

К. т. н. В. П. КОРОТКИЙ, д. т. н. В. Н. ИЛЬИН

УДК 621.317.7+389.1 (075.8)

Беларусь, г. Минск, Институт физики им. Б. И. Степанова НАНБ
E-mail: ifanbel@ifanbel.bas-net.byДата поступления в редакцию
07.07 2011 г.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ИНДИФФЕРЕНТНЫЙ К ХАОТИЧЕСКОМУ ВОЗБУЖДЕНИЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Предлагается схема преобразователя, не чувствительная к возникновению в ней динамического хаоса, с широкой полосой пропускания и линейной передаточной характеристикой.

Динамический хаос — распространенное, но малоизученное явление, характерное для нелинейных колебательных систем и контуров. Оно может проявляться в виде временных реализаций, напоминающих шум, при численных решениях нелинейных дифференциальных уравнений, являющихся моделями (приближениями) реальных устройств. Характер хаоса и все возможные режимы, в том числе и периодические, зависят не только от параметров модели, но и от начальных условий. Критерий возникновения динамического хаоса пока не выяснен [1].

В измерительных технологиях детерминированный хаос может представлять интерес в связи с применением активных датчиков (первичных преобразователей) в виде нелинейных колебательных контуров, активированных источниками возбуждения. На вопрос, что является исключением — упрощенные процессы, происходящие в контуре, или динамический хаос — нельзя ответить однозначно, потому что хаотических режимов в контуре бесконечно много, о чем свидетельствуют численные и натурные эксперименты [1—3]. Применение параметрического подхода (разработанного скорее для пояснения, чем для анализа принципов работы преобразователей, работающих в сугубо нелинейном режиме) для ответа на этот вопрос бессмысленно, т. к. он априори предполагает периодическое изменение параметра, а значит отсутствие хаоса.

Таким образом, уверенность в том, что параметр изменяется нужным образом и периодически, может быть обоснованной только в результате практических испытаний. Но и в этом случае необходимо знать наверняка, что датчик не работает на грани хаоса, а выбранный режим оптимален. Определению достоверных интервалов изменения параметров датчика может поспособствовать лишь его адекватная математическая модель или хотя бы информация о самом факте возможности возникновения хаоса. Как известно, шум ограничивает точность измерений, а появление хаоса может привести к невозможности их проведения.

Проблема, которая существовала всегда, но не принималась во внимание, характерна не только для датчиков в виде контуров, но и для всех сооружений, аппаратов и систем, в которых неучет интервалов изменения параметров, их совокупности и подверженности всевозможным внешним воздействиям может привести к хаосу (катастрофе). Приводимый в статье анализ, хотя и является частным решением задачи обеспечения устойчивости системы к динамическому хаосу, может быть обобщен с учетом того, что нелинейных систем и явлений значительно больше, чем моделей, их описывающих. Под обеспечением устойчивости в данном случае понимаются не меры по предотвращению возможности возникновения хаоса, а работоспособность конструкции или схемы в условиях его возникновения или существования.

В настоящей статье на примере магнитомодуляционного преобразователя показана принципиальная возможность осуществлять измерения преобразователем, который характеризуется динамическим хаосом, и разработана его модель, индифферентная ко всем возникающим и существующим в нем режимам.

Среди известных магнитомодуляционных преобразователей самым простым по исполнению является одноэлементный феррозонд [4], представляющий собой ферромагнитный сердечник (чувствительный элемент), охваченный обмотками. На одну обмотку подается гармонический ток, который периодически перемагничивает сердечник своим магнитным полем, превосходящим по величине поле насыщения сердечника. С другой обмотки снимается напряжение, по которому и судят о величине измеряемого поля.

Несмотря на простое устройство феррозонда, динамика его работы достаточно сложна для понимания и расчетов. Причиной тому являются неизбежно присутствующие емкости, шунтирующие как обмотку, с которой снимают сигнал, так и обмотку возбуждения. Емкости могут вводиться и специально для получения параметрического усиления. Как отмечается в [4, с. 65], применять феррозонд следует с осторожностью, поскольку феррорезонансная цепь возбуждения может стать источником появления ложного сигнала. Поэтому феррорезонансный режим требует тщательной проверки и устранения подобных негативных явлений. Это приводит к необходимости

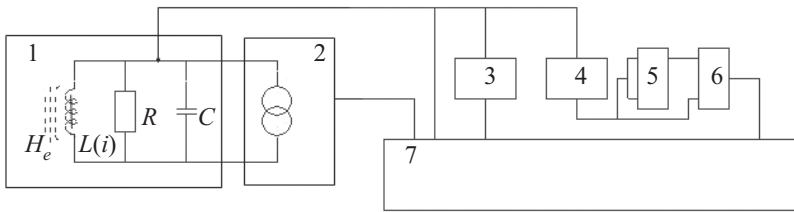


Рис. 1. Блок-схема модели феррозонда (магнитометра):

1 — сигнальная обмотка; 2 — генератор возбуждения; 3 — устройство дифференцирования; 4 — устройство интегрирования; 5, 6 — перемножители; 7 — сумматор

уточнения модели феррозонда. Будем считать, что для этого достаточно представить феррозонд нелинейным колебательным контуром с внешним возбуждением.

Блок-схема модели феррозонда представлена на **рис. 1**. Сигнальной обмоткой служит обмотка возбуждения с элементами $L(i)$, R , C , соединенными параллельно (блок 1). Параллельно этим элементам подключен генератор возбуждения 2 в виде источника тока $i(t)$. Измеряется магнитное поле с напряженностью H_e .

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;

R — эквивалентное сопротивление контура.

Введем обозначения:

$$\Phi_0 = I_0 L_0; \quad \frac{\Phi}{\Phi_0} = B; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{L_0 C}; \quad \tau = \omega_0 t; \quad p = \frac{\omega}{\omega_0};$$

$$K = \frac{1}{R} \sqrt{L_0 \frac{1}{C}} = \frac{1}{RC\omega_0};$$

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

где L_0 — значение индуктивности на линейном участке;

I_0 — ток, проходящий при этом через катушку;

ω_0 — резонансная частота.

Уравнение контура запишем в безразмерном виде:

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

В уравнение для его решения необходимо подставить характеристику перемагничивания. В общем случае такую характеристику для магнитного сердечника можно записать в виде полинома нечетной степени. Для нашего случая ограничимся самой простой зависимостью $H=B^3$ [3—5]. Учитывая, что в катушке индуктивности присутствует внешнее измеряемое поле (с напряженностью H_e) и поле, которое создается в сердечнике током, протекающим в обмотке (с напряженностью H_L), получим $H=H_L+H_e$. Тогда (2) окончательно запишем 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 в случае, когда $H_e=0$, с виду простое уравнение (3) изучается на протяжении ряда лет с целью установления критерия возникновения хаоса, однако пока безрезультатно [1, 2].

В натурных и численных экспериментах хаос наблюдается в широком диапазоне значений параметров [1—3]. Решим уравнение (3) в программе MATHCAD, полагая параметры хаоса, например, следующими:

$$H_e=0, \quad H_m=12, \quad p=1, \quad K=0,005, \quad h=2\pi m/n, \\ n=500000, \quad m=100, \quad \tau=1 \dots n.$$

Результат Фурье-анализа (FV) напряжения на контуре $V=dB/d\tau$ представлен на **рис. 2**.

На хаотической спектрограмме (рис. 2, а) видны линии нечетных гармоник частоты возбуждения (1, 3, 5). Частота гармоник находится в определенных фазовых соотношениях с частотой генератора. Отметим, что Фурье-спектр FI_C емкостного тока $I_C=d^2B/d\tau^2$ визуалью неотличим от спектра тока I за исключением первой гармоники. Фурье-анализ в программе MATHCAD показал, что соотношение амплитуд первых гармоник тока I и тока I_C составляет приблизительно 13:1.

Таким образом, ток возбуждения частотой первой гармоники в основном проходит через катушку индуктивности, обеспечивая тем самым эффективное ее перемагничивание. Во всем остальном спектры тока через конденсатор и катушку индуктивности визу-

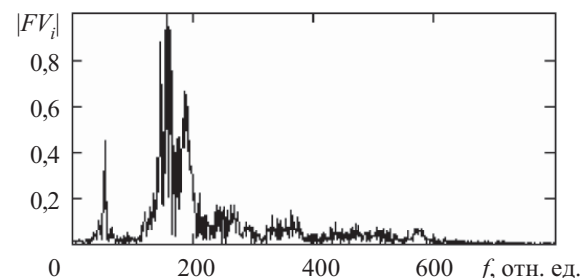
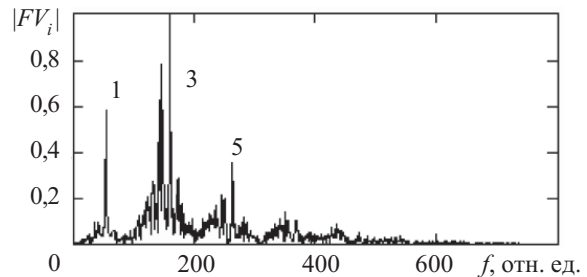


Рис. 2. Спектр напряжения в контуре в отсутствие внешнего магнитного поля (а) и при действии информационного сигнала с угловой модуляцией (б)

ально неразличимы, что позволяет говорить о резонансе хаоса.

Подадим в контур сигнал, спектр которого был бы соизмерим со спектром хаоса в контуре. Это обусловило подбор сигнала с угловой модуляцией, полосу частот которого лежит в полосе частот детерминированного хаоса. Проведя Фурье-анализ напряжения V , получим спектр FV , изображенный на рис. 2, б. Сигнал H_e оказался полностью замаскирован хаосом, Фурье-спектр более размыт, чем на рис. 2, а. Задача состоит в выделении из хаоса (т. е. измерении) сигнала H_e .

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

Измерить напряжение на контуре $V = dB/dt$. Продифференцировать его (RC-цепочкой), получить сигнал d^2B/dt^2 (емкостной ток). Это же значение V проинтегрировать (RC-цепочкой), получить B , проделав масштабирование V (т. е. умножив V на коэффициент затухания контура K), получить ток через резистор (VK). Далее значение индукции B возвести в куб. Сделать это можно с помощью двух перемножителей с учетом того, что каждый из них имеет по два входа. Затем эти сигналы сложить с сигналом тока возбуждения I_p , предварительно осуществив фазировку и масштабирование всех сигналов, и получить информационный сигнал H_e .

В приводимом примере для нахождения напряженности $H(t)$ магнитного поля в нелинейной катушке индуктивности (по зависимости $H=B^3$) использовали перемножители (5, 6 на рис. 1). Известно, что в отсутствие 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 метода, но усложняет схему, т. к. в этом случае придется увеличить число перемножителей, соединяя их определенным образом, а также применить сумматор, имеющий большее число масштабируемых входов.

В магнитометре, схема которого приведена на рис. 1, сигнал, аналогичный току через конденсатор, получается в результате дифференцирования устройством 3 напряжения на контуре, продифференциро-

ванное напряжение подается на вход сумматора 7. На остальные входы сумматора поступают: напряжение с контура и напряжение, проинтегрированное блоком 4 после возведения его в куб перемножителями 5 и 6, а также сигнал тока возбуждения с генератора 2. Сигналы масштабируются, складываются, и на выход сумматора 7 поступает измеряемый сигнал H_e , изображенный на рис. 3. Следует отметить, что схема по своей структуре напоминает схему магнитометра на феррозонде с синхронным детектированием второй гармоники частоты тока возбуждения, амплитуда которой изменяется в соответствии с измеряемым полем.

Выводы

Таким образом, доказана возможность работы измерительных преобразователей, основанных на существенно нелинейных эффектах, в режиме динамического хаоса.

Показано, что при работе магнитного модулятора как в режиме молчания, так и в режиме воздействия информационного сигнала, может наблюдаться детерминированный хаос. Модуляция рассматривается как совместный результат сложного воздействия на модулятор информационного сигнала и гармонического сигнала возбуждения.

Преимущества предлагаемого решения в том, что преобразователь не предъявляет требований к стабильности генератора возбуждения, обладает линейной передаточной характеристикой и широкой полосой пропускания, которая не ограничивается резонансными явлениями в контуре датчика.

Для создания магнитометра достаточно знать лишь кривую перемагничивания и решать при этом основную задачу — определение свойств нелинейной среды (материала датчика), которая является ключевой. Нужная кривая перемагничивания может быть получена в результате применения сердечника из специальных материалов с учетом его геометрических размеров. При этом нестабильность кривой перемагничивания в некоторых пределах допустима и не приводит к резкому изменению погрешности измерения.

Преобразователь может найти применение в качестве магнитной антенны для приема магнитной составляющей электромагнитного поля в радиочастотном диапазоне, анализаторах спектра магнитных шумов, для определения формы магнитных импульсов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мун Ф. Хаотические колебания. — М.: Мир, 1990. [Mun F. Khaoticheskie kolebaniya. M. Mir. 1990]
2. Кузнецов С. П. Динамический хаос. — М.: Наука, 2000. [Kuznetsov S. P. Dinamicheskii kaos. M. Nauk. 2000]
3. Короткий В. П. Детерминированный хаос в модели колебательного контура с нелинейной индуктивностью // Нелинейный мир. — 2010. — № 12. — С. 758—763 [Kortkii V. P. // Nelineinyi mir. 2010. № 12. P. 578]
4. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. [Afanas'ev Yu. V. Ferrozondovye pribory. L. Energoatomizdat. 1986]

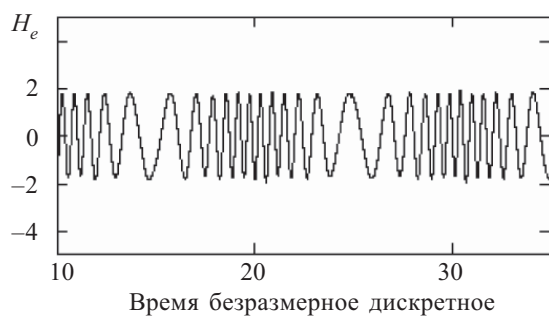


Рис. 3. Измеряемый сигнал