

УДК 621.317.444

ИССЛЕДОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МОСТОВЫХ СЕНСОРНЫХ МОДУЛЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ НА БАЗЕ АМР-ЭФФЕКТА

А. В. ВОРОБЬЕВ¹, Г. А. ИВАНОВА², Э. А. КИЛЬМЕТОВ³

¹cpu8bit@yandex.ru, ²ivanova_ga@inbox.ru, ³kilmetovea@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 22.04.2013

Аннотация. Исследуются анизотропные магниторезистивные сенсоры и сенсорные модули, а также предлагаются, анализируются и моделируются схемотехнические и конструкторские решения, обеспечивающие их эффективную работу (в плане метрологических характеристик). Предлагается математическая модель анизотропного магниторезистивного сенсорного модуля.

Ключевые слова: АМР-датчик; датчик магнитного поля; магнитометрическая ИИС

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что современная промышленность располагает достаточно широким рядом информационно-измерительных систем (ИИС), построенных на базе различных магниторезистивных эффектов. Как следствие, с той или иной точностью обеспечивается регистрация параметров магнитных полей в некотором амплитудно-частотном диапазоне. С другой стороны очевидно, что одним из перспективных и эффективных типов магниторезистивных преобразователей на сегодняшний день являются элементы, в основе действия которых лежит так называемый анизотропный магниторезистивный (АМР) эффект.

Хотя о существовании АМР-эффекта известно достаточно давно, серийное производство датчиков на его основе, с характеристиками сопоставимыми, а в некоторых случаях превосходящими феррозондовые преобразователи освоено промышленностью не далее, как в последнее десятилетие (корпорации *Honeywell*, *NXP Semiconductors* и др.).

По этой и ряду иных причин на сегодняшний день имеется лишь ряд разрозненной информации (преимущественно англоязычной), количественно характеризующей технико-метрологические показатели АМР-сенсора конкретной модели или серии. Наличие же специализированной технической литературы и единой теории по данной тематике не обнаружено.

Очевидно, что такое положение дел существенно затрудняет специалистам в области измерительной аппаратуры процесс разработки информационно-измерительных систем, построенных на базе АМР-элементов.

Целью настоящей статьи является анализ и систематизация знаний и опыта, относящихся к конструированию АМР-сенсорных модулей, а также ИИС и геоинформационных систем, построенных на их основе.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОСТОВОГО АМР-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Из опубликованных работ [1, 2] известно, что в случае отдельно взятого АМР-элемента, приложенное к нему внешнее (исследуемое) магнитное поле H поворачивает вектор намагниченности тонкой магнитной пленки на угол β . Значение β зависит от направления и величины H , при этом сопротивление пермаллоевой пленки оценивается согласно выражению (1), при условии, что $H \ll H_0$, где H_0 – подмагничивающее поле

$$R = R_{B=0} + \Delta R \left(1 - \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 \right) = R_{B=0} + \Delta R \cdot \cos^2 \beta, \quad (1)$$

где $R_{B=0}$ – сопротивление пермаллоевой пленки вне действия магнитного поля; ΔR – максимально возможное изменение сопротивления ($R_{B=0} = 3,8 - 4,2 \%$); $\sin \beta = H / H_0$.

Из выражения (1) легко заметить, что сопротивление АМР-элемента квадратично зависит от слагаемого (H/H_0) при $H_0 = \text{const}$. Такая квадратичная зависимость отдаляет выходную характеристику сенсора от желаемого линейного вида. В значительной мере лианеризовать выходную характеристику АМР-элемента возможно путем задания так называемой «засубренной» (в оригинале от англ. *barber-pole*) структуры, схематически представленной на рис. 1.



Рис. 1. Структура типа «barber-pole» единичного АМР-элемента

В этом случае сопротивление АМР-сенсора будет определяться соотношением

$$R = R_{B=0} + \Delta R_{\max} \cos^2(\beta + 45^\circ), \quad (2)$$

где угол 45° соответствует углу наклона пермаллоевых и немагнитных полосок относительно общей ориентации АМР-элемента в пространстве.

Таким образом, учитывая, что

$$\cos(\beta + 45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2} (\cos \beta - \sin \beta),$$

можем записать:

$$R = R_{B=0} \pm \Delta R_{\max} \frac{H}{H_0} \sqrt{1 - \left(\frac{H}{H_0}\right)^2}. \quad (3)$$

Знак « \pm » в выражении (3) соответствует одной из возможных ориентаций немагнитных перемычек, т.е. их наклон либо слева направо, либо справа налево (рис. 1).

В случае, когда $H \ll H_0$ выражение (3) допустимо переписать в виде:

$$R \approx R_{H=0} \pm \Delta R_{\max} \frac{H}{H_0}. \quad (4)$$

Очевидно, что функциональная зависимость (3) имеет более предпочтительный квазилинейный характер (4), по сравнению с выражением (1).

Рассмотрим соединение единичных АМР-элементов (рис. 2) по принципу полностью дифференциального измерительного моста. Физически данная структура представляет собой четыре эквивалентных «barber-pole» АМР-элемента, сформированных путем осаждения тонкого слоя пермаллоя на подложку в форме квадрата, соединенных по схеме, представляющей из себя плечи измерительного моста (рис. 2).

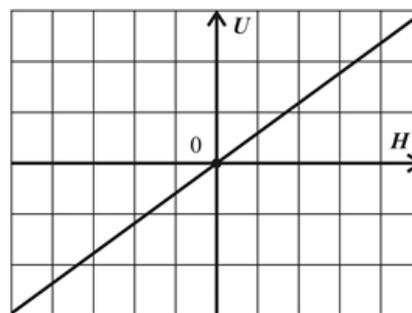
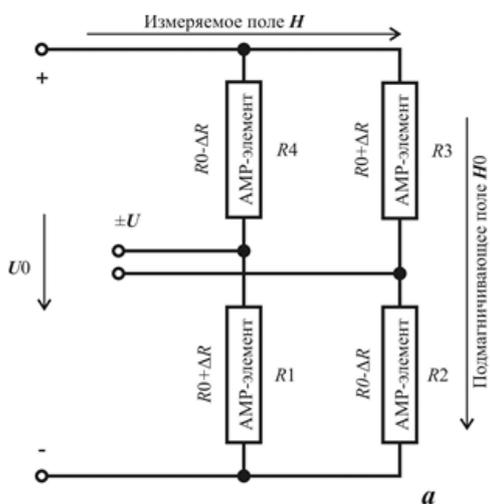


Рис. 2. Мостовая схема соединения АМР-элементов (а) и ее тесла-вольтовая характеристика (б)

Напряжение, снимаемое с измерительной диагонали моста, будет определяться в соответствии с выражением (5)

$$U = \left(\frac{R1}{R1 + R4} - \frac{R2}{R2 + R4} \right) U_0, \quad (5)$$

где U – напряжение, снимаемое с измерительной диагонали моста; $R1, R2, R3, R4$ – сопротивление плеч измерительного моста (рис. 2); U_0 – напряжение питания моста.

Допуская, что все АМР-элементы, входящие в состав измерительного моста, физически эквиваленты между собой, выражение (5), учитывая выражение (3) и (4), можно переписать в виде выражения (6)

$$U(H) = 2U_0 \Delta R_{\max} \left(\frac{H}{H_0} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{H}{H_0} \right)^2} \approx \approx 2U_0 \Delta R_{\max} \left(\frac{H}{H_0} \right). \quad (6)$$

Из выражения (6) очевидно, что напряжение на выходе мостового АМР-сенсора, построенного в соответствии со структурой, приведенной на рис. 2, а квазилинейно по своей природе

и прямо пропорционально зависит от напряжения питания моста и чувствительно к знаку поля (рис. 2, б). Таким образом, выражение (6) представляет собой универсальную модель мостового АМР-сенсора, учитывающую основные процессы, протекающие в «barber-pole» тонких магнитных пленках, имеющую при этом лаконичную форму записи, а потому удобную при инженерно-технических расчетах.

СТРУКТУРА МАГНИТНЫХ АМР-СЕНСОРНЫХ МОДУЛЕЙ

На рис. 3 представлена структура прецизионного АМР-сенсорного модуля. Использование в ее составе элемента подмагничивания в виде плоской катушки индуктивности (рис. 3, позиция 4), согласно [3], способствует повышению чувствительности мостового АМР-преобразователя, а также согласно выражениям (3), (6) – линейризации выходного сигнала. При этом увеличивается разрешение и точность АМР-сенсорного модуля.

Устройство вертикального смещения информационного отклика магнитного сенсорного модуля (рис. 3, позиция 2), в свою очередь предназначено для нейтрализации начального поля смещения и компенсации постоянной составляющей магнитных помех.

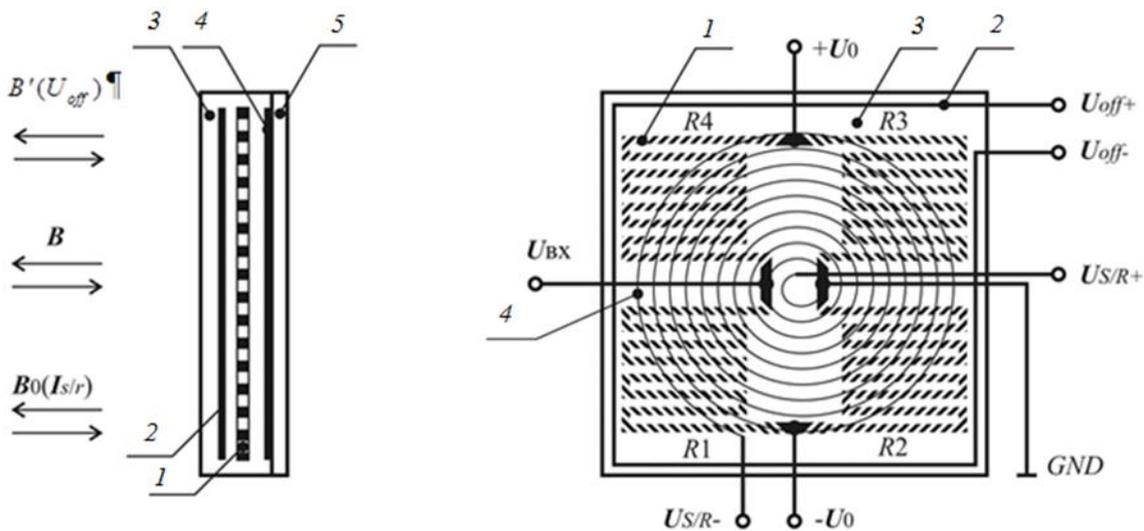


Рис. 3. Структура АМР-сенсорного модуля:

- 1 – тонкопленочный магнито-резистивный измерительный преобразователь (АМР-преобразователь);
- 2 – устройство вертикального смещения информационного отклика магнитного сенсорного модуля;
- 3 – слой немагнитного диэлектрика; 4 – плоская подмагничивающая катушка индуктивности;
- 5 – немагнитная подложка

**ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ РАСЧЕТА
УСТРОЙСТВА ПОДМАГНИЧИВАНИЯ**

На практике устройство подмагничивания может быть реализовано как посредством постоянного магнита, так и на базе электромагнита, расположенного в непосредственной близости от рабочего тела датчика. На рис. 4 представлены варианты реализации плоской катушки индуктивности, рассматриваемой в данном контексте в качестве подмагничивающего элемента АМР-сенсорного модуля (рис. 3).

Индуктивность L , [мкГн] такого устройства, в зависимости от его геометрических характеристик рассчитывается из выражений (7) для квадратной (рис. 4, а) и круглой (рис. 4, б) спиралевидных катушек соответственно:

$$L_{KB} = 55,5 \cdot a^3 \sqrt{N^5} \cdot \lg\left(\frac{8a}{t}\right) \cdot 10^{-3}, \tag{7}$$

$$L_{KP} = 24,75 \cdot D_{cp}^3 \sqrt{N^5} \cdot \lg\left(\frac{4D_{cp}}{t}\right) \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн}$$

где $D_{cp}=(D_{вн}+D_{н})/2$ – средний диаметр спирали, [см]; $a_{cp}=(A_{вн}+A_{н})/2$ – длина средней стороны квадрата, [см] (рис. 4, а); t – радиальная ширина намотки, [см]; N – количество витков [1].

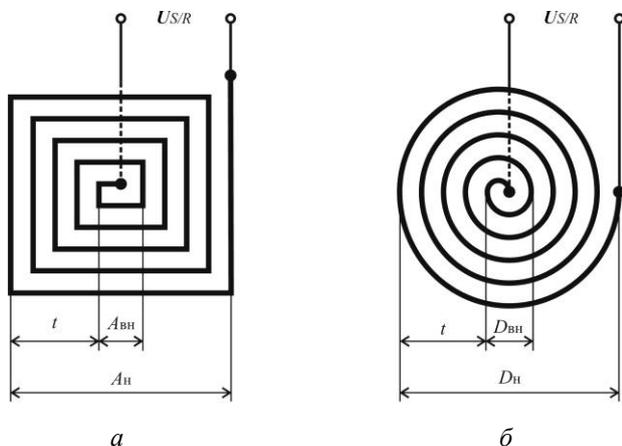


Рис. 4. Варианты исполнения плоских катушек индуктивности

Рассматривая плоскую катушку индуктивности как совокупность витков с током различного радиуса, расположенных на одной оси и в одной плоскости, согласно закону Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции обеспечивается возможность определить зависимость генерируемой магнитной индукции в геометрических центрах спиралевидной плоской катушки от номинала протекающего по ее контуру электрического тока:

$$B = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_o I}{2R_i} \quad \text{или} \quad B_{KB} = N \frac{\mu_o I}{2a_{cp}};$$

$$B_{KP} = N \frac{\mu_o I}{2D_{cp}}. \tag{8}$$

**УПРАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВОМ
ПОДМАГНИЧИВАНИЯ**

Основной задачей системы управления элементом подмагничивания (рис. 4) является генерация управляющих токовых импульсов через плоскую катушку индуктивности. Для решения поставленной задачи возможны различные схемотехнические подходы, однако анализ потенциальных принципов построения такого рода генераторов выявил, что наиболее целесообразным является подход на основе переходных процессов, возникающих при кратковременной коммутации тока через RC-цепь второго порядка. Схемотехническая модель такой RC-цепи (для АМР-сенсора типа НМС1001) представлена на рис. 5, где R2 – сопротивление подмагничивающего элемента.

Здесь (рис. 5) ток i_2 , рассчитанный согласно законам коммутации, однозначно определится выражением (9):

$$i_2(t) = 8,56(e^{-148060t} - e^{-8726118t}), \tag{9}$$

и изменяется во времени так, как показано на рис. 6.

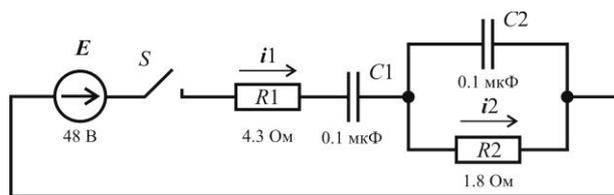


Рис. 5. Модель-схема генератора токовых импульсов

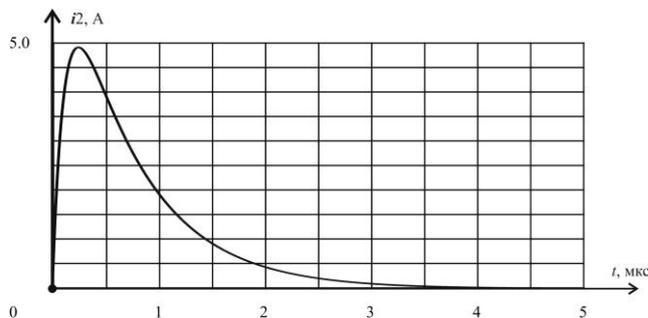


Рис. 6. Ток коммутации $i_2(t)$

В случае прямой (замыкание ключа) и обратной (размыкание ключа) коммутации исследуемый переходный процесс будет иметь вид, показанный на рис. 7.

С целью развести источники управляющего и коммутируемого напряжения предлагается вариант схемотехнической реализации генератора токовых импульсов, представленный на рис. 8. Здесь участок цепи $R5+R_{VT2}$ (или $R4+R_{VT1}$), $C3, R6, C4$ функционально эквивалентен участку $R1, C1, R2, C2$ (рис. 5) соответственно, где R_{VT1} и R_{VT2} – сопротивление открытого канала транзистора $VT1$ и $VT2$ (рис. 8) соответственно.

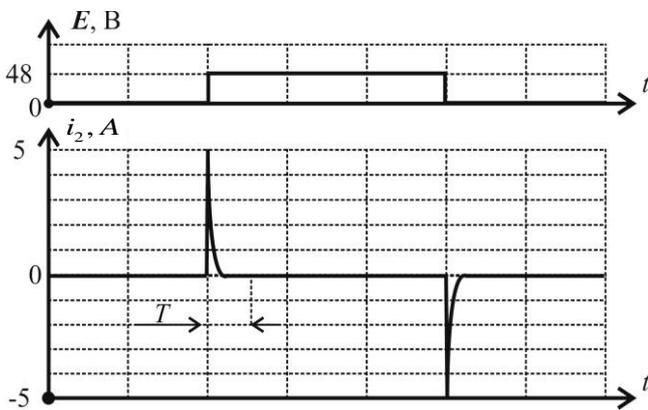


Рис. 7. Ток $i_2(t)$ при прямой и обратной коммутации

Управление генератором парных токовых импульсов (рис. 8) осуществляется посредством параллельного формирования (например, с вы-

хода микроконтроллера) прямоугольных импульсов U_{set} и U_{reset} амплитудой 5 В, с определенными скважностью и ходом следования, как показано на рис. 9, ($T_{r-s} \geq 5$ мкс; $T_{s-r} \geq 5$ мкс; $T_{R6} \approx 2$ мкс).

В результате согласно выражениям (8)–(9) индукция подмагничивающего поля будет изменяться по закону:

$$B_o = \pm 8,56 \eta \mu_o (e^{-148060t} - e^{-8726118t}), \quad (10)$$

где η – коэффициент геометрической формы плоской спиралевидной катушки индуктивности ($\eta = N/2a$ – для квадратной спирали и $\eta = N/2D_{cp}$ для круглой спирали).

Предложенное на рис. 8 решение к построению генератора управляющих токовых импульсов на практике является достаточно универсальным относительно большинства современных серийно выпускаемых магниторезистивных измерительных преобразователей, (преобразователи серии *HMC, KMZ* и другие).

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ВЕРТИКАЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОТКЛИКА АМР-СЕНСОРА

На практике при проектировании сенсорных магнитных модулей вероятны ситуации, когда в предполагаемом отсутствии внешнего магнитного воздействия выходной информационный сигнал на выходе АМР-сенсора не соответствует нулевому уровню.

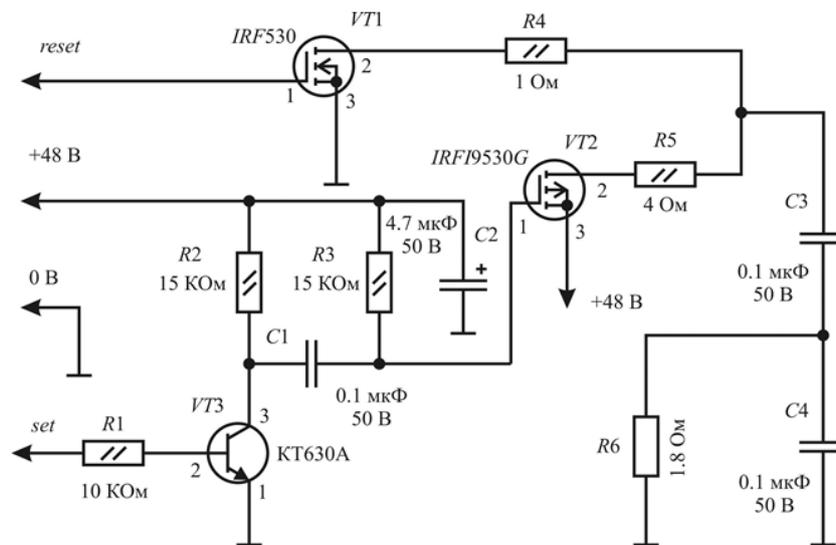


Рис. 8. Генератор парных управляющих токовых импульсов

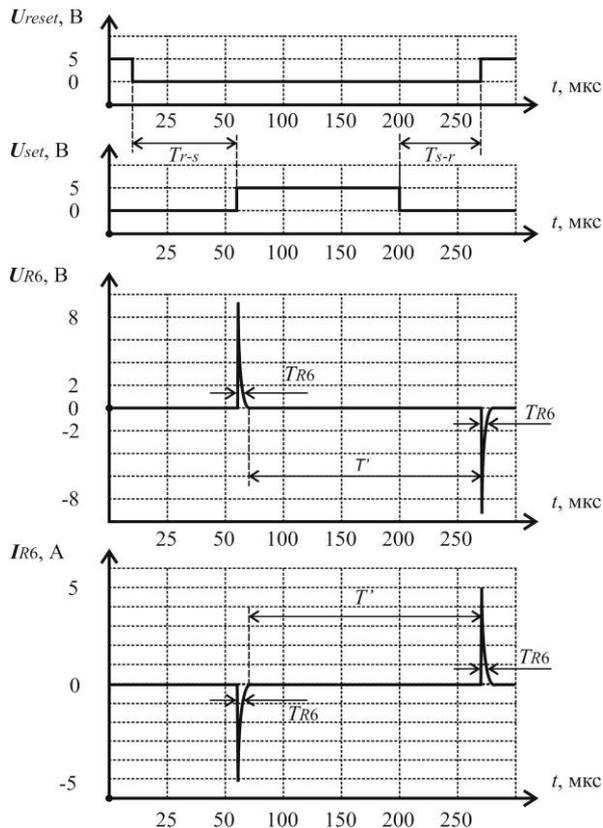


Рис. 9. Временные диаграммы управляющих и генерируемых импульсов

Природа подобных смещений информационного сигнала может объясняться как неучтенными источниками магнитного поля (ферромагнитные элементы корпуса, электронных элементов или разъемов), так и неидеальным исполнением непосредственно самого АМР-сенсора или свойствами среды.

Исключить на начальных стадиях обработки информационного сигнала влияние данных факторов на результат проводимых измерений технически достаточно сложно.

В случае же нахождения информационного сигнала преимущественно в ультранизкой области частот (например, геомагнитное поле), проблема нулевого смещения информационного отклика АМР-сенсорного модуля приобретает особо актуальный характер.

В качестве решения данной проблемы предлагается использовать компенсирующий электромагнит (в виде плоской катушки индуктивности) (рис. 10), активация которого обеспечивает возможность (по принципу суперпозиции) компенсировать постоянную составляющую внешних магнитных наводок и выводить информационный сигнал магнитного сенсора в нулевое положение при условно нулевом воздействии внешнего магнитного поля.

Магнитная индукция (напряженность), генерируемая таким магнитом, будет определяться в соответствии с выражениями (8) и будет зависеть как от геометрических параметров спиралевидной катушки индуктивности, так и от параметров пропускаемого через нее электрического тока.

В результате предлагаемый подход позволит как улучшить параметры выходного сигнала АМР-сенсорного модуля в частности, так и повысить метрологические характеристики магнитометрической ИИС, построенной на его основе, в целом.

Итак, управление корректирующим магнитным полем можно осуществлять, варьируя либо геометрическими параметрами катушки, либо параметрами протекающего по ее контуру электрического тока, изменяя сопротивления цепи (рис. 10, а), либо варьируя напряжением питания (рис. 10, б). Очевидно, что применительно к практической реализации последние два подхода к управлению параметрами генерируемого поля смещения являются наиболее предпочтительными.

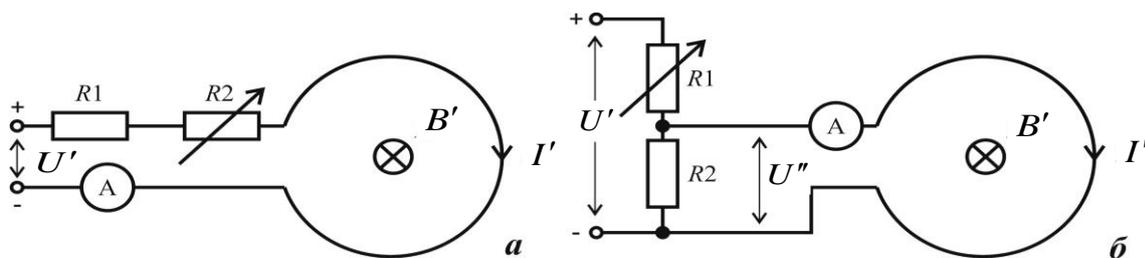


Рис. 10. Управление смещением информационного отклика АМР-сенсорного модуля

Расчет номиналов резисторов $R1, R2$ для варианта, представленного на рис. 10, а, предлагается производить из следующих соображений:

$$R1 = \eta \mu_o \frac{U'}{B'_{\max}}; \quad R2 = \eta \mu_o \frac{U'}{B'_{\min}} - R1, \quad (11)$$

или, учитывая связь индукции и напряженности магнитного поля $B = \mu \mu_o H$, имеем

$$R1 = \eta \frac{U'}{B'_{\max}}; \quad R2 = \eta \frac{U'}{B'_{\min}} - R1. \quad (12)$$

Для получения компенсационного магнитного поля противоположного направления полезно предусмотреть систему электронных ключей, обеспечивающих возможность изменять полярность питания U' (рис. 11).

В случае необходимости возможен подход к управлению током в контуре смещения посредством цифро-аналоговых преобразователей либо цифровых переменных резисторов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АМР-СЕНСОРНОГО МОДУЛЯ

На основании проведенных исследований произведем синтез комплексной математической модели АМР-сенсорного модуля на примере мостового АМР-сенсора типа *HMC1001*, серийно производимого корпорацией «*Honeywell*» ($\eta_{\text{компенсац. катушки}} \approx 2 \cdot 10^{-3}$).

Считая, что управление устройствами подмагничивания и вертикального смещения информационного отклика АМР-сенсора осуществляется согласно рис. 8 и 10 соответственно, а также учитывая выражения (6), (8), (10), (12), имеем

$$U(H) = 2U_0 \Delta R_{\max} \times \frac{H + 2 \cdot 10^{-3} \frac{U'}{R'}}{\frac{8,56\eta}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} (e^{-1480601t} - e^{-8726118t}) dt},$$

где U – информационный сигнал, снимаемый с измерительной диагонали моста; U_0 – напряжение питания измерительного моста; H – напряженность измеряемого магнитного поля; U' – напряжение питания устройства вертикального смещения информационного отклика; R' – сопротивление устройства вертикального смещения информационного отклика ($R' = R1 + R2$, см. рис. 10, а); t_1 и t_2 – начальный и конечный момент подмагничивающего импульса соответственно (рис. 6); $\Delta t = t_2 - t_1$.

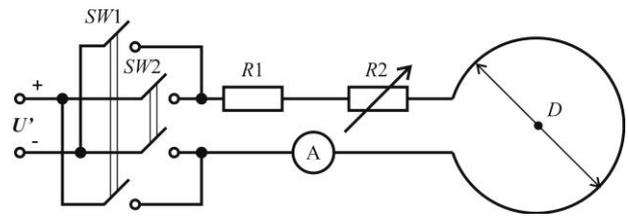


Рис. 11. Управление полярностью источника питания генератора поля смещения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей статье изложены конструкторские решения, обеспечивающие эффективную работу АМР-сенсорных модулей, а также синтезирована комплексная математическая модель АМР-сенсорного модуля, учитывающая как основные процессы, имеющие место в тонких магнитных пленках мостового АМР-сенсора, так и влияние утилитарных устройств, способствующих улучшению метрологических характеристик АМР-сенсорного модуля в целом. Полученную математическую модель полезно использовать как при теоретических исследованиях АМР-сенсорных структур и систем, так и в процессах отладки, калибровки или настройки магнитометрических информационно-измерительных и геоинформационных систем, построенных на их основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. В. Магнитные материалы и элементы электронных устройств. Уфа: УГАТУ, 2012. 154 с.
2. Ripka P., Tipek A. Modern Sensors. London: ISTE ltd, 2007. 511 p.
3. Котенко Г. И. Магниторезисторы. М.: Энергия, 1972. 80 с.

ОБ АВТОРАХ

Воробьев Андрей Владимирович, доц. каф. электроники и биомед. технологий. Дипл. магистр техн. и технол. (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. магнитометрических информационно-измерительных систем.

Иванова Галина Алексеевна, ст. преп. каф. теор. механики. Дип. инж. по ср. связи с подвижн. объектами (УГАТУ, 2006). Готовит дис. по исп. гироскопич. приборов в системах ориентации и навигации подвижн. объектов.

Кильметов Эрнест Айдарович, асп. каф. теор. основ электротехники. Дипл. инж. (УГАТУ, 2013).

METADATA

Title: Research, simulation and calculation of the bridge sensor unit that is based on AMR-effect.

Authors: A. V. Vorobiev, G. A. Ivanova, E. A. Kilmotov.

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: cpu8bit@yandex.ru, ivanova_ga@inbox.ru, kilmotovea@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 4 (57), pp. 143-150, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The results of analysis of anisotropic magnetoresistive sensor and a sensor module. Proposed, analyzed and simulated circuit design and engineering solutions that ensure efficient operation (in terms of metrological characteristics).Furnishes the mathematical model of the anisotropic magnetoresistive sensor module.

Key words: AMR-sensor; magnetic field sensor; magnetometric data-measuring system.

References (English transliteration):

1. A. V. Vorobiev, *Magnetic Materials and Components of Electronic*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2012.
2. P. Ripka, A. Tipek, *Modern Sensors*. London: ISTE Ltd., 2007.
3. G. I. Kotenko, *Magnetoresistor*. Moscow: Energiya, 1972.

About authors:

Vorobiev, Andrey Vladimirovich, Docent, Dept. of Electronics and Biomedical Technologies. Master of Electronics & Microelectronics (UGATU, 2006). PhD (UGATU, 2009).

Ivanova, Galina Alekseyevna, assistant professor, Dept. of Theoretical mechanics. Engineering degree in communications with mobile objects (USATU, 2006). Works on a dissertation on the use of gyroscopic devices in the systems of orientation and navigation of mobile objects.

Kilmotov, Ernest Aidarovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Theoretical fundamentals of electrical engineering. Engineer (USATU, 2013).