

УДК 621.317.7+389.1 (075.8)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ФЕРРОМОДУЛЯЦИОННОГО МАГНИТОМЕТРА, ИНДИФФЕРЕНТНОГО К ХАОТИЧЕСКОМУ ВОЗБУЖДЕНИЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА



В.Н. Ильин

Заведующий лабораторией
Института физики
им. Б.И. Степанова НАН
Беларуси, доктор технических
наук
ifanbel@ifanbel.bas-net.by



В.В. Баранов

Профессор кафедры
проектирования
информационно-
компьютерных систем
БГУИР, доктор технических
наук, профессор
vvb@bsuir.by



О.В. Дударева

Старший преподаватель
кафедры проектирования
информационно-
компьютерных систем
БГУИР, магистр наук,
kalita@bsuir.by

В.Н. Ильин

Окончил Минский радиотехнический институт (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники). Область научных интересов связана с исследованием и разработкой оптических систем контроля микродвижений технических объектов, моделированием систем скрытой передачи и приема информации.

В.В. Баранов

Окончил Минский радиотехнический институт (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники). Область научных интересов связана с моделированием и разработкой методов формирования твердотельных структур полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, их тестированием, исследованиями в области био-медицинских технологий.

О.В. Дударева

Окончила Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов связана с моделированием твердотельных структур на основе гетеропереходов, исследованиями в области технических средств безопасности.

Аннотация. Проведен анализ возможностей реализации и моделирование широкополосного ферромодуляционного магнитометра, индифферентного к хаотическому возбуждению чувствительного элемента. Предложена схема модулятора сигналов, передаваемых в канал передачи информации.

Для проведения расчетов использована программа *MATHECAD*, в результате Фурье анализа напряжения на контуре получена спектрограмма сигнала модулятора. Показано, что прибор на основе предложенной схемы модулятора характеризуется линейной передаточной характеристикой в широком динамическом диапазоне, широкополосностью и отсутствием фазовых искажений.

Ключевые слова: Ферромодуляционный магнитометр, устойчивость к динамическому хаосу, схема и модель модулятора, феррозонд, факторы нестабильности.

Введение. Системы линейных дифференциальных уравнений, являющиеся приближениями по своей сути нелинейного Мира, благодаря своим упрощенным предположениям смогли описать многочисленные приложения и легли в основу их

моделей. Они были некогда единственно приемлемыми, так как только они отвечали духу времени, требованиям получения решения любым способом, но в замкнутом виде (в виде формулы). В связи с возможностями вычислительной техники при обработке больших объемов информации (*BIG DATA*), необходимость в упрощении моделей приобретает второстепенное значение и на первый план выдвигается адекватность математической модели сущности описываемого процесса. Стало возможным применять модели в виде систем нелинейных дифференциальных уравнений. И хотя их решения, как правило, не представимы в замкнутом виде, используя компьютер можно наблюдать за характером их поведения. При некоторых сочетаниях параметров модели ведут себя не предсказуемо. Решения в виде временных реализаций напоминают шум, их характер зависит от начальных условий. Такое явление получило название детерминированного или динамического хаоса. Оно часто встречается, но мало изучено, характерно для нелинейных колебательных систем и контуров. В измерительных технологиях детерминированный хаос может представить интерес в связи с применением активных датчиков (первичных преобразователей) в виде нелинейных колебательных контуров, активированных источниками возбуждения. Возникает вопрос, что является исключением в контуре, с параллельно включенными элементами $L(i)$, R , C , возбужденным источником тока, упрощенные процессы, или динамический хаос. На этот вопрос нельзя ответить потому, что хаотических режимов в контуре, бесконечно много, о чем свидетельствуют [1,2,3] численные и натурные эксперименты. Применение параметрического подхода, разработанного скорее для пояснения, чем для анализа принципов работы преобразователей, работающих в сугубо нелинейном режиме, является вопросом и пытаться получить ответ на этот вопрос – бессмысленно, так как он априори предполагает периодическое изменение параметра, а значит отсутствие хаоса. Таким образом, уверенность в том, что параметр $L(i)$ – (индуктивность, зависящая от тока, протекающего по катушке индуктивности) изменяется нужным образом и периодически, может быть обоснована, только в результате практических испытаний, но и здесь приходится сомневаться в том, не работает ли датчик на грани хаоса, оптимальным ли выбран режим. Определению доверительных интервалов изменения параметров датчика, может поспособствовать лишь его адекватная математическая модель. Как известно, шум ограничивает точность измерений, а появление хаоса может привести к катастрофе (невозможности проведения измерений и предсказания).

Безусловно, применительно к датчику, рассматриваемому ниже в качестве примера (магнитомодуляционному преобразователю), испытанному временем с характерными для подобного рода датчиков устоявшимися метрологическими показателями, многие из разработчиков которые не имели в свое время ни малейшего представления о детерминированном хаосе, проблемы связанные с его появлением, решались просто – подбором параметров и не представляли никакого интереса. Но дело не в конкретном, отработанном на сегодняшний день датчике, а о проблеме в целом, которая ранее ускользала от внимания и не замечалась. Приводимый ниже анализ, хотя и является частным решением задачи устойчивости системы к динамическому хаосу, однако его можно обобщить, учитывая, что нелинейных систем и явлений значительно больше, чем моделей их описывающих. Под обеспечением устойчивости в рассматриваемом случае понимаются не меры по предотвращению возможности возникновения хаоса, а работоспособная конструкция, схема, предполагающая его возникновение или существование.

Таким образом, целью доклада является доказательство принципиальной осуществимости измерения напряженности магнитного поля магнитомодуляционным преобразователем, характеризующимся динамическим хаосом, и разработка его модели индифферентной ко всем возникающим и существующим в нем режимам.

Модель и расчеты. Для измерения напряженности низкочастотных магнитных полей широко применяется феррозонд, представляющий собой прецизионный магнитный модулятор. Получили распространение его два вида, основанные на выделении второй гармоники частоты возбуждения и на измерении временных интервалов перемагничивания нелинейного элемента (ферромагнитного сердечника), по которым и судят о величине напряженности поля. Причиной, осложняющей понимания работы феррозонда, являются неизбежно присутствующие емкости, шунтирующие съемную обмотку и обмотку накачки. Емкости могут вводиться и специально. Например, в феррозонде на второй гармонике, для получения параметрического усиления. Как отмечается в [4, с. 65], «применять его все же следует с осторожностью, т.е. имели место случаи, когда феррорезонансная цепь возбуждения становилась источником появления ложного сигнала. Поэтому выбор феррорезонансного режима требует последующего тщательного выявления и устранения подобных негативных явлений». Приведенные слова разработчика подтверждают вышесказанное и приводят к необходимости рассмотрения уточненной модели феррозонда, т.е. в виде приближения нелинейным колебательным контуром. Для получения хаоса нелинейность необходима, но недостаточна. Необходимы еще и определенные сочетания параметров контура, частоты и амплитуды внешнего возбуждения. Что касается нелинейности, то следует отметить, что часто для рассмотрения феррозонда кривую перемагничивания приближают функцией $B = a \cdot H - b \cdot H^3$, где a и b – коэффициенты, B , H соответственно индукция и напряженность магнитного поля. [4]. На практике и графо - аналитическом рассмотрении пользуются кусочно - линейной аппроксимацией [4]. В этой связи для моделирования в *MATHCAD* можно предложить взаимно обратные линейно - кусочные функции, справедливые при любом значении аргумента [5].

$$H(B) = a \frac{B}{B_s} - 0.5 (-H_s + a) \left| \frac{B}{B_s} + 1 \right| - 0.5 (-a + H_s) \left| \frac{B}{B_s} - 1 \right|$$

$$B(H) = \frac{1}{a} \frac{H}{H_s} - 0.5 (-B_s + \frac{1}{a}) \left| \frac{H}{H_s} + 1 \right| - 0.5 (-\frac{1}{a} + B_s) \left| \frac{H}{H_s} - 1 \right|,$$

где B_s и H_s – соответственно индукция и поле насыщения сердечника, a – коэффициент,

$$b = \arctg\left(\frac{1}{a}\right), \quad \text{tg}(c) = \frac{H_s}{B_s}$$

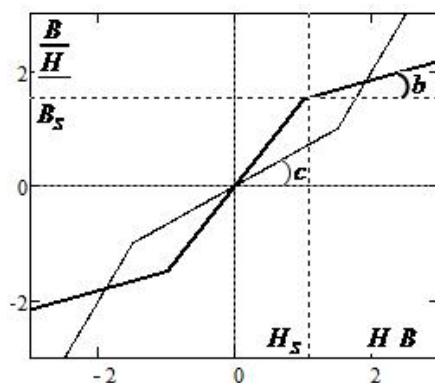


Рисунок 1. Зависимость B_s от H_s

Итак, рассмотрим магнитный модулятор в виде одного ферромагнитного сердечника, охваченного обмоткой, в которую подается ток возбуждения. Эта же обмотка будет и сигнальной.

Модулятор представлен на рис. 2 элементами $L(i)$, R , C , соединенными параллельно (блок-1). Параллельно этим элементам подключен генератор возбуждения 2 в виде источника тока $i(t)$ (H_B – напряженность внешнего измеряемого магнитного поля).

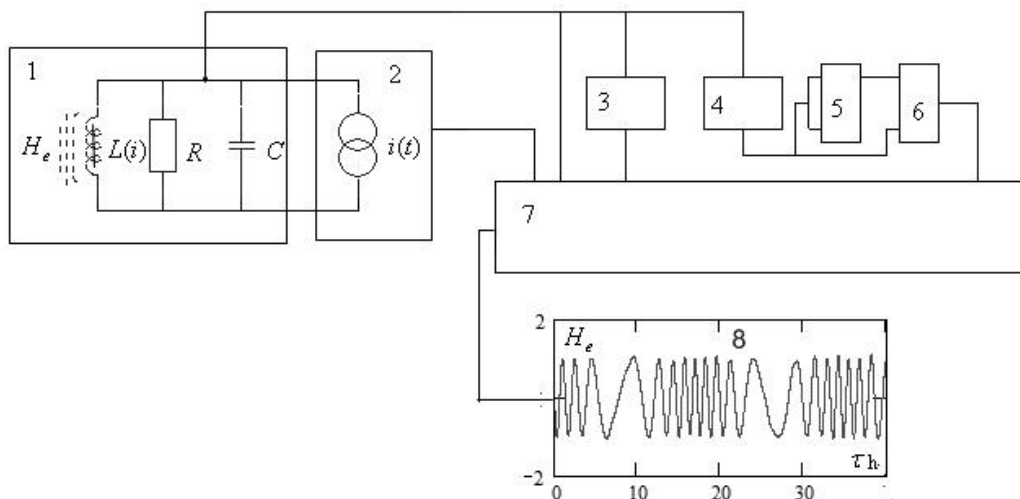


Рисунок 2. Схема магнитомодуляционного преобразователя:

- 1 – колебательный контур, 2 – генератор возбуждения,
- 3 – дифференциатор, 4 – интегратор, 5,6 – перемножители,
- 7 – сумматор, 8 – осциллограмма сигнала на выходе.

Для контура $L(i)$, R , C справедливо уравнение

$$C \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt} + i_L = i, \quad (1)$$

где C – емкость контура, ϕ – магнитный поток в сердечнике катушки индуктивности $L(i)$,

i_L – ток в катушке индуктивности, R – эквивалентное сопротивление контура.

Введя обозначения:

$$\phi_0 = I_0 L_0; \frac{\phi}{\phi_0} = B; \omega_0^2 = \frac{1}{L_0 C}; \tau = \omega_0 t; p = \frac{\omega}{\omega_0}; K = \frac{1}{R} \sqrt{L_0 \frac{1}{C}} = \frac{1}{RC \omega_0}$$

$$i = I_m \sin(\omega t); H_m = \frac{I_m}{I_0}; H_L = I = \frac{i_L}{I_0},$$

где ϕ_0 – магнитный поток в сердечнике катушки индуктивности $L(i)$, i – величина тока в катушке и считая, что L_0 некая индуктивность, определяемая проходящим через нее током I_0 , уравнение контура запишем в безразмерном виде

$$\frac{d^2 B}{d\tau^2} + K \frac{dB}{d\tau} + I = H_m \sin(p\tau) \quad (2)$$

учитывая, что H_e напряженность внешнего измеряемого поля (безразмерная), присутствующая в катушке индуктивности, и отождествляя напряженность магнитного поля с током, создающим это поле ($H_L = I$), получим $H = H_L + H_B$.

Чтобы не отягощать рассмотрение и сделать его более прозрачным ограничимся, самой простой зависимостью $H = B^3$ [1,2,3,7]. Этого достаточно для возникновения хаоса, тогда (2) запишем окончательно в виде, удобном для компьютерного моделирования.

$$\frac{d^2 B}{d\tau^2} + K \frac{dB}{d\tau} + B^3 - H_e = H_m \sin(p\tau). \quad (3)$$

Следует отметить, что уравнение (3), в котором $H_e = 0$, привлекает исследователей своей обманчивой простотой, скрывая при этом глубокое внутреннее содержание, изучается на протяжении ряда лет, с целью установления критерия возникновения хаоса, однако сделано пока в этом направлении не очень много [1,2,3].

В натуральных и численных экспериментах хаос наблюдается в широком диапазоне значений параметров [1,2,3].

Создадим хаос, полагая, $H_e = 0.3$, $H_m = 5$, $p = 0.5$, $K = 0.005$,

$$h = \frac{m}{n} \cdot 2 \cdot \pi, n = 100000, m = 500, \tau = 1 \dots n)$$

и решим уравнение (3) в программе *MATHCAD*.

Результаты решения представлены на рис.3. Совмещены две системы координат V , H , и B , H_s , где V – напряжение на контуре. Эти фазовые портреты представлены точками отображения Пуанкаре, полученными в результате стробирования V , H , B с частотой второй гармоники генератора возбуждения (имитация синхронного детектирования применяемого в феррозондах). Индексы s при буквах на рисунке означают стробирование. В координатах V_s, H_s имеем бесформенное облако точек (хаос), В координатах B_s, H_s хаос прочерчивает инвариантную к нему кривую перемагничивания $B(H) = \sqrt[3]{H}$. Центр кривой перемагничивания смещен вправо на величину $H_e = 0.3$.

Таким образом, в данной ситуации, измерения, основанные на синхронном детектировании четных гармоник (второй), при действии на сердечник внешнего (измеряемого) магнитного поля ($H_e = 0.3$) становятся невозможными. То же можно сказать и о принципах измерений напряженности магнитного поля, основанных на расчетах временных интервалов перемагничивания сердечника, наблюдающихся в напряжении V [6].

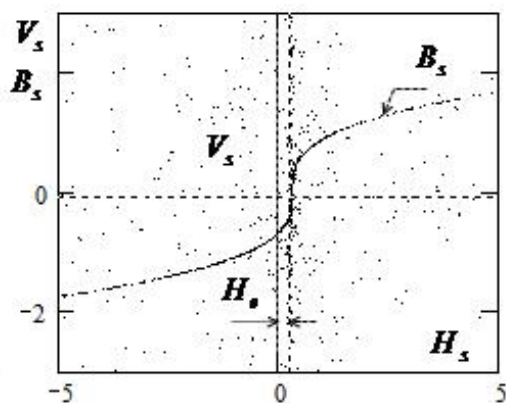


Рисунок 3. Графическое решение уравнения (3) в программе MATHCAD

Перейдем к рассмотрению возможной процедуры измерения. Отметим при этом, что магнитными модуляторами (впрочем, как и всеми модуляторами) измеряются магнитные поля в полосе частот несоизмеримо меньших частоты модуляции (возбуждения), поэтому для большего эффекта, убедительности и наглядности введем в контур сигнал с угловой модуляцией $H_e = 1 \cos(6 \tau + 6 \sin(0.7 \tau))$, полоса частот которого лежит в полосе частот детерминированного хаоса. Таким образом, верхняя граничная частота этого сигнала будет превышать частоту возбуждения модулятора приблизительно в 15 раз, что отражено на спектрограмме рис.4, полученной в результате Фурье анализа V при $m = 50$.

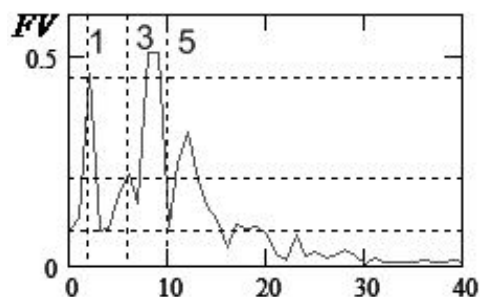


Рисунок 4. Спектрограмма сигнала модулятора

Сигнал H_e оказался полностью замаскирован хаосом. На хаотической спектрограмме FV (Фурье анализа V) (рис.4) видны экстремумы нечетных гармоник частоты возбуждения. Они обозначены цифрами. Цифра обозначает номер соответствующей гармоники. Согласно рис.4 частота первой гармоники на приведенной шкале частот равна 2.

Задача состоит в выделении из хаоса (измерении) сигнала H_e .

Как видно из уравнения (3), восстановить измеряемый сигнал H_e можно следующим образом.

Снять сигнал $V = \frac{dB}{d\tau}$ напряжения на контуре. Продифференцировать V (R, C цепочкой), получить сигнал $\frac{d^2B}{d\tau^2}$ (емкостной ток). Это же V проинтегрировать (R, C цепочкой), получить B , проделав масштабирование V (умножая его на K), получить

ток IK через резистор. Далее индукцию B возвести в куб. Сделать это можно двумя перемножителями, с учетом, что каждый из них имеет по два входа. Затем эти сигналы сложить с сигналом тока накачки I_p , предварительно осуществив фазировку и масштабирование всех сигналов и получить информационный сигнал H_e .

В приводимом рассмотрении для нахождения напряженности магнитного поля в нелинейной индуктивности (возведения в куб $B(t)$) использовались перемножители. Известно, что при отсутствии гистерезиса зависимость $H(B)$ в общем случае может быть представлена и более сложной функцией в виде полинома нечетной степени $H = aB + cB^3 + dB^5 + \dots$, это не меняет сути, но усложняет схему, так как теперь придется увеличить число перемножителей, соединяя их определенным образом, а также применить сумматор имеющий большее число масштабируемых входов. Если наиболее подходящей для сердечника окажется кусочно-линейная аппроксимация, то вместо перемножителей можно воспользоваться функцией $H(B)$, обратной ограничителю $B(H)$, в принципе ее также можно реализовать на аналоговых элементах, диодах и операционных усилителях.

Вернемся к схеме магнитометра (рис.2). Сигнал адекватный току через емкость, получается в результате дифференцирования устройством 3 напряжения на контуре, продифференцированное напряжение подается на вход сумматора 7. На остальные входы сумматора приходят: напряжение с контура и напряжение, проинтегрированное блоком 4 после возведения его в куб перемножителями 5 и 6, а так же сигнал тока возбуждения с генератора 2. Сигналы масштабируются, складываются, и на выходе сумматора 7 на экране осциллографа 8 получаем измеряемый сигнал H_e . Можно отметить, что схема по своей структуре не сложнее традиционного магнитометра на второй гармонике с синхронным ее детектированием перемножителем, содержащая избирательный усилитель, настроенный на вторую гармонику частоты возбуждения.

Заключение. Показано, что в магнитном модуляторе, может наблюдаться детерминированный хаос. В этой связи следует отметить, что в процедуре известных методов модуляции, сигнал содержащий информацию должен быть отражен в изменении одного из параметров несущей (частоты, амплитуды или фазы пропорционально). Пока о каком-либо виде модуляции и подобии на него при динамическом хаосе говорить не приходится. Можно лишь констатировать о модуляции как о совместном результате сложного воздействия на модулятор информационного и гармонического сигнала накачки, и феноменологически описать принцип извлечения информационного сигнала из хаоса (осуществление демодуляции). Алгоритм действует, как в хаотическом, так и в конвергентном режимах работы модулятора.

Оказалось, что для создания магнитометра достаточно знать лишь кривую перемагничивания $H(B)$. Задача не является неожиданной, для нелинейной динамики она, так же как и выбор модели, является ключевой. Для ее решения требуются соответствующие исследования с помощью натурального эксперимента. Желаемая кривая перемагничивания может быть получена путем применения сердечников из специальных материалов с учетом их геометрических размеров. Можно проверить на модели (3), что нестабильность кривой перемагничивания в некоторых пределах допустима и не приводит к резкому изменению погрешности измерения.

На фоне современных успехов в магнитометрии, уделяющей прежде всего внимание разработке новых чувствительных к магнитным полям элементов, на основе различных физических эффектов, отмечать их недостатки и преимущества будет не целесообразно. Каждый прибор используется по своему назначению. Укажем лишь в этой связи, что потенциально, прибор на основе предлагаемого решения, может характеризоваться

линейной передаточной характеристикой в большом динамическом диапазоне, широкополосностью и отсутствием фазовых искажений. Следовательно, может применяться, как универсальная магнитная антенна, а также для регистрации импульсных магнитных полей с широким спектром частот, включая постоянную составляющую.

Подчеркнем, что в рассмотрении речь не идет о замене феррозондов предлагаемым решением, а прежде всего о принципиальной возможности их работы в режиме динамического хаоса. Альтернативу на сегодняшний день феррозонду на второй гармонике по чувствительности могут составить лишь квантовые магнитометры. Однако следует обратить внимание на то, что стоило только записать уравнение феррозонда в общем виде, отражающем его суть во всем известном спектре явлений, как концептуальная процедура измерения замаскированная в прошлом деформированной моделью, стала очевидной. Нелинейное уравнение феррозонда оказалось простым с виду, совсем не абстрактным, тем не менее, не поддающимся детальному разбору. Последнего удалось избежать, и обратить модель непосредственно в русло практического применения, не смотря на то, что детали и природа хаоса оказались так до конца и не выясненными.

Так как система (3) неинтегрируемая, и расчеты ее гармоник могут быть проведены приближенно разработанными для этих целей методами [5], то не исключено, что одновременно с регулярными наблюдаемыми траекториями, под ними находятся неразличимые, по результатам численного спектрального анализа Фурье, хаотические траектории. Гармоники не чистые, спектральные линии имеют всегда конечную ширину, существует дисперсия амплитуды, частоты и фазы гармоник. В таком случае (для этого в схеме не нужны никакие источники шумов), подобные артефакты приведут к нестабильности и дрейфу нуля приборов, основанных на детектировании гармоник. Явление, имеющее место в феррозонде на второй гармонике, отмечалось и изучалось многими авторами и приписывалось не без оснований некогерентному поведению магнитных доменов ферромагнитного материала при его переманчивании периодическим магнитным полем, иначе говоря, магнитному шуму. Не исключено, что некорректная настройка феррозонда, может привести к появлению в нем динамического хаоса, имитирующего те же явления.

Список литературы

- [1] Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. – М.: Наука, 1987.
- [2] Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
- [3] Семенов Н. М., Яковлев Н. И. Цифровые феррозондовые магнитометры. – Л.: Энергия, 1978.
- [4] Мун Ф. Хаотические колебания. – М.: Мир, 1990
- [5] Короткий В.П. Измерительный преобразователь в режиме динамического хаоса. – Измерительная техника, 2001, №11.
- [6] Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. – М.: Мир, 1968.
- [7] Горяченко В.Д. Элементы теории колебаний. – М.: Высшая школа, 2001.

Авторский вклад

Ильин Виктор Николаевич – руководство исследованием по разработке схемы и модели ферромодуляционного магнитометра, проведение расчетов в программе MATHCAD, построение по полученным результатам графиков.

Баранов Валентин Владимирович – постановка задачи исследования, описание работы модулятора, сравнение с другими опубликованными материалами, анализ полученных результатов расчетов.

Дударева Ольга Викторовна – участие в разработке модели модулятора, анализ литературных источников, оценка технических возможностей при практической реализации модулятора.

SIMULATION OF A BROADBAND FERROMODULATING MAGNETOMETER INDIFFERENT TO CHAOTIC EXCITATION OF A SENSING ELEMENT

V.N. Ilyin

*Head of the Laboratory
of Stepanov Institute of Physics
of the National Academy of
Sciences,
Doctor of Technical Sciences*

V.V. Baranov

*Professor of the Belarusian State
University of Informatics and
Radioelectronics, Doctor
of Technical Sciences, Professor*

O.V. Dudareva

*Assistant Professor of the
Belarusian State University of
Informatics and Radioelectronics,
Magister of Science*

Abstract. *An analysis of the possibilities of implementation and modeling of a broadband ferromodulation magnetometer, indifferent to the chaotic excitation of a sensing element, is carried out. A scheme of a modulator of signals transmitted to the information transmission channel is proposed. The MATHCAD program was used to perform the calculations, and as a result of the Fourier analysis of the voltage on the circuit, a spectrogram of the modulator signal was obtained. It is shown that the device based on the proposed modulator circuit is characterized by a linear transfer response in a wide dynamic range, wideband and the absence of phase distortions.*

Keywords. *Ferromodulation magnetometer, stable to dynamic chaos, modulator circuit and model, fluxgate, instability factors:*