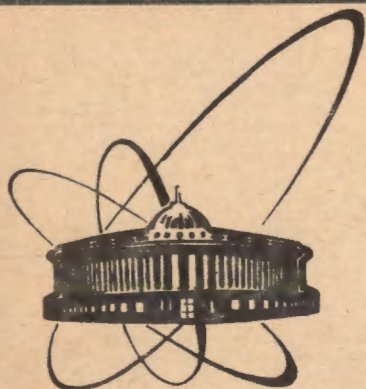


90-558



**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

1023/91

P13-90-558

Е. А. Силаев

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
ФЕРРОЗОНДОВОГО ТЕСЛАМЕТРА**

1990

Феррозондовые магнитометры остаются весьма распространенными приборами для измерения постоянных и переменных магнитных полей низкого уровня [1,2]. Это объясняется их сравнительной простотой, компактностью, отсутствием необходимости в громоздком криогенном оборудовании и др. Благодаря достижениям в создании новых ферромагнитных материалов и методов их обработки, в разработке новых режимов работы и конструкций феррозондов, происходит непрерывный процесс снижения их магнитных шумов. В настоящее время для феррозондов достигаются спектральные плотности магнитных шумов $10^{-10} \dots 10^{-12}$ Тл/Гц^{1/2} [2,3]. Это делает феррозондовые магнитометры незаменимыми в ряде применений.

Одним из таких применений является измерение индукций остаточных магнитных полей внутри магнитных экранов. При этом в зависимости от требований, предъявляемых к экрану, меняются и требования к тесламетру (чувствительность, точность, диапазон измеряемых значений индукции, габариты датчиков).

Измерительный преобразователь феррозондового тесламетра в этом случае должен удовлетворять следующим требованиям:

- диапазон измеряемых значений магнитной индукции должен лежать в пределах от единиц нТл до значений индукции магнитного поля Земли в отсутствие экрана;
- собственные шумы сигнального тракта должны быть минимальны и не заметны на фоне магнитных шумов используемых феррозондов;
- быстродействие прибора должно позволять регистрацию магнитных наводок от электрической сети 50 Гц (с учетом гармоник);
- устройство должно быть простым, хорошо воспроизводимым и не требовать сложной настройки.

Этим требованиям удовлетворяет описываемый ниже прибор. Функциональная схема измерительного преобразователя феррозондового тесламетра приведена на рис.1.

Преобразователь служит для работы с наиболее распространенным типом феррозонда F, содержащим обмотки возбуждения (состоит из двух встречно включенных полуобмоток), измерительную и

компенсационную (обратной связи)[1,2]. В соответствии с принципом действия феррозонда преобразователь содержит два основных канала: канал возбуждения и канал измерительного сигнала.

Канал возбуждения состоит из задающего генератора 1, делителя частоты 2 с фазовым корректором 3, формирователя 4 управления синхронным детектором, делителя частоты на два 5 и возбудителя 6. Последний подключен к обмотке возбуждения феррозонда.

Канал измерительного сигнала включает присоединенный к измерительной обмотке феррозонда входной усилитель 7 и соединенные с ним последовательно селективный усилитель 8, синхронный детектор 9, интегратор 10. Выход последнего является выходом измерительного преобразователя. Цепь отрицательной обратной связи 11 соединяет выход устройства с компенсационной обмоткой феррозонда. К этой обмотке может также подключаться по мере надобности внутренний калибратор 12.

На рис.2 приведены временные диаграммы канала возбуждения феррозонда (номера диаграмм соответствуют выходам функциональных узлов, номера которых указаны на рис.1).

Задающий генератор 1 с делителем частоты 2 формируют периодическую последовательность прямоугольных импульсов с частотой второй гармоники тока возбуждения феррозонда. Для повышения чувствительности частота возбуждения повышается до предела, определяемого поверхностными эффектами в сердечнике и обмотках феррозонда. Фазовый корректор 3 обеспечивает оптимальный фазовый сдвиг между сигналами цепей возбуждения феррозонда и управления синхронным детектором. При этом измерительный и управляющий сигналы, поступающие на синхронный детектор 9, должны быть синфазны.

Возбудитель 6 генерирует переменное напряжение треугольной формы для возбуждения феррозонда. Выбор треугольной формы связан с простотой формирования такого тока, обеспечением минимального содержания четных и быстрого спада амплитуд нечетных гармоник с увеличением их номера [2]. Исходным для формирования является прямоугольная импульсная последовательность, поступающая с делителя 5 частоты на два (рис.2).

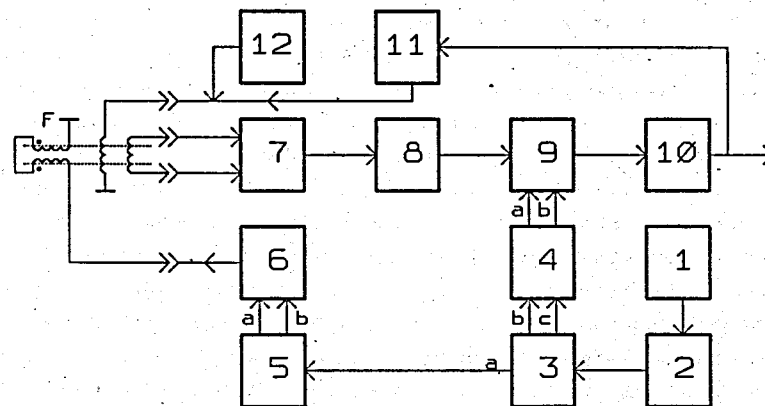


Рис.1. Функциональная схема измерительного преобразователя.

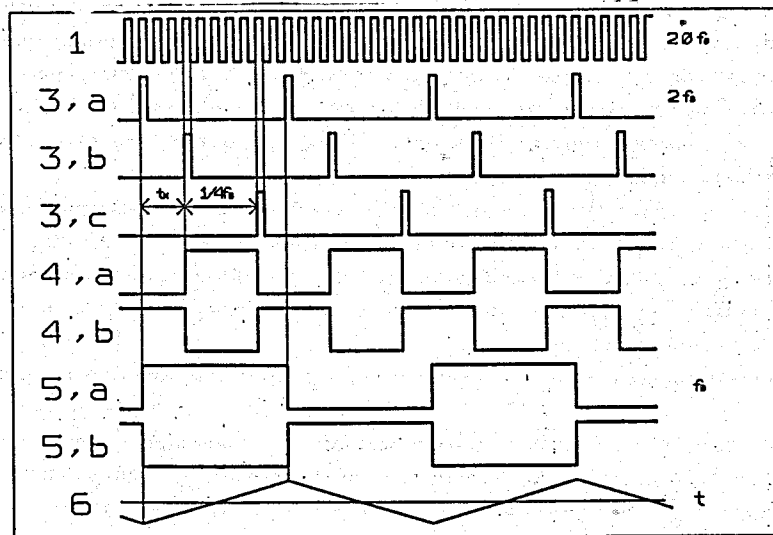


Рис.2. Временные диаграммы канала возбуждения измерительного преобразователя.

Входной усилитель 7 служит для съема с измерительной обмотки феррозонда сигнала, несущего информацию о величине измеряемой магнитной индукции. Таковым является э.д.с. второй гармоники частоты возбуждения феррозонда. Ее необходимо отделить от присутствующих одновременно наводок нечетных гармоник, прежде всего первой и третьей. Кроме того, необходимо подавление наводки четных гармоник, проникающих в измерительный канал, путями, не связанными с нелинейными процессами в феррозонде (непосредственно из цепей возбуждения феррозонда, цепей управления синхронным детектором, шин питания и т.п.). Задачу подавления паразитных сигналов решает симметрия входных цепей, включая дифференциальный входной усилитель, а также режим параметрического резонанса на второй гармонике в цепи измерительной обмотки. Последующие элементы измерительного канала также осуществляют частотную селекцию сигнала второй гармоники. Это селективный усилитель 8 и синхронный детектор 9. Последний управляется импульсами с формирователя 4 в канале возбуждения (рис.2).

На выходе детектора выделяется огибающая второй гармоники, которая усиливается интегратором 10. Последний также ограничивает частотный спектр выходного сигнала и осуществляет частотно-фазовую коррекцию петли регулирования, замыкаемую через цепь 11 обратной связи и компенсирующую обмотку феррозонда (рис.1). Выход интегратора является выходом устройства.

Для контроля за коэффициентом преобразования измерительного преобразователя в схему введен внутренний калибратор 12, при включении которого в компенсирующую обмотку подается калиброванный ток, соответствующий действию на феррозонд определенной индукции внешнего магнитного поля.

Принципиальная схема измерительного преобразователя приведена на рис.3.

Задающий генератор преобразователя выполнен на основе кварцевого резонатора ZQ с собственной частотой $f_p = 20f_B = 300$ кГц / f_B - частота возбуждения феррозонда / и микросхемы DD1 типа К561ЛА7. Для возникновения автоколебаний вентиль DD1.1 с помощью резистора R28 установлен в линейный режим. Вентили DD1.2 и DD1.3

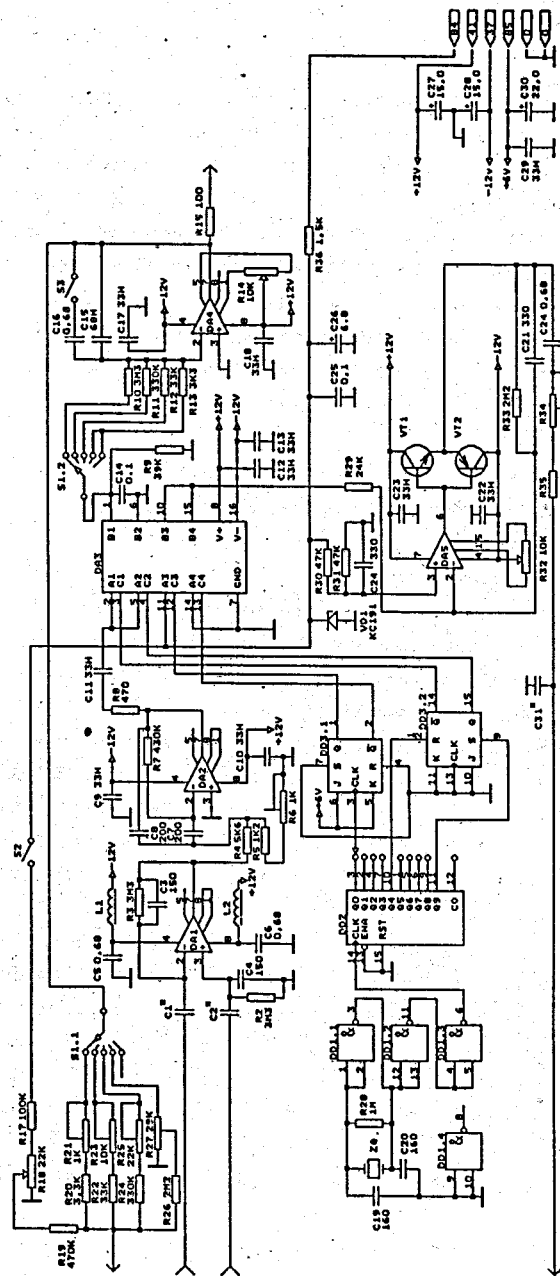


Рис.3. Принципиальная схема измерительного преобразователя.

формируют последовательность прямоугольных импульсов с крутыми фронтами.

Десятичный счетчик с дешифратором DD2 типа K561IE8 выполняет функции делителя частоты 2 и фазового корректора 3 (рис.1). На каждом из дешифрованных выходов Q0...Q9 этой микросхемы действуют импульсы длительностью $1/2f_p \cong 1,7$ мкс и частотой $2f_B = 30$ кГц (рис.2). На каждой паре смежных выходов импульсные последовательности имеют взаимный фазовый сдвиг на $1/10$ периода или 36° с отставанием в сторону увеличения номера выхода. Таким образом, снимая импульсные последовательности для возбуждения феррозонда и управления синхронным детектором с разных выходов, можно получить требуемый фазовый сдвиг между ними в пределах $36^\circ \dots 360^\circ$.

Управляющий формирователь для синхронного детектора выполнен на триггере DD3.2 типа K561ТВ1. Он преобразует входные импульсные напряжения с частотой 30 кГц и скважностью 20 в комплементарную пару импульсных последовательностей с той же частотой и скважностью 2 (рис.2). Для этого установочные входы указанного триггера подключены к таким выходам DD2, чтобы сигнал на R-входе отставал по фазе на 180° от сигнала на S-входе. Это соответствует временному сдвигу между ними на $1/4f_B \cong 16,7$ мкс.

На JK-триггере DD3.1 выполнен делитель частоты на два, формирующий комплементарную пару импульсных последовательностей частотой 15 кГц и скважностью 2, необходимую для управления ключами возбуждателя. Входной сигнал для него снимается с одного из выходов DD2. Выбором номера этого выхода осуществляется оптимальный временной (фазовый) сдвиг t_k (рис.2) между цепями возбуждения феррозонда и управления синхронным детектором.

Возбудитель феррозонда включает в свой состав операционный усилитель (ОУ) DA5 типа KP140УД608 с эмиттерными повторителями VT1, VT2, образующими вместе с цепью R29, C21 интегратор, и ключи 3,4 микросхемы DA3 типа K590KH2. Последние периодически переключают верхний (по схеме) вывод резистора R29 с нулевого потенциала на опорное напряжение, вырабатываемое стабилитроном VD1. Неинвертирующий вход DA5 подключен к этому стабилитрону постоянно

через делитель напряжения R30, R31. Благодаря этому ток через резистор R29 периодически меняет направление, а напряжение на выходе VT1, VT2 линейно нарастает и спадает. Т.к. делитель R30, R31 имеет коэффициент деления 2, то скорости нарастания и спада напряжения будут одинаковы и, следовательно, на эмиттерах VT1, VT2 будет действовать биполярное напряжение треугольной формы. Его амплитуду можно определить из равенства зарядов, полученных и отданных конденсатором C21 за период изменения напряжения:

$$V_a = V_{оп} / BR_{29} C_{21} f_B,$$

где: $V_{оп}$ - напряжение на стабилитроне VD1.

Выход интегратора через цепь R34, R35, C24, C31 подключен к обмотке возбуждения феррозонда. При этом реализуется феррорезонансный режим возбуждения [5].

Входной усилитель измерительного канала выполнен на базе ОУ DA1. В отличие от [2], он выполнен по схеме дифференциального усилителя с емкостной отрицательной обратной связью (конденсаторы C1...C4), при этом C1=C2, C3=C4, R2=R3, а также:

$$4\pi f_B R_3 C_3 \gg 1. \quad (1)$$

Коэффициент усиления этого усилителя по напряжению будет равен:

$$K_{ву} \cong C1/C3. \quad (2)$$

Кроме того, конденсаторы C1 и C2 совместно с измерительной обмоткой и входным сопротивлением DA1 (с учетом параллельной обратной связи, действующей через C3, C4) образуют последовательный параметрический колебательный контур, настроенный на вторую гармонику частоты возбуждения феррозонда.

Достоинствами такого съема сигнала являются минимальные потери, вносимые во входной контур, и минимальные собственные шумы усилителя в сочетании с предельной простотой схемы.

Минимальные потери во входном контуре позволяют увеличить его

вклад в обеспечение общей частотной избирательности сигнального тракта, а значит, упростить селективный усилитель 8. Это выгоднее, чем использование сложных активных [2] или пассивных [6] фильтров, т.к. в параметрическом колебательном контуре высокая добротность сочетается с малой крутизной фазочастотной характеристики [4]. А это - условие повышенной стабильности устройств, использующих синхронно-фазовое детектирование.

В нашем случае потери, вносимые в последовательный колебательный контур, определяются активной составляющей дифференциального сопротивления $r_{вх}$ на входах DA1. Здесь используется полностью скомпенсированный ОУ типа K544VД2 и выполняется условие:

$$f_1 / K_{ou} < 2f_v < f_1,$$

где f_1 - частота единичного усиления ОУ,

K_{ou} - коэффициент усиления ОУ без обратной связи, поэтому

$$r_{вх} \cong 1 / \pi f_1 C_3. \quad (3)$$

Подставляя в (3) значения $f_1 = 15$ МГц, $C_3 = 150$ пФ, имеем $r_{вх} \cong 70$ Ом. По сравнению с типичными сопротивлениями эквивалентных потерь в феррозонде, полученное значение $r_{вх}$ меньше на порядок величины. Согласно (3) его можно еще уменьшить, используя ОУ с большим быстродействием или увеличивая емкости C_3 и C_4 . Последнее соответствует снижению усиления входного усилителя (2).

При выполнении условия (1) сопротивления цепей обратной связи ОУ DA1 являются реактивными, поэтому они не вносят дополнительного вклада в шумы входного усилителя. Это также выгодно отличает схемное решение последнего от обычных дифференциальных усилителей напряжения, особенно, если используется малощумящий феррозонд.

С входным усилителем связан селективный усилитель, выполненный по простой схеме с параллельными ветвями обратной связи на операционном усилителе DA2. Так же как и входной контур, он настроен на частоту второй гармоники ($2f_v = 30$ кГц). Благодаря

повышенной добротности входного параметрического контура, требования к избирательности этого усилителя невысокие ($Q \cong 10$).

В состав синхронного детектора входят аналоговые ключи 1,2 микросхемы DA3 и конденсаторы C11, C14. Ключи поочередно замыкаются под действием синфазных с измерительным сигналом импульсных последовательностей с выходов триггера DD3.2 (см. выше). На C14 выделяется демодулированное напряжение, величина и полярность которого определяются величиной и направлением измеряемой индукции магнитного поля.

Дальнейшее усиление сигнала осуществляется интегратором на ОУ DA4 типа KP140VД18 с элементами отрицательной обратной связи R10...R13, C15, C16. Коэффициент преобразования устройства определяется резисторами отрицательной обратной связи R20...R27, включенными между выходом DA4 и компенсационной обмоткой феррозонда. Т.к. петлевое усиление преобразователя велико, то коэффициент преобразования будет равен

$$K_{пр} \cong 1/\beta \cong R_{oc} / \alpha S_k, \quad (4)$$

где R_{oc} - сопротивление цепи обратной связи;

S_k - постоянная компенсирующей катушки феррозонда, равная отношению индукции магнитного поля, создаваемой катушкой, к току в ней;

α - коэффициент передачи выходного напряжения в цепь обратной связи ($\alpha < 1$ - для максимального коэффициента преобразования и $\alpha = 1$ - для остальных);

β - коэффициент обратной связи.

Переключая с помощью S1.1 резисторы в цепи обратной связи (изменяя β), можно проводить выбор требуемого коэффициента преобразования. Однако от β зависит также и малосигнальная граничная частота измерительного тракта:

$$F_{гр} = G_{\phi} K_{уд} \beta / 2\pi R_{и} C_{и}, \quad (5)$$

где G_{ϕ} - коэффициент преобразования феррозонда;

$K_{уд}$ - усиление по напряжению от измерительной обмотки до входа интегратора;

$R_{и}, C_{и}$ - соответственно, сопротивление и емкость в цепи обратной связи интегратора.

Желательно, чтобы $F_{гр}$ не изменялась при переключении коэффициента преобразования. Для этого, одновременно с переключением $R_{ос}$, обратно пропорционально ему, изменяется сопротивление $R_{и}(R10...R13)$ с помощью переключателя S1.2. При необходимости уменьшить $F_{гр}$, с помощью тумблера S3 параллельно C15 подключают конденсатор C16. Увеличение $C_{и}$ приводит к соответствующему уменьшению граничной частоты (5).

Внутренний калибратор представляет собой источник тока, включающий в свой состав резисторы R17...R19 и точный стабилитрон VD1, который одновременно используется и в возбудителе феррозонда. Включение калибратора производится тумблером S2.

Основные технические характеристики измерительного преобразователя, полученные в результате испытаний со стержневым феррозондом¹, имеющим собственный коэффициент преобразования 40 мкВ/нТл:

-коэффициенты преобразования, В/мкТл:	100; 10; 1; 0,1
-максимальное выходное напряжение, В:	± 5
-выходное сопротивление, Ом:	100
-полосы пропускания для малого сигнала (ур.-3 дБ), Гц: 0...20, 0...200	
-максимальная скорость изменения измеряемого магнитного поля (при синусоидальном сигнале), мкТл/с:	70
-спектральная плотность шумовой индукции (в области выше 10 Гц), не более, нТл/Гц ^{1/2} :	20
-интегральная нелинейность, не более, % :	0,15
-контрольный уровень встроенного калибратора, нТл:	50
-частота тока возбуждения феррозонда, кГц:	15
-форма исходного возбуждающего напряжения:	треугольная

¹ Феррозонд разработан старшим научным сотрудником Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ Т. Лешнером (ЧСФР).

-питание:

+24В, 11мА

±12В, 22мА

+6В, 10мА

Измерительный преобразователь выполнен в конструктиве КАМАК, блок 2М.

В заключение автор выражает признательность Б.В.Васильеву за постановку задачи, Т.Лешнеру (ЧСФР) за полезные обсуждения, В.Г.Купцову и С.В.Кулагину за монтаж и помощь в налаживании прибора, А.В.Сермягину за участие в натурных испытаниях.

Литература

1. Средства измерений параметров магнитного поля. Ю.В.Афанасьев, Н.В.Студенцов, В.Н.Хорев и др. Л.: Энергия, 1979.
2. Ю.В.Афанасьев. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
3. П.Кнеппо, Л.И.Титомир. Биоманнитные измерения. М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Н.И.Яковлев. Особенности работы феррозондового датчика в резонансном режиме. Геофизическая аппаратура, Л.: Недра, 1968, вып.35.
5. Р.Я.Беркман, Б.Л.Бондарчук, В.М.Федотов. Феррорезонансный режим возбуждения магнитных модуляторов и феррозондов. Геофизическая аппаратура, Л.: Недра, 1972, вып.50.
6. М.А.Воеводин, В.М.Дробин, Н.А.Коруков, Ш.З.Сайфуллин, И.Н.Яловой. Сообщения ОИЯИ, Р9-89-846, Дубна, 1989.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 декабря 1990 года.