

АППАРАТУРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НИЗКИХ ЧАСТОТ

Сокол-Кутыловский О.Л., Тягунов Д.С. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Разработан комплект аппаратуры, предназначенной для регистрации индукции слабого магнитного поля низких частот. Преобразователь магнитного поля выполнен на основе колебательного контура с сердечником из аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной магнитострикцией, работающего в режиме автопараметрического усиления. Выходной сигнал преобразуется в цифровой код и подается на персональный компьютер. Даны основные технические характеристики и представлена блок-схема преобразователя магнитной индукции. Приведены фрагменты записи диаграмм вертикальной составляющей магнитного поля.

THE EQUIPMENT FOR REGISTRATION OF A MAGNETIC FIELD OF LOW FREQUENCIES

Sokol-Kutylovskiy O.L., Tyagunov D.S. – Institute of geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. The complete set of equipment intended for registration of induction of low frequency weak magnetic field was developed. The magnetic field converter is executed on the base of an oscillatory contour with a core made of amorphous ferromagnetic alloy with compensated magnetostriction. The converter works in a mode of auto parametrical amplification. The target signal will be transformed to a digital code and moves to a personal computer. The basic characteristics are given and the block diagram of the magnetic induction converter is submitted. The fragments of record of the diagrams of a vertical component of a magnetic field are given.

Аппаратура для измерения слабого магнитного поля предназначена для исследования геомагнитных вариаций и для регистрации магнитного поля техногенного происхождения, область частот которого попадает в диапазон собственных частот органов и систем человеческого организма и прямо или косвенно может влиять на их жизнедеятельность. Собственно аппаратура состоит из датчиков – преобразователей магнитной индукции в электрический сигнал, программируемых аналогово-цифровых преобразователей и персонального компьютера, который управляет последовательностью преобразования, сохраняет полученную информацию для каждого из каналов измерения и обрабатывает ее по заданной программе.

Автопараметрический преобразователь магнитной индукции предназначен для измерения индукции слабого магнитного поля низких частот. Принцип работы автопараметрического преобразователя магнитной индукции основан на зависимости амплитуды переменного электрического напряжения в колебательном LC-контуре с аморфным ферромагнитным сердечником от величины внешнего магнитного поля.

Такая зависимость имеется в любом колебательном LC-контуре с ферромагнитным сердечником, однако крутизна характеристики «магнитная индукция – амплитуда напряжения» обычно настолько мала, что не позволяет применить данный метод для надежной регистрации изменения магнитной индукции ниже ~1 нТл.

Применение в качестве сердечника колебательного LC-контура полосы аморфного ферромагнитного сплава, полученного методом быстрой закалки из расплава, позволяет увеличить коэффициент преобразования в сотни раз, если обеспечить в колебательном LC-контуре режим параметрического усиления амплитуды электрического сигнала, соответствующего изменению магнитной индукции. С этой целью обычно используют дополнительный генератор, действующий на какой-либо из параметров (емкость или индуктивность) колебательного LC-контура с частотой, кратной частоте основного сигнала. Но в том случае, когда в качестве сердечника LC-контура применена полоска аморфного ферромагнитного сплава, дополнительный генератор параметрического возбуждения контура не

требуется. Из-за чрезвычайно высокого магнитоупругого взаимодействия, свойственного аморфным ферромагнетикам, полученным методом быстрой закалки, при возбуждении их переменным магнитным полем в них всегда, кроме основной частоты, наблюдается и удвоенная частота изменения магнитной индукции. Это явление относится в полной мере и к аморфным сплавам с компенсированной магнитострикцией [1]. Поэтому режим параметрического возбуждения в колебательном LC-контуре с аморфным ферромагнитным сердечником можно получить без дополнительного источника накачки путем оптимального выбора амплитуды высокочастотного напряжения возбуждения LC-контур, резонансной частоты LC-контур и величины внешнего магнитного поля. Такой режим работы колебательного LC-контур соответствует режиму автопараметрического усиления [2].

На рис. 1 представлена схема возбуждения колебательного LC-контур с аморфным ферромагнитным сердечником и показана зависимость первой гармоники напряжения частоты возбуждения на нем от магнитного поля в режиме автопараметриче-

ского резонанса. На графике (рис. 1) показана область оптимальных значений амплитуды напряжения на LC-контуре, в которой наблюдается максимальная крутизна преобразования, обозначенная на рис. 1 « U_m », а этой оптимальной амплитуде напряжения соответствует магнитное поле смещения $\sim 24 \times 10^{-6}$ Тл. При намагничивании сердечника LC-контур в различных направлениях наблюдается некоторый гистерезис (направление изменения магнитного поля при намагничивании показано стрелками).

Поэтому для однозначности рабочей точки целесообразно выбирать ее на той части зависимости, которая соответствует выходу ферромагнитного сердечника из состояния насыщения. При значительном увеличении амплитуды возбуждения автопараметрического LC-контур происходит рост величины гистерезиса и скачкообразный срыв зависимости «амплитуда напряжения – магнитное поле», а при уменьшении амплитуды снижается крутизна преобразования, а зависимость «амплитуда напряжения – магнитное поле» стремится к обычному релаксационному спектру, показанному на рис. 1 пунктиром. В качестве

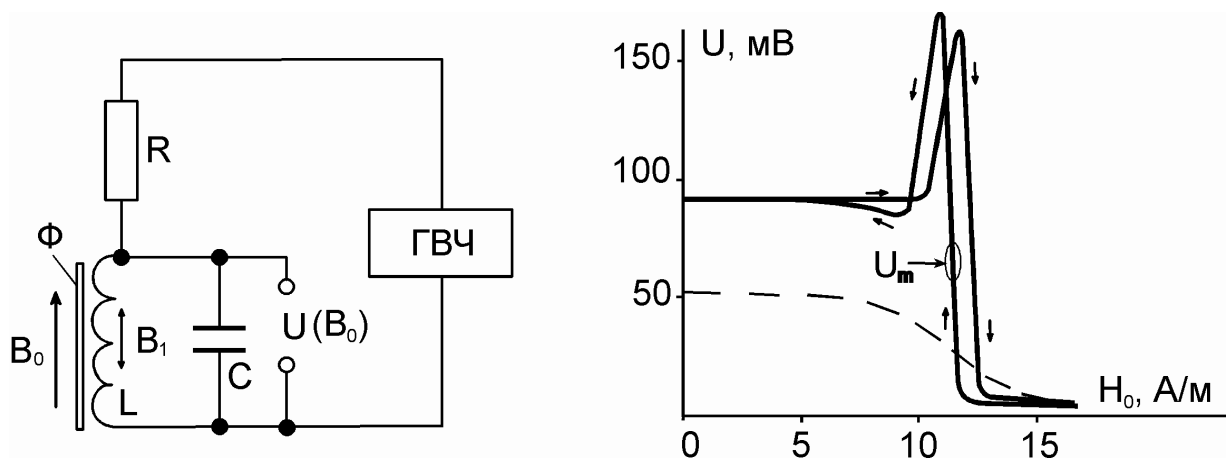


Рис. 1. Схема возбуждения колебательного LC-контур с аморфным ферромагнитным сердечником и зависимость амплитуды первой гармоники переменного напряжения на LC-контуре от величины внешнего магнитного поля при продольном возбуждении сердечника: Φ – аморфный ферромагнитный сердечник; ГВЧ – генератор электрического тока высокой частоты; R – ограничительный резистор; L – катушка контур; C – емкость контур; B_0 – постоянное магнитное поле; B_1 – магнитное поле возбуждения контур; $U(B_0)$ – напряжение на контуре, зависящее от внешнего магнитного поля B_0 ; H_0 – напряженность магнитного поля в катушке LC-контур; U_m – оптимальная амплитуда напряжения высокой частоты на LC-контуре

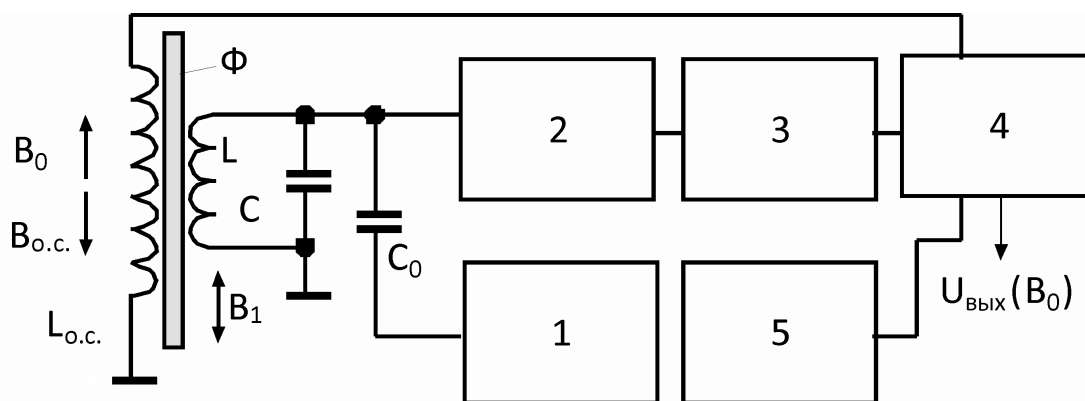


Рис. 2. Блок-схема автопараметрического преобразователя магнитной индукции: Φ – аморфный ферромагнитный сердечник; B_0 – внешнее магнитное поле, $B_{o.c.}$ – магнитное поле, создаваемое катушкой обратной связи $L_{o.c.}$; B_1 – магнитное поле возбуждения; L – катушка индуктивности контура; C – электрическая емкость контура; C_0 – конденсатор связи; 1 – генератор высокой частоты; 2 – усилитель электрического напряжения высокой частоты; 3 – детектор; 4 – электронный регулятор; 5 – источник опорного электрического напряжения

сердечника LC-контура использовалась лента из аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной магнитоstriction, полученная методом быстрой закалки из расплава, имеющая размеры $40 \times 1 \times 0,02$ мм. Частота возбуждения LC-контура ~ 300 кГц.

На рис. 2 представлена блок-схема одного канала измерительного преобразователя магнитной индукции.

Напряжение на LC-контуре, усиленное и выпрямленное детектором, и напряжение источника опорного напряжения сравниваются в электронном пропорционально интегрирующем регуляторе, который совместно с катушкой обратной связи образует цепь отрицательной обратной связи по магнитному полю.

Преобразователь магнитной индукции работает следующим образом. В момент включения источника питания по катушке обратной связи проходит максимальный электрический ток, в результате чего аморфный ферромагнитный сердечник входит в состояние магнитного насыщения, а амплитуда напряжения на контуре становится намного ниже величины электрического напряжения источника опорного напряжения, которое соответствует выбранной рабочей точке. Поэтому на выходе электронного регулятора возникает электрическое напряжение, создающее в ка-

тушке обратной связи магнитное поле направленное таким образом, что амплитуда напряжения на контуре увеличивается до достижения величины, соответствующей оптимальной амплитуде возбуждения LC-контура автопараметрического преобразователя магнитной индукции и заданному магнитному полю смещения. По достижению равенства опорного напряжения и напряжения на выходе детектора происходит «захват» рабочей точки электронным регулятором, а любое отклонение магнитного поля от величины, соответствующей магнитному полю смещения автопараметрического преобразователя магнитной индукции, автоматически компенсируется цепью отрицательной обратной связи по магнитному полю. При этом напряжение на выходе электронного регулятора пропорционально величине внешнего магнитного поля. Так как при изменении внешнего магнитного поля рабочая точка преобразователя непрерывно поддерживается системой отрицательной обратной связи по магнитному полю, то характеристика преобразователя оказывается строго линейной. А так как рабочая точка смещена относительно истинного «нулевого» магнитного поля (на величину магнитного поля смещения), то выходная характеристика автопараметрического преобразователя магнитной индукции по напряжению также смещена.

Для обеспечения работы преобразователя в магнитном поле Земли при произвольной ориентации датчика коэффициент его преобразования (чувствительность) устанавливается в пределах $0,05 \div 0,2$ мВ/нТл, в зависимости от величины напряжения питания ($\pm 5 \div \pm 15$ В). Типичная величина собственного магнитного шума автопараметрического преобразователя магнитной индукции не превышает $5 \text{ нТл} \times \text{Гц}^{-1/2}$ в диапазоне частот от 0,1 Гц до 1 кГц, но для некоторых сердечников может быть в 2 – 3 раза меньше.

Режим автопараметрического усиления в LC-контуре с аморфным ферромагнитным сердечником может быть получен на частотах возбуждения от 0,1 МГц до

10 МГц. При этом длина ферромагнитного сердечника может находиться в пределах от 70 мм до 10 мм.

В качестве ферромагнитного сердечника колебательного LC-контра в автопараметрическом преобразователе магнитной индукции могут также применяться ленты из нанокристаллических магнитомягких сплавов (типа «Finemet»), однако при аналогичных размерах сердечника оптимальная рабочая точка при использовании нанокристаллических сплавов находится в 1,5 – 2 раза большем магнитном поле, а типичный уровень собственного магнитного шума в них в несколько раз выше, чем в чисто аморфных лентах ферромагнитных сплавов с компенсированной продольной

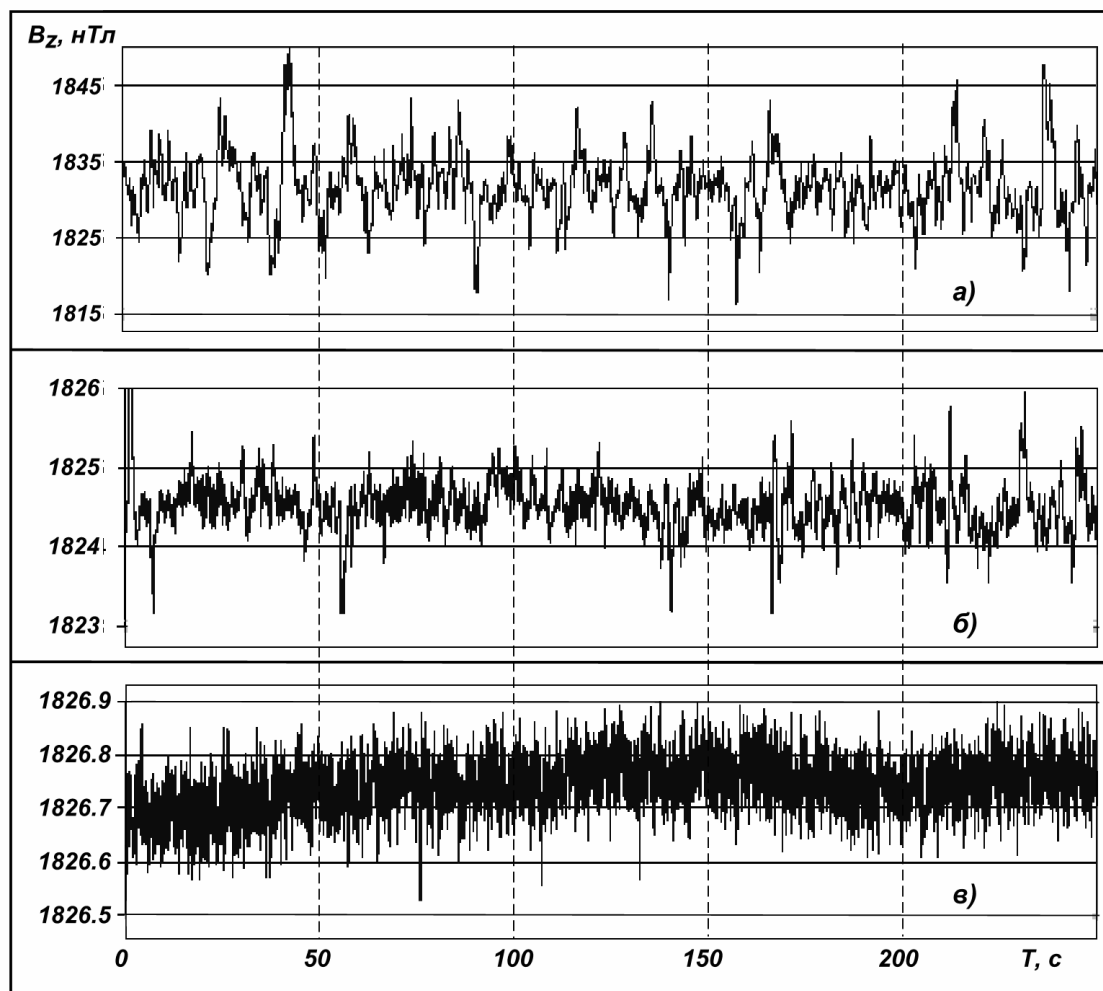


Рис. 3. Диаграммы записи вертикальной составляющей магнитного поля: а) в пределах города Екатеринбурга (Юго-Западный район); б) при удалении на запад от первоначальной точки на расстояние около 10 км; в) на территории обсерватории АРТИ (расстояние от Екатеринбурга около 150 км)

магнитострикцией.

Для полной реализации разрешающей способности преобразователя по магнитному полю (~ 5 пТл) при произвольной ориентации датчиков в постоянном магнитном поле Земли (± 60000 нТл) целесообразно отсечь с помощью фильтра верхних частот постоянную составляющую напряжения выходного сигнала, ограничившись нижней частотой регистрации $\sim 0,05$ Гц. Верхняя частота регистрации выбрана равной 10 Гц, что позволяет с помощью многоступенчатой фильтрации эффективно подавить основную промышленную частоту помех, 50 Гц, до уровня ниже порога чувствительности датчиков в рабочем диапазоне частот.

Чтобы согласовать уровень выходного напряжения преобразователя магнитной индукции (± 12 В) с уровнем входного сигнала аналого-цифрового преобразователя ($0 \div 5$ В), был применен выходной каскад усиления на базе операционного усилителя с однополярным включением и с искусственной средней точкой, а также резистивный делитель напряжения, совмещенный с пассивным фильтром нижних частот.

В качестве аналого-цифрового преобразователя в аппаратуре используется 24-х разрядный программируемый АЦП AD7714 в типовом включении. Частота дискретизации 80 Гц.

Изменения магнитного поля в рабочем диапазоне частот ($0,05 \div 10$ Гц), переведенные в цифровой код, записываются на персональный компьютер и отображаются на экране монитора в реальном режиме времени.

На рис. 3 приведены фрагменты диаграмм записи вертикальной составляющей магнитного поля, выполненные при помощи комплекта описанной здесь аппаратуры на различном расстоянии от крупного промышленного центра.

Во время проведения записей, по данным магнитовариационной станции обсерватории АРТИ, геомагнитное поле было спокойным. То есть эти измерения показали почти стократное превышение техногенного магнитного шума в крупном промышленном городе над естественными геомагнитными вариациями.

Литература

1. *Сокол-Кутыловский О.Л.* Особенности резонанса магнитной восприимчивости в лентах аморфных и нанокристаллических ферромагнитных сплавов. ИГ УрО РАН Екатеринбург, 1996. 13с., ил.4, Библиогр. 7 назв. Деп. в ВИНТИ 30.10.96 № 3162-В96.
2. *Sokol-Kutylovskij O.L.* Magnetic field sensors on the base of amorphous alloys for high-sensitivity low-frequency measurements. // *Sensors and Actuators: A. Physical*, Vol. 62/1-3, July. 1997. P. 496–500.