U-, V- и П-образных ФЗД подтвердили возможность их применения в СБЛ для обнаружения наземных и надводных металлосодержащих объектов.

Разработанные ФЗД отличаются от классических ФЗД достаточно широкой ДН, малой чувствительностью к влиянию геомагнитного поля, стойкостью к механическим воздействиям и простой технологией изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев Ю. В. Феррозонды. – Л.: Энергия, 1969.
2. Афанасьев Ю. В., Гольдрейер И. Г., Долгинов С. Ш. Вопросы проектирования феррозондовых магнитометров // Геофизическое приборостроение. – 1960. – Вып. 5.

Статья поступила в редакцию 26.03.2008

Олег Валерьевич Санков родился в 1980 г., окончил Новосибирский ГТУ в 2003 г. Ассистент кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” НГТУ. Автор шести научных работ в области магнитометрии, разработки и исследований датчиков металлосодержащих объектов.

O.V. Sankov (b. 1980) graduated from the Novosibirsk State Technical University in 2003. Assistant of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Novosibirsk State Technical University. Author of 6 publications in the field of magnetic metering, development and study of detectors of metal-containing objects.

Владимир Николаевич Легкий родился в 1957 г., окончил Новосибирский ГТУ в 1981 г. Д-р техн. наук, зам. директора ФГУП “СНИИОС”, профессор кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” НГТУ. Автор более 100 научных работ, в том числе 2 монографий, учебника в области физики высоких энергий.

V.N. Lyogkii (b. 1957) graduated from the Novosibirsk State Technical University in 1981. D. Sc. (Eng.), deputy director of Federal State Unitary Enterprise “SNIOS”, professor of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Novosibirsk State Technical University. Author of more than 100 publications including 2 monographs and a textbook in the field of physics of high energies.