

Разработка математической модели AMR-преобразователя для внедрения в САПР

А. Чеплаков¹, Э. Литвиненко²

УДК 621.3 | ВАК 2.2.2

Датчики на анизотропных магниторезистивных пленках – AMR-преобразователи – представляют собой передовое решение для измерения электрических токов ввиду ряда уникальных преимуществ, которые выводят их на следующий уровень по сравнению с классическими датчиками тока на эффекте Холла. В данной статье рассмотрены принцип работы и основные характеристики AMR-преобразователя, представлены результаты разработки его математической модели и ее внедрения в САПР Cadence Virtuoso.

Цель создания модели датчика тока заключается в отражении происходящих в нем физических процессов, а также получении выходных величин для дальнейшей обработки в системе считывания и преобразования сигналов с датчиков. Разработанная имитационная модель позволяет анализировать электрические характеристики AMR-преобразователя, учитывая все особенности конструкции, тем самым повышая эффективность и безопасность изделий. Точковые датчики могут помочь в обнаружении и предотвращении перегрузок и коротких замыканий, а также позволяют контролировать потребляемую энергию, продлевая срок службы автономных роботов, работающих на батарейном питании. Главным преимуществом является точный контроль токов обмотки электродвигателей для обеспечения стабильной и плавной работы роботов. Это особенно важно в случае выполнения сложных задач, требующих высокой точности и координации движений, например, в манипуляторах или промышленных роботах.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Анизотропный магниторезистивный (anisotropic magnetoresistance, AMR) эффект – физический феномен, проявляющийся в изменении электрического сопротивления ферромагнитного (ФМ) материала при приложении к нему внешнего магнитного поля [1]. Данный эффект обусловлен анизотропным рассеянием проводящих электронов в объеме ФМ-материала,

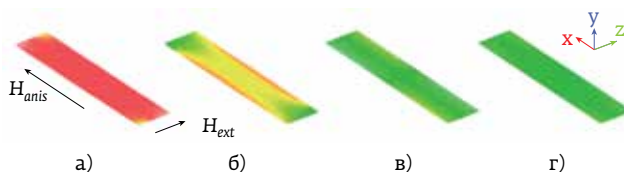


Рис. 1. Магнитная конфигурация тонкой пленки после релаксации, рассчитанная в микромагнитном приближении, для различных значений напряженности внешнего магнитного поля H_{ext} : а – $H_{ext} = 0$; б – $H_{ext} = 0,1M_s$; в – $H_{ext} = 0,2M_s$; г – $H_{ext} = 0,3M_s$

возникающим вследствие спин-орбитального взаимодействия [2]. При этом степень рассеяния в некоторой точке зависит от локального угла между векторами намагниченности \mathbf{M} и электрического тока \mathbf{j} . Качественно данная зависимость может быть описана законом Фойгта – Томпсона [3]:

$$\rho(\alpha) = \rho_0 \cdot (1 + \lambda \cdot \cos^2 \alpha), \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление ферромагнетика в некоторой его точке, ρ_0 – удельное сопротивление в отсутствие внешних воздействий, λ – магниторезистивный коэффициент материала, α – угол между векторами намагниченности и электрического тока.

При приложении к ФМ-образцу внешнего магнитного поля происходит перераспределение магнитных моментов в его объеме. В свою очередь, это приводит к изменению удельного сопротивления образца в каждой его точке в соответствие с (1).

¹ АО «ЗНТЦ», инженер, cheplakov@zntc.ru.

² АО «ЗНТЦ», ведущий инженер, elitvinenko@zntc.ru.

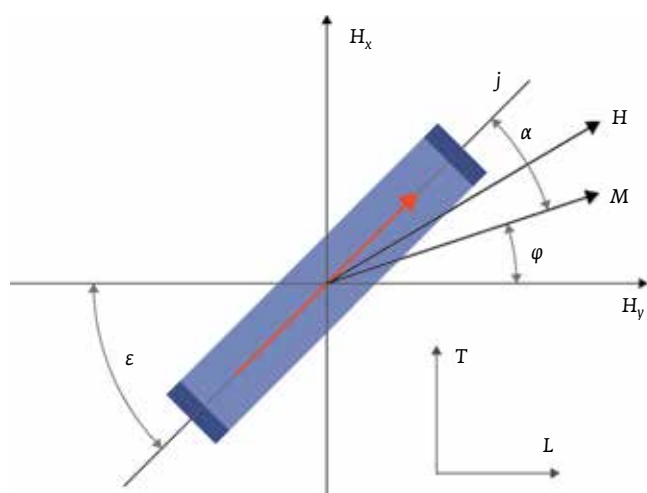


Рис. 2. Система полей модели Стонера – Вольфарта (осями T и L обозначены трудная и легкая оси анизотропии соответственно)

Тонкопленочные магнитные материалы представляют особый интерес, поскольку характерное для их формы высокое значение магнитостатического поля препятствует выходу вектора намагниченности из плоскости пленки [4]. Иначе говоря, магнитная конфигурация тонких пленок незначительным образом меняется при вариации нормальной к их плоскости компоненты внешнего магнитного поля, что ограничивает чувствительность к приложенному в данном направлении полю.

Как правило, величина угла α между намагниченностью M и направлением тока j будет изменяться в объеме ФМ-образца – это может быть объяснено неоднородностью распределения вектора намагниченности (рис. 1а, б). Однако, в случае достаточно высокого значения амплитуды внешнего магнитного поля (сравнимого с величиной намагниченности насыщения M_s) будет наблюдаться полное перемагничивание пленки, и распределение вектора намагниченности в объеме будет иметь однородный характер (рис. 1в, г). В последнем случае можно рассматривать ферромагнитную пленку как однодоменную структуру.

Поскольку стандартный подход с применением микромагнитного анализа требует значительных вычислительных ресурсов, было принято решение использовать макроспиновую модель для нахождения магнитостатической конфигурации. В макроспиновом приближении намагниченность имеет однородное распределение во всем объеме образца, и для ее описания используется модель Стонера – Вольфарта (СВ) (рис. 2). В рамках модели СВ свободная магнитная энергия W системы задается следующим выражением [5]:

$$W = -\mu_0 M_s H_x \sin\varphi - \mu_0 M_s H_y \cos\varphi + 1/2 \mu_0 M_s H_k \sin^2\varphi, \quad (2)$$

где M_s – намагниченность насыщения; H – внешнее магнитное поле; H_k – поле анизотропии; φ – угол между вектором намагниченности и легкой осью анизотропии.

Направление намагниченности в таком случае может быть найдено путем минимизации (2) по углу φ :

$$\partial W / \partial \varphi = -\mu_0 M_s H_x \cos\varphi + \mu_0 M_s H_y \sin\varphi + \mu_0 M_s H_k \sin\varphi \cos\varphi = 0. \quad (3)$$

Для решения (3) был применен алгоритм градиентного спуска. В общем случае, данный метод может быть описан следующим выражением:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_{n'})_{i+1} = f(x_1, x_2, \dots, x_{n'})_i - \gamma \text{grad}(f(x_1, x_2, \dots, x_{n'})), \quad (4)$$

где f – минимизируемая функция; i – номер итерации; γ – скорость обучения.

Полученный таким образом угол ориентации φ вектора M относительно легкой оси намагничивания (рис. 2, ось L) позволяет рассчитать величину угла между направлениями вектора намагниченности и электрического тока для заданного поля анизотропии, что важно учесть, поскольку при отжиге кристалла со взаимно повернутыми AMR-пленками направление поля анизотропии в системе координат каждой пленки может различаться:

$$\alpha = \varepsilon - \varphi. \quad (5)$$

Магниточувствительная основа типичного AMR-сенсора представляет собой мост Уитстона (рис. 3а). Подобная структура используется для повышения чувствительности устройства, а также его устойчивости к тепловому

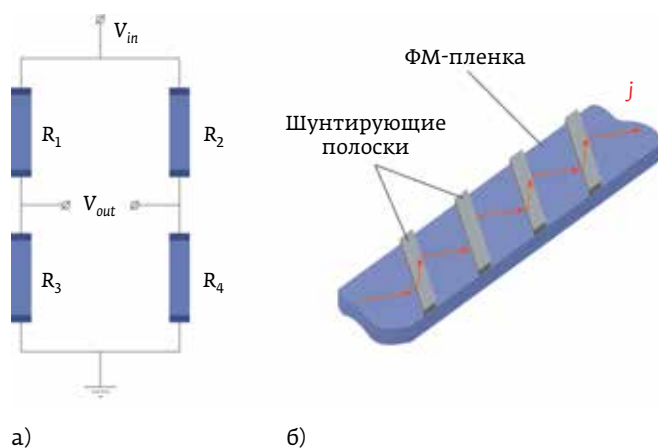


Рис. 3. Мостовая структура AMR-сенсора (а) и шунтирующие полосы на ФМ-пленках (б)

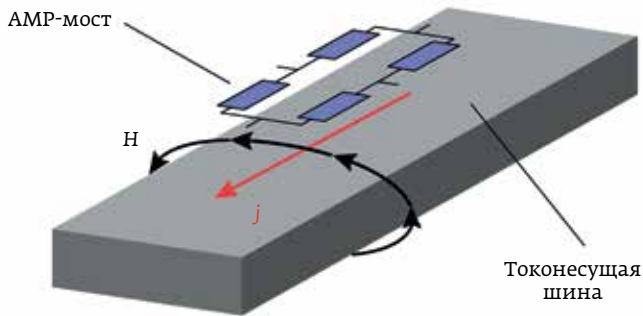
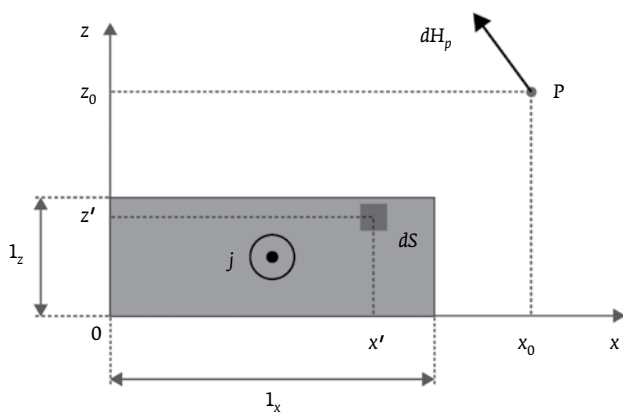
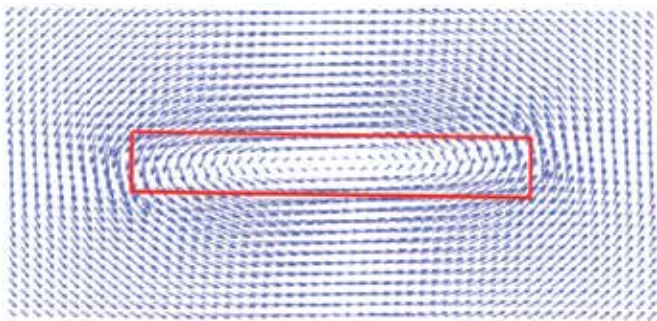


Рис. 4. Циркулярное магнитное поле токонесущей шины



а)



б)

Рис. 5. Разбиение сечения шины на множество бесконечно тонких проводников (а) и численное моделирование циркулярного поля (б). Здесь: $P(x_0, y_0)$ – точка, в которой рассчитывается поле H_p ; l_x, l_z – ширина и толщина проводника соответственно

шуму. Для линеаризации передаточной характеристики выходного сигнала V_{out} при варьировании амплитуды или направления приложенного магнитного поля, на ФМ-пленки могут быть нанесены шунтирующие полосы высокопроводящего материала, которые отклоняют

протекающий по пленке ток на 45° от продольного направления (рис. 3б).

Найденные из (3) – (5) углы α в каждой из последовательных областей ФМ-пленки используются для определения абсолютного значения их удельного сопротивления в соответствии с (1). Рассчитанные с учетом заданных геометрических размеров значения электрического сопротивления R_{1-4} каждой ФМ-пленки в составе моста позволяют вычислить выходное напряжение V_{out} [6]:

$$V_{out} = V_{in} \cdot (R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4) / ((R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)) \quad (6)$$

Принцип работы датчика тока основан на детектировании амплитуды циркулярного поля Эрстеда, возбуждаемого протекающим по расположенной под AMR-сенсором шине электрическим током (рис. 4). Амплитуда лежащей в плоскости моста компоненты циркулярного поля линейным образом зависит от значения тока в шине, и может быть рассчитана в соответствии с интегральным выражением, полученным путем разбиения шины на множество малых проводников (рис. 5):

$$H_{px} = (\mu_0 j / 2\pi) \int_S \frac{z_0 - z'}{\sqrt{(x_0 - x')^2 + (z_0 - z')^2}} dS \quad (7)$$

Следует также сказать, что в реальных AMR-сенсорах предусмотрена система двух вспомогательных катушек, возбуждающих однородные магнитные поля в плоскости ФМ-пленок. Компенсирующая (OFFSET) катушка создает магнитное поле, направленное вдоль чувствительной оси устройства – поперек ФМ-пленок. Данное поле позволяет сдвигать передаточную характеристику сенсора [7]. Подмагничивающая (RESET) катушка необходима для периодического восстановления однородности магнитного распределения в ФМ-пленках. В силу эффектов гистерезиса при многократном перемагничивании изначально однородно намагниченных пленок происходит разориентация магнитных моментов в их объемах [8], вследствие чего ухудшаются сенсорные свойства магниточувствительного устройства на их основе. Наведение подмагничивающего поля, ориентированного вдоль продольного направления пленок, возвращает их магнитную конфигурацию к однородному состоянию, стабилизируя работу устройства.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

На основе изложенной теории в САПР Cadence Virtuoso были написаны расчетные блоки на языке программирования Verilog-A. Разработанная имитационная модель, блок-схема которой приведена на рис. 6, состоит из следующих блоков:

- блок вычисления циркулярного магнитного поля токонесущей шины согласно (7);

МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Микросхема **K1382HX065**

Преобразователь магнитного поля в синусно-косинусный сигнал

- для устройств автоматизации технологических процессов
- для систем управления стационарных и подвижных объектов

- Используется для измерения углов поворота узлов
- Преобразует угол поворота планарного магнитного поля в пропорциональный электрический сигнал



Определяет угол поворота по амплитуде синусно-косинусных сигналов

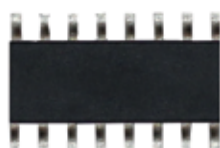
K1382ПП02



Одноосевой магнитометр

Микросхемы предназначены для регистрации малых магнитных полей, в т.ч. магнитного поля Земли и решения задач ориентации, навигации и наведения.

K1382ЧЭ01Т



с 2024 года

Двухосевой магнитометр

K1382ЧП01



с 2024 года

Микросхема преобразователя магнитного поля

Микросхема предназначена для преобразования магнитного поля в электрический сигнал в системах автоматического управления



Промышленная автоматика



Робототехника



Автомобильная электроника

Зеленоградский Нанотехнологический Центр – предприятие полного цикла разработки и производства современной элементной базы микроэлектроники

- Высокая степень локализации производства
- Производство изделий любой серийности
- Поддержка на всех этапах интеграции
- Индивидуальный подход к каждому заказчику



sales@zntc.ru; +7 (499) 720-69-73

www.zntc.ru

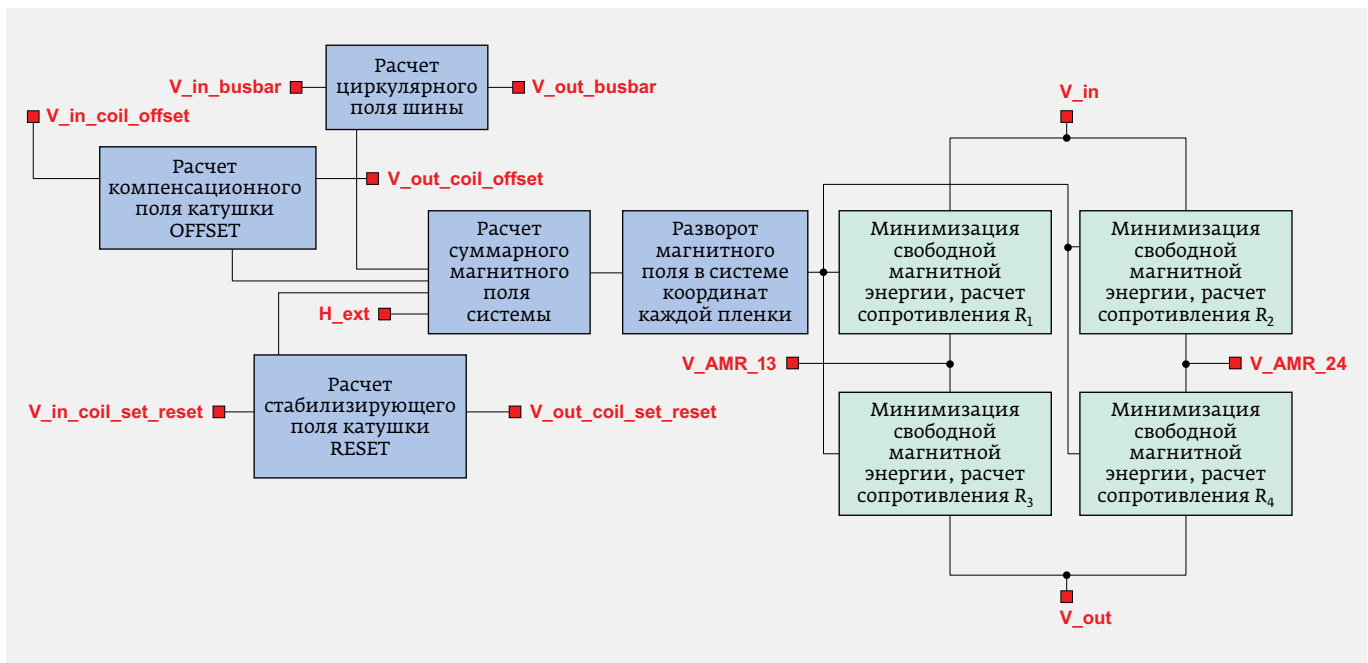


Рис. 6. Блок-схема разработанной модели AMR-сенсора

- блок расчета магнитного поля компенсационной катушки **OFFSET** согласно (7);
- блок расчета магнитного поля стабилизирующей катушки **RESET** согласно (7);
- блок расчета суммарного магнитного поля в каждой из ФМ-пленок шины;
- блок расчета углов ориентации магнитных полей в системах координат каждой из ФМ-пленок;
- блоки вычисления сопротивлений резисторов моста путем минимизации свободной магнитной энергии каждой из ФМ-пленок согласно (3) и (4), расчета относительного угла между векторами намагниченности и электрического тока, и последующего вычисления абсолютного значения сопротивления с учетом геометрических размеров пленок и (1).

Модель предусматривает возможность определения геометрических размеров ФМ-пленок и шунтирующих полосок, токонесящей шины и системы катушек. Также предусмотрена возможность

задания материальных параметров элементов сенсорного устройства: магниторезистивной постоянной ФМ-материала λ и его намагниченности насыщения M_s ,

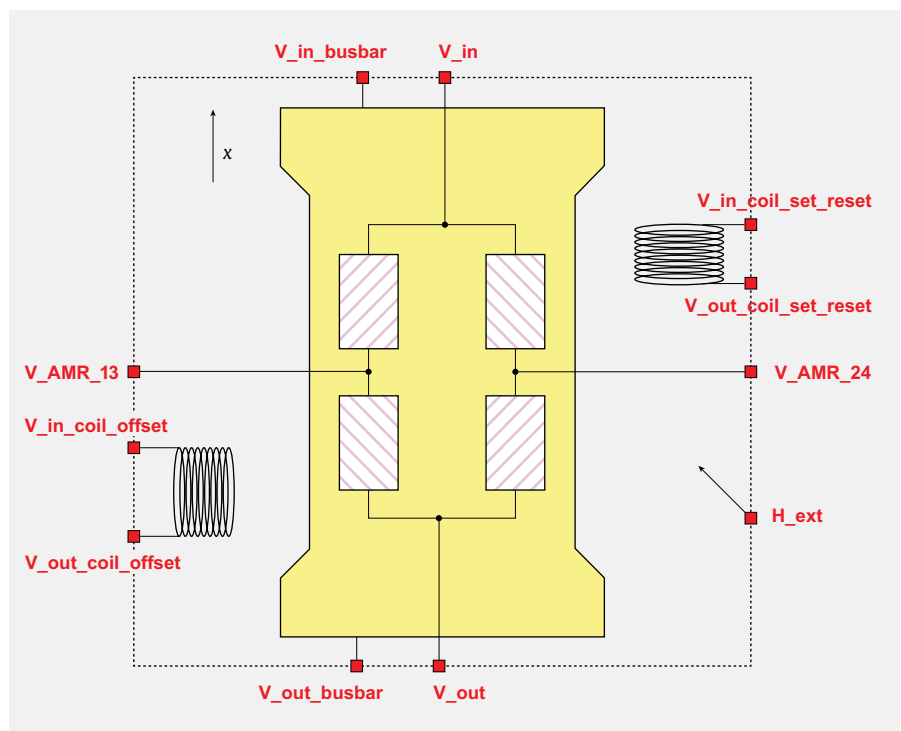


Рис. 7. Символьное представление AMR-сенсора для САПР Cadence Virtuoso

Организаторы



ФЛОТ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-МОРСКОЙ
САЛОН - 2024

Выставочный
оператор



МКВ

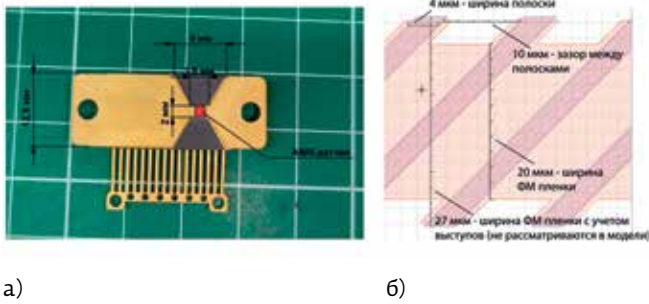
При поддержке



19–23 июня

Кронштадт
Конгрессно-выставочный центр
Музея военно-морской славы

FLEET-EXPO.RU



а) Размеры токонесущей шины корпуса (а) и ФМ-пленок (б)

удельных сопротивлений ФМ-пленок при отсутствии внешнего магнитного поля ρ_0 , шунтирующих полосок ρ_{barber} , токонесущей шины ρ_{busbar} и системы катушек ρ_{coil} RESET, OFFSET. Магниторезистивный (МР) мост, токонесущая шина и катушки выполнены в виде элементов схемы, имеющих входные, выходные контакты и сопротивления, определяемые из предустановленных параметров. Это позволяет готовым образом использовать Cadence-символ на основе модели (рис. 7) для интегрирования в проекты, где с его применением могут быть проведены симуляции для анализа работы AMR-преобразователя, проверки его характеристик и оптимизации блока считывания и обработки сигнала с преобразователя. В модели учтена возможность наведения дополнительного внешнего магнитного поля

для моделирования воздействия шумов на работу сенсорной системы, а также задания направления одноосной магнитокристаллической анизотропии, образованной при отжиге пленок.

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Для оценки адекватности имитационной модели использовались характеристики AMR-преобразователя, разработанного компанией АО «Зеленоградский нанотехнологический центр» (АО «ЗНТЦ»), а именно – микросхемы 5344XE025 (рис. 8). Были определены следующие параметры:

- материал изготовления ФМ-пленок: пермаллой 81/19, материал изготовления шунтирующих полосок: алюминий;
- угол отклонения поля наведенной магнитокристаллической анизотропии от продольного направления пленок: $0,1^\circ$;
- размеры ФМ-пленок: длина – 508 мкм; ширина – 20 мкм; толщина – 0,3 мкм;
- ширина шунтирующей полоски: 4 мкм; зазор между последовательными шунтами: 10 мкм; толщина шунтирующих полосок: 1,5 мкм;
- размер сечения токонесущей шины в области МР-моста: 2×5 мм;
- напряжение питания моста: 5 В.

Были проведены измерения выходного сигнала AMR-преобразователя при изменении тока шины в диапазоне 0–60 А. Для проведения измерений

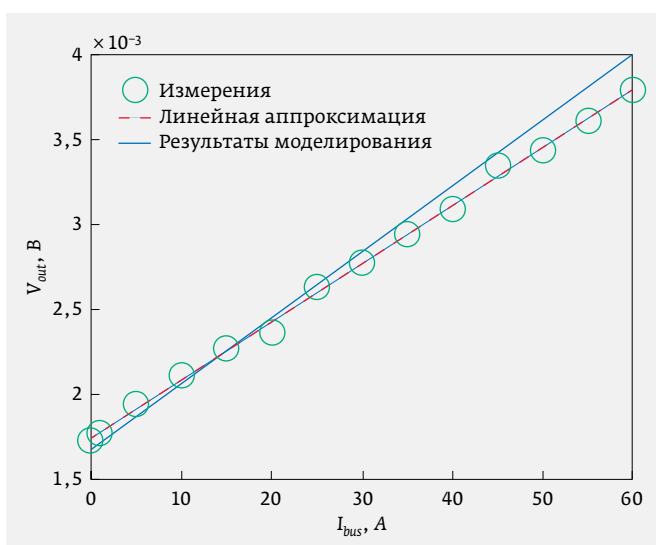


Рис. 9. Сравнение передаточных характеристик модели и реального AMR-преобразователя в линейной области

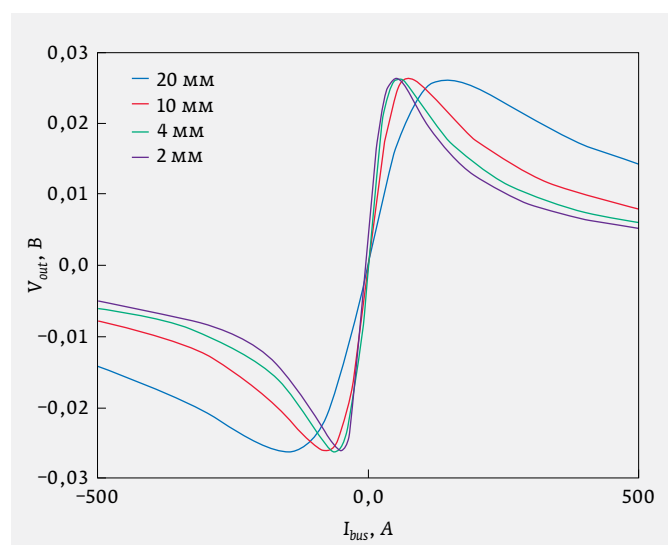


Рис. 10. Семейство передаточных характеристик модели AMR-преобразователя при различных значениях ширины токонесущей шины

использовался цифровой мультиметр Keithley DMM6500, в качестве генератора применялся источник питания GW Instek PSU7 12.5-120. Аналогичная зависимость дифференциального напряжения между плечами моста от тока шины была получена при помощи имитационной модели в среде ADE L. Результаты измерений и моделирования приведены на рис. 9. Полученная зависимость демонстрирует хорошую сходимость результатов расчетов на основе модели с выходным сигналом реального устройства. Различия могут быть обусловлены численными погрешностями при решении (3) и (7), а также наличием неоднородностей магнитной конфигурации в ФМ-пленках реального устройства в условиях малых значений поля шины. Кроме того, воздействие магнитных шумов при снятии передаточной характеристики реального устройства могло привести к возникновению crossfield-эффекта (паразитной чувствительности при наведении магнитного поля, направленного ортогонально чувствительной оси сенсора), который не учитывается разработанной моделью, однако может сказаться на результатах измерения.

Описанная имитационная модель AMR-преобразователя имеет возможность коррекции и дополнений в зависимости от использованного датчика, корпуса, геометрии токонесущей шины и других особенностей конкретных задач. На рис. 10 представлено семейство графиков передаточных характеристик AMR-преобразователя при различных значениях ширины токонесущей шины (отличие амплитуды сигнала от рис. 9 обусловлено меньшей толщиной шины, в результате чего при одинаковом токе происходит большее перемагничивание ФМ-пленок, приводящее к большему дисбалансу моста). Данное семейство характеристик демонстрирует различие чувствительности AMR-преобразователей, а также их диапазонов изменения выходного напряжения, в зависимости от выбранной шины и может служить основой при поиске оптимальных параметров системы для конкретной задачи.

* * *

В данной статье представлены процессы разработки и верификации математической модели AMR-преобразователя, которая успешно внедрена в систему автоматизированного проектирования (САПР) Cadence Virtuoso. По результатам моделирования было выявлено соответствие математической модели реальному AMR-преобразователю в составе микросхемы 5344XE025. Также было проведено исследование передаточной характеристики при изменении геометрии токонесущей шины, полученные графики совпадают с теоретическими расчетами. Полученные результаты представляют

собой ценный материал для дальнейшего использования их в системах навигации, обнаружения препятствий, а также в областях высокоточного контроля движений и ряде других задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ritzinger P., Výborný K.** Anisotropic magnetoresistance: materials, models and applications // Royal Society Open Science. 2023. No. 10.
2. **Trushin M., Výborný K.** Anisotropic magnetoresistance of spin-orbit coupled carriers scattered from polarized magnetic impurities // Physical review. B, Condensed matter. 2009. V. 80. No. 13.
3. **Nie H.B., Xu S.Y., Ong C.K.** Magnetic anisotropy and magnetoresistance of sputtered [(FeTaN)/(TaN)](n) multilayers // Journal of Applied Physics. 2003. V. 91. No. 10.
4. **Kostevšek N., Serša I.** Characterization of metal-based nanoparticles as contrast agents for magnetic resonance imaging // Comprehensive Analytical Chemistry. 2021. V. 93. PP. 303–343.
5. **Tumaňský S.** Thin film magnetoresistive sensors. First Edition. Bristol; Philadelphia: CRC Press, 2001. 576 p.
6. **Markevicius V., Cepenas M., Navikas D., Valinevicius A., Andriukaitis D.** Research of Magnetic Field Influence on the Offset and Sensitivity of Magnetoresistive Sensor Readings // Elektronika ir Elektrotechnika. 2013. V. 19. No. 2. PP. 37–40.
7. **Mohamadabadi K., Jeandet A., Hillion M., Coillot C.** Autocalibration Method for Anisotropic Magnetoresistive Sensors Using Offset Coils // IEEE Sensors Journal. 2013. V. 13. No. 2. PP. 772–776.
8. **Fúra V., Petrucha V., Platil A.** Construction of an AMR magnetometer for car detection experiments // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 108.

ООО СМП ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

электронные компоненты
для поверхностного монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК
• Катушки индуктивности на токи до 10 А
• U.FL разъемы и pigtail co SMA

Моск. Ленинградский пр. 80 к. 32-вход. mail@smd.ru
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780