

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.by

Дата 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 доверительных интервалов изменения параметров датчика может поспособствовать лишь его адекватная математическая модель или хотя бы информация о самом факте возникновения 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

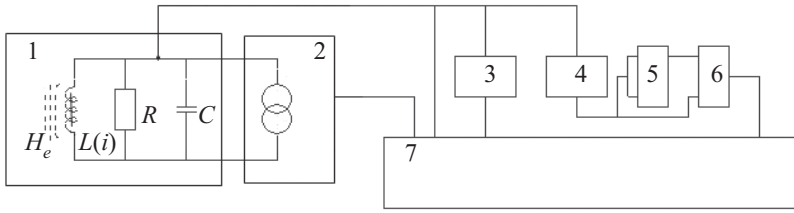


Рис. 1. Блок-схема модели феррозонда (магнитометра):  
 1 — сигнальная обмотка; 2 — генератор возбуждения; 3 — устройство дифференцирования; 4 — устройство интегрирования; 5, 6 — перемножители; 7 — сумматор

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;

$\phi$  — 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;

$\omega_0$  — 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 перемангничивания. 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 натуральных 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  $V=dB/dt$  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  $F I_C$  емкостного тока  $I_C=d^2B/d\tau^2$  визуально 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 перемангничивание. Во всем остальном спектры тока через конденсатор и катушку индуктивности визу-

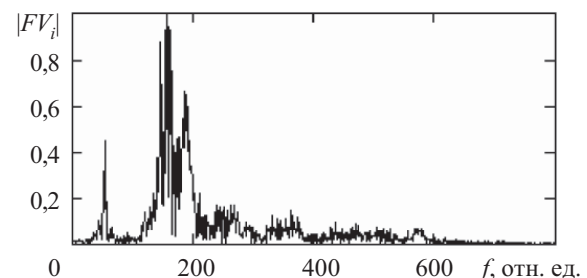
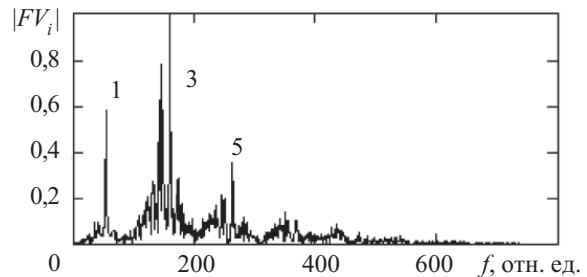


Рис. 2. Спектр напряжения в контуре в отсутствие внешнего магнитного поля (а) и при действии информационного сигнала с угловой модуляцией (б)

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-

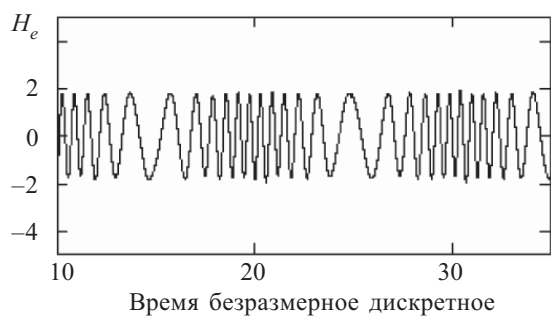


Рис. 3. Измеряемый сигнал

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]