

Интерференционная чувствительность бистабильных систем к подпороговым сигналам

Г. М. Драбкин

Хан-Мейтнер институт, 14109 Берлин, Германия,

Петербургский институт ядерной физики РАН, 188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия

Поступила в редакцию 25 апреля 2002 г.

После переработки 3 июня 2002 г.

Предложен новый подход к изучению влияния интенсивных шумов на чувствительность бистабильных систем к регистрации подпороговых сигналов. Показано, что интерференционное взаимодействие двух одинаковых бистабильных систем, когерентно возбужденных одним и тем же надпороговым шумом, может увеличить чувствительность к регистрации подпороговых сигналов в сотни раз.

PACS: 75.60–d

Если два метастабильных состояния нелинейной системы разделены энергетическим барьером, то такие бистабильные системы обычно не чувствительны к сигналам, амплитуда которых ниже этого барьера. Иная ситуация может наблюдаться в возбужденных бистабильных системах, то есть в условиях, когда под действием надпороговых сигналов происходят непрерывные переходы между метастабильными состояниями. Так, в случае стохастического резонанса [1, 2] в результате совместного действия надпорогового возбуждающего шума определенной интенсивности и периодического подпорогового сигнала средняя частота переходов оказывается зависящей от частоты и амплитуды подпорогового сигнала. При дальнейшем увеличении амплитуды возбуждающего шума эффект исчезает. В этом случае частота пересечений барьера уже определяется только спектром возбуждающих надпороговых сигналов и не зависит от наличия подпороговых сигналов. Если длительность таких сигналов надпорогового возбуждения много больше постоянной времени перехода между метастабильными состояниями, то длительность выходного сигнала перехода будет много меньше периода возбуждающих сигналов, а расстояние между соседними сигналами отклика будет много больше их длительности. В этом случае открываются новые возможности изучения динамики возбужденных систем. В настоящей работе предлагается изучать не среднюю частоту пересечений барьера, а динамические особенности отдельных пересечений этого барьера: момент времени пересечения и его длительность.

В эксперименте переходы между состояниями моделировались процессами перемагничивания ферро-

магнетика с квазипрямоугольной петлей гистерезиса. В этом случае барьером перехода между состояниями намагниченности $(+B_s)$ и $(-B_s)$ является коэрцитивная сила H_c . В эксперименте использовалась фольга толщиной 20 мк состава $\text{Co}_{66}\text{Si}_{16}\text{B}_{12}\text{Fe}_4\text{Mo}_2$. Параметры петли гистерезиса были следующими: $B_s = 0.55$ Тл, $H_c \approx 1$ А/м, $\Delta H_c \approx 0.3 H_c$. Фольга была свернута в виде замкнутого кольца и помещалась внутри торроидального соленоида. Входные сигналы задавались магнитным полем соленоида. Переходы между состояниями $(+B_s)$ и $(-B_s)$, то есть пересечения барьера H_c , фиксировались ЭДС индукции измерительной катушки. Витки катушки охватывали сечение фольги.

Амплитуды надпороговых сигналов возбуждения $H_b^0 \approx 6H_c$. Амплитуды подпороговых сигналов $H_p^0 \leq 0.4 H_c$. Частотный диапазон используемых сигналов (30–140) Гц. За время одного периода возбуждающего сигнала $H_b = H_b^0 \sin \omega_0 t$ происходят два пересечения барьера: $(+H_c)$ и $(-H_c)$. Сигналы откликов этих переходов отличаются только знаками. Поэтому достаточно рассмотреть только одну ветвь переходов (например, переходы через $(+H_c)$). Так как $\Delta H_c < H_c \ll H_b^0$, то в первом приближении можно считать, что под действием надпороговых сигналов $H_b = H_b^0 \sin \omega_0 t$ пересечение барьера H_c происходит в момент времени

$$t_c^0 \approx H_c / \omega_0 H_b^0, \quad (1)$$

а длительность пересечения барьера

$$\Delta t_c^0 \approx \Delta H_c / H_0 \omega_0. \quad (2)$$

Если же дополнительно к сигналам возбуждения H_b подключить подпороговые сигналы $H_p = H_p^0 \sin(\omega t +$

+ φ_n) ($\omega \leq \omega_0$), то момент t_c^n пересечения барьера H_c определится из соотношения

$$t_c^n \approx \frac{H_c - H_p^0 \sin \varphi_n}{H_0 \omega_0} \left(1 - \frac{H_p \omega}{H_b^0 \omega_0} \cos \varphi_n \right), \quad (3)$$

а длительность пересечения барьера Δt_c^n определяется соотношением

$$\Delta t_c^n \approx \Delta t_c^0 \left[1 - \frac{H_p \omega}{H_0 \omega_0} \left(\cos \varphi_n - \frac{\omega H_c}{\omega_0 H_0} \sin \varphi_n \right) \right], \quad (4)$$

где φ_n – фаза подпорогового сигнала в момент, когда фаза надпорогового сигнала возбуждения равна нулю. От этой нулевой фазы и идет отсчет момента времени пересечения барьера.

Так как фазы подпороговых сигналов φ_n не скоррелированы с фазами сигналов надпорогового возбуждения, то из формул (1) и (4) следует, что за время усреднения, большее, чем $1/(\omega_0 - \omega)$, $\langle \Delta t_c^n \rangle = \langle \Delta t_c^0 \rangle$. Таким образом, в условиях сильных возбуждений не только средняя частота пересечений барьера, но и среднее время самих пересечений не зависит от наличия подпороговых сигналов.

Что же касается влияния подпороговых сигналов на момент времени пересечения барьера, то физический смысл имеет величина $St = (t_c^n - t_c^0)/\Delta t_c^0$, то есть относительное смещение. Из формул (1)–(4) следует, что

$$St = \frac{t_c^n - t_c^0}{\Delta t_c^0} = \frac{H_p^0}{\Delta H_c} \left\{ \sin \varphi_n + \cos \varphi_n \left[\frac{\omega}{\omega_0 H_0} (H_c - H_p \sin \sigma) \right] \right\}. \quad (5)$$

Для определения St была создана интерферометрическая установка, которая состояла из генераторов сигналов, двух (A и B) идентичных устройств перемагничивания фольги, вычитающего устройства и вольтметра среднеквадратичных значений. Если на входы устройств A и B когерентно подать одинаковые надпороговые возбуждающие сигналы, то выходные сигналы от A и B одновременно поступят на вычитающее устройство и взаимно погасятся. Если же дополнительно к этим когерентным сигналам возбуждения на вход одного из устройств, например A , подать дополнительный подпороговый сигнал, то выходные сигналы от A поступят на вычитающее устройство со смещением $(t_c^n - t_c^0)$ относительно соответствующего сигнала от B . В результате на выходе вычитающего устройства появится разностный сигнал. Величина этого сигнала и его знак зависят от фазы подпорогового сигнала и ветви пересечения барьера ($+H_c$ или $-H_c$). Если эти разностные

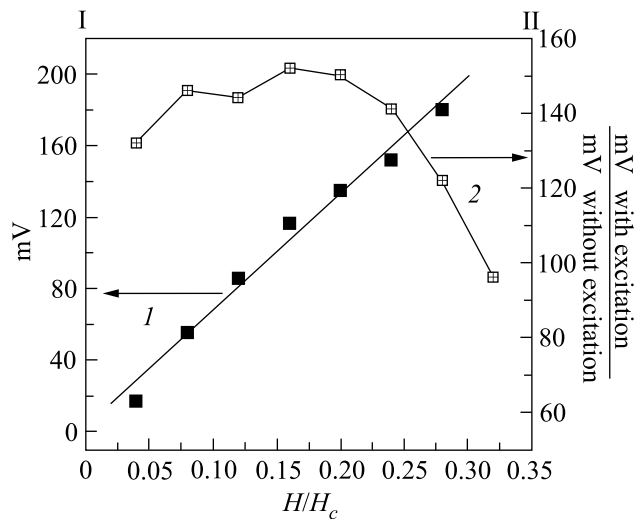
сигналы измеряются вольтметром среднеквадратичных значений со временем усреднения, большим, чем $1/(\omega_0 - \omega)$, то, за исключением точек резонанса (возникновение когерентности между подпороговыми и возбуждающими сигналами), показания вольтметра будут пропорциональны

$$\frac{H_p^0}{\Delta H_c} f \left(\frac{\omega}{\omega_0}, \frac{H_p}{H_0}, \frac{H_c}{H_0} \right),$$

где $f(\omega/\omega_0, H_p/H_0, H_c/H_0)$ – величина порядка единицы и практически не зависит от ω/ω_0 , H_p/H_0 , H_c/H_0 .

Преимущество предлагаемого метода обнаружения подпороговых сигналов наиболее отчетливо проявляется при работе с шумовыми сигналами. Основные характеристики при этом остаются практически неизменными при замене синусоидальных сигналов возбуждения на шумовые сигналы возбуждения, а также при регистрации подпороговых шумов.

На рисунке представлены результаты измерений для случая когерентного возбуждения A и B одним



и тем же цветным шумом (30–130) Гц с эффективной интенсивностью $6H_c$. На входе устройств A и B дополнительно к сигналам шумового возбуждения подаются подпороговые цветные шумы (30–130) Гц. Эффективная интенсивность этих шумов в единицах H_c отложена на оси абсцисс.

Подпороговые шумы, которые поступают на входы A и B , между собой не скоррелированы. Они также не скоррелированы и с шумами надпорогового возбуждения (три разных генератора шумов).

На ординате I – показания вольтметра с выхода вычитающего устройства, когда A и B когерентно возбуждаются надпороговым шумом, и дополнительно к этому на входы A и B подаются нескоррелированные между собой подпороговые шумы. Кривая 2

(ордината II) – эти же показания вольтметра, отнесенные к показаниям вольтметра для случая, когда остаются только сигналы подпорогового шума, а сигналы когерентного возбуждения отключены.

Для сравнения предлагаемого подхода с традиционным стохастическим резонансом рассмотрим результаты измерений только с одним из перемещающих устройств – устройством А. В этом случае добавление возбуждающего шума не приводит к сколь-либо заметному усилению отклика на подпороговые шумовые сигналы. Эффект усиления удается обнаружить только для синусоидальных подпороговых сигналов и только в том случае, если измеряется не среднеквадратичное значение выходного сигнала, а компонента спектра этого сигнала на частоте входного подпорогового сигнала. При этом вольтметр среднеквадратичных значений был заменен на спектроанализатор типа НР3632А. Оптимальная амплитуда возбуждающего шума $(0.6 - 0.8)H_c$. Частота входного подпорогового сигнала 73 Гц. До амплитуд подпороговых сигналов $0.2 H_c$ усиление равно 5.

Из сравнения этих данных с данными рисунка (кривая 2) следует, что чувствительность интерфе-

ренционной схемы в 10 раз выше обычной. Однако наиболее важным преимуществом интерференционной схемы является то обстоятельство, что в условиях интенсивного внешнего шума сочетание двух идентичных бистабильных систем позволяет в десятки – сотни раз увеличить чувствительность этих систем к регистрации слабых нескоррелированных шумов. Немаловажным преимуществом следует считать и то, что при этом достаточно ограничиться измерением только среднеквадратичных значений выходных сигналов.

Эти обстоятельства представляются весьма существенными при анализе работы нейронов в условиях шума.

В заключение выражаю благодарность профессору Ф. Мезею за интерес к работе и обсуждения, а также Б. Немашку, Н. Бойлю, И. Лазебнику и В. Хавронику за содействие в эксперименте.

-
1. В. С. Анищенко, А. Б. Нейман, Ф. Мосс, Л. Шиманский-Гайер, УФН **169**, 7 (1999).
 2. Ю. Л. Климонтович, УФН **169**, 39 (1999).