

10. Bartlett P. Generalization performance of support vector machines and other pattern classifiers. *Advances in Kernel Methods*. MIT Press, Cambridge, USA, 1998. pp 43–54
11. C.-C. Chang and C.-J. Lin. LIBSVM: a library for support vector machines, 2001. Available at: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>. (accessed 15 August 2015). (In Russ.)
12. Chih-Wei Hsu, Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin. A Practical Guide to Support Vector Classification, 2010. Available at: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/guide/guide.pdf>, (accessed 15 August 2015). (In Russ.)
13. Shewart. W. A. Economic Control of Quality of Manufactured Product / W.A. Shewhart – Van Nordstrom, 1931 – 18 с.
14. Wikipedia, Precision and recall. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall, (accessed 15 August 2015). (In Russ.)
15. Wikipedia, Sensitivity and specificity. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_and_specificity, (accessed 15 August 2015). (In Russ.)

УДК 681.586.783 : 537.633

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА КОЛОССАЛЬНОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ¹

Статья поступила в редакцию 13.11.2015 г., в окончательном варианте 16.11.2015 г.

Карпасюк Владимир Корнильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: vkarpasyuk@mail.ru

Смирнов Андрей Михайлович, ведущий инженер, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: sc_lab@bk.ru

Баделин Алексей Геннадьевич, младший научный сотрудник, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: alexey_badelin@mail.ru

В статье рассмотрены особенности построения и функционирования многоэлементных цифровых датчиков магнитного поля для широкого интервала температур на основе керамических манганитов, обладающих колоссальным магнитосопротивлением. Обеспечение достоверности и повторяемости измерений требует учета нелинейных температурных и вольтамперных характеристик манганитов и контактных областей, а также влияния сопутствующих эффектов на измеряемые величины. Это достигается с помощью процедур предварительной автоматической калибровки магниточувствительных элементов, что дает возможность расширить допустимый разброс электромагнитных параметров манганитов и интервал рабочих температур. При этом исключается необходимость термостабилизации датчиков. Описаны конструкция и рабочие характеристики датчика на примере созданного экспериментального образца, а также алгоритмы начальной калибровки и обработки информационных сигналов в рабочем режиме. Рассмотрены перспективы развития «интеллектуальных» матричных систем для анализа неоднородных магнитных полей, в том числе с использованием манганитов новых составов, позволяющих значительно повысить чувствительность датчиков.

Ключевые слова: манганиты, колоссальное магнитосопротивление, температура, магнитное поле, матричный датчик, экспериментальный образец, микропроцессорная обработка, автоматическая калибровка, параметры

¹ Работа частично выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 334).

PECULIARITIES IN THE DESIGN OF MAGNETIC FIELD SENSORS BASED ON THE COLOSSAL MAGNETORESISTANCE EFFECT

Karpasyuk Vladimir K., D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: vkarpasyuk@mail.ru

Smirnov Andrey M., Leading Engineer, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: sc_lab@bk.ru

Badelin Aleksey G., Junior Researcher, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: alexey_badelin@mail.ru

The paper considered the features of creation and operation of multi-element digital magnetic field sensors for a wide range of temperatures on the basis of ceramic manganites having colossal magnetoresistance. Reliability and repeatability of measurements requires taking into account nonlinear temperature and current-voltage characteristics of manganites and contact areas, as well as the influence of related effects on the measured values. This is achieved by using the procedures of advanced automatic calibration of the magnetically sensitive elements, what gives the opportunity to expand the permissible scatter of electromagnetic parameters of manganites and the range of operating temperatures. The need for thermal stabilization of sensors thus excluded. Design and operating characteristics of the sensor on the example of created experimental sample, as well as the algorithms of advanced calibration and information signals processing are described. The perspective development of the "intelligent" matrix systems for the analysis of inhomogeneous magnetic fields is discussed, including the use of manganites with new compositions, which allows to significantly increasing the sensitivity of the sensors.

Keywords: manganites, colossal magnetoresistance, temperature, magnetic field, matrix sensor, experimental sample, microprocessor processing, automatic calibration, parameters

Введение. Манганиты, обладающие эффектом колоссального магнитосопротивления (КМС) [3], являются перспективными материалами спинтроники [5, 11]. Они могут использоваться в различных устройствах систем управления, в том числе в качестве чувствительных элементов датчиков магнитного поля и температуры [5, 6, 12]. В ряде работ [1, 2, 5, 10, 12] были описаны магнитные сенсоры, созданные на основе керамических или пленочных образцов манганитов. Однако следует отметить, что одновременно с большой величиной магниторезистивного эффекта манганиты могут обладать сильно нелинейными вольтамперными характеристиками [7], гигантской магнитострикцией [4, 8] и фазовым переходом «металл-полупроводник» в определенной области температур [9]. Кроме того, вид вольтамперных характеристик и температурных зависимостей магнитосопротивления сильно зависит от контактирующего с манганитом металла и от условий нанесения контактов [6].

Необходимость учета указанных факторов усложняет практическое применение манганитов в датчиках магнитного поля для широкого интервала температур. Поэтому представляет интерес развитие принципов и методов конструирования таких устройств, разработка алгоритмов и программ обработки сигналов датчиков, обеспечивающих диагностику их функционирования, достоверность и надежность измерений.

Очевидно, что построение температурных зависимостей сопротивления чувствительных элементов в отсутствие магнитного поля является обязательным и при последующем измерении напряженности магнитного поля они должны учитываться как калибровочные. Оптимальным схемотехническим решением представляется включение образца манганита в электрическую цепь с постоянным напряжением как двухполюсника, величина тока через который, при изменении температуры и напряженности внешнего магнитного поля, регистрируется аналого-цифровым преобразователем и используется для дальнейшей обработки.

Керамические манганиты являются более дешевыми и технологичными по сравнению с монокристаллическими или пленочными. Кроме того, они обладают изотропным маг-

ниторезистивным эффектом. Наиболее целесообразно изготовление керамических элементов для планарного печатного монтажа. Нанесение контактов может быть выполнено термическим или магнетронным напылением, вжиганием или химическим осаждением металлов, а также нанесением токопроводящих металлоорганических соединений. Полученные таким образом элементы могут быть использованы в разнообразных конфигурациях магниточувствительной области датчиков – как в виде единичных сенсоров, так и в виде развитых матричных систем, предназначенных для анализа градиента распределения магнитного поля.

Целью настоящей работы было рассмотрение особенностей матричных датчиков магнитного поля на основе керамических образцов манганитов с эффектом КМС, а также процедур калибровки и вычисления величины измеряемого магнитного поля с учетом температуры магниточувствительных элементов, сопротивлений контактов и сопутствующих эффектов.

Экспериментальные образцы и их параметры. На рисунке 1 показана печатная плата созданного матричного датчика. Датчик содержит 9 магниточувствительных элементов, изготовленных из лантан-стронциевого манганита с замещением марганца никелем в количестве 2 ат. %. Образцы манганита были синтезированы по обычной керамической технологии. Завершающий процесс спекания проводился при температуре 1200 °С на воздухе в течение 10 часов. Величина магнитосопротивления синтезированного манганита изменялась от 10 до 5 % в диапазоне температур 100–300 К.

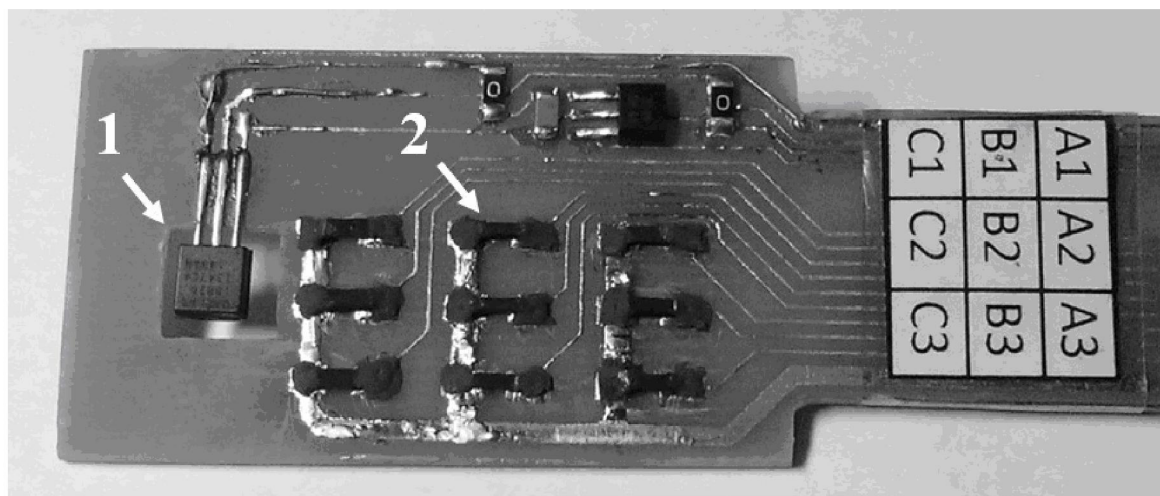


Рис. 1. Печатная плата матричного датчика магнитного поля:
1 – датчик температуры; 2 – магниточувствительные элементы

Величина магнитосопротивления датчика зависит от температуры. Поэтому на печатной плате, рядом с магниточувствительными элементами, был установлен цифровой датчик температуры фирмы Dallas DS18B20, обладающий точностью не хуже 0.5°С. Электрическое соединение образцов манганита с проводниками печатной платы было выполнено при помощи самоотвердевающей металлоорганической смеси с 99% содержанием порошка серебра. Изменение проводимости системы «металл-манганит» регистрировалось по падению напряжения на добавочных постоянных резисторах при питании схемы постоянным напряжением. Добавочные резисторы конструктивно вынесены за рабочую область датчика.

Величина падения напряжения регистрировалась при помощи встроенных АЦП микроконтроллера фирмы ATMEL ATmega 2560. Программное обеспечение микроконтроллера разрабатывалось в «AVR Studio».

Созданный датчик предусматривает процедуру начальной калибровки вне магнитного поля в заданном диапазоне температур. При начальной калибровке в EEPROM микроконтроллера записываются значения сопротивления каждого из девяти магниточувствительных элементов, соответствующие шагу в 1°C . При этом в общую величину электросопротивления, помимо сопротивления самих магниточувствительных элементов, входят также сопротивления соответствующих контактов, соединительных дорожек и точек монтажа. Цикл калибровки заканчивается при достижении заданной температуры, а режим регистрации изменений сопротивления магниточувствительных элементов запускается автоматически при включении датчика. При этом разность сопротивлений вычисляется по калибровочным значениям для текущей температуры эксплуатации. Для хранения и обработки значений этой разности на выходе АЦП используется массив четырехбайтных переменных с плавающей запятой типа «float». Передача значений текущего и калибровочного сопротивлений образцов, а также сервисной информации и текущего значения температуры в терминальное устройство, производится посредством интерфейса UART. Индикация рабочего и калибровочного режимов осуществляется при помощи LED-индикаторов, подключенных к цифровому выходу микроконтроллера.

Алгоритм работы созданного авторами программного обеспечения показан на рисунке 2.

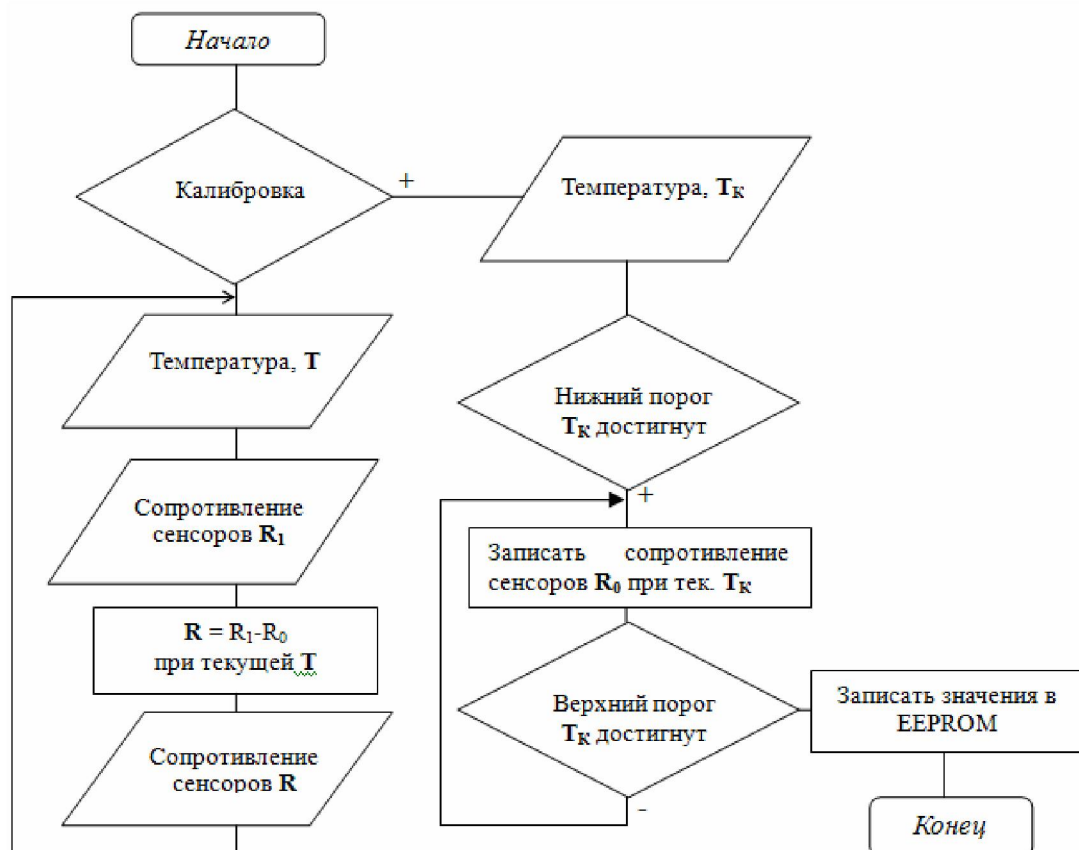


Рис. 2. Блок-схема алгоритма процессов начальной калибровки датчика и обработки информационных сигналов в рабочем режиме

После включения микроконтроллера осуществляется опрос одного из дискретных входов на наличие сигнала активации режима калибровки. Сигнал на активацию начальной калибровки формируется схемой, связанной с органами управления датчика, но им также мо-

жет служить внешнее или внутреннее прерывание микроконтроллера. При наличии такого сигнала запускается циклическая процедура. В рамках этой процедуры происходит измерение текущего значения температуры и вычисление электросопротивления каждого магниточувствительного элемента датчика. Процедура запускается и останавливается автоматически в пределах установленных значений температуры калибровки. Измеренные значения записываются в энергонезависимую память микроконтроллера по окончании процесса начальной калибровки. В зависимости от типа используемого микроконтроллера, начальная калибровка может производиться до десяти тысяч раз без риска деградации энергонезависимой памяти.

Если после подачи питания на микроконтроллер сигнал активации процедуры калибровки отсутствует, то запускаются процедуры рабочего режима опроса АЦП и осуществляется вычисление текущих значений температуры и сопротивления магниточувствительных элементов. Значения электросопротивления в отсутствии магнитного поля, используемые при расчете, считываются из EEPROM микроконтроллера и передаются в интерфейс UART, а затем посредством преобразователя «UART-USB» в USB-порт, подключаемый к внешнему терминальному устройству.

Протестированная на эталонных резисторах точность определения электросопротивления датчиком составляет порядка 2 %. Чувствительность датчика (в единицах изменения сопротивления, отнесенного к напряженности магнитного поля «Н») – приблизительно 0,2 Ohm / кОе в диапазоне значений «Н» от 0 до 2 кОе при 120 К (при температуре 300 К – примерно в 2 раза меньше). Использование синтезированных нами новых образцов манганита с более высоким магнитосопротивлением (см. рис. 3) позволит повысить чувствительность при температуре 120 К до 300 Ohm / кОе.

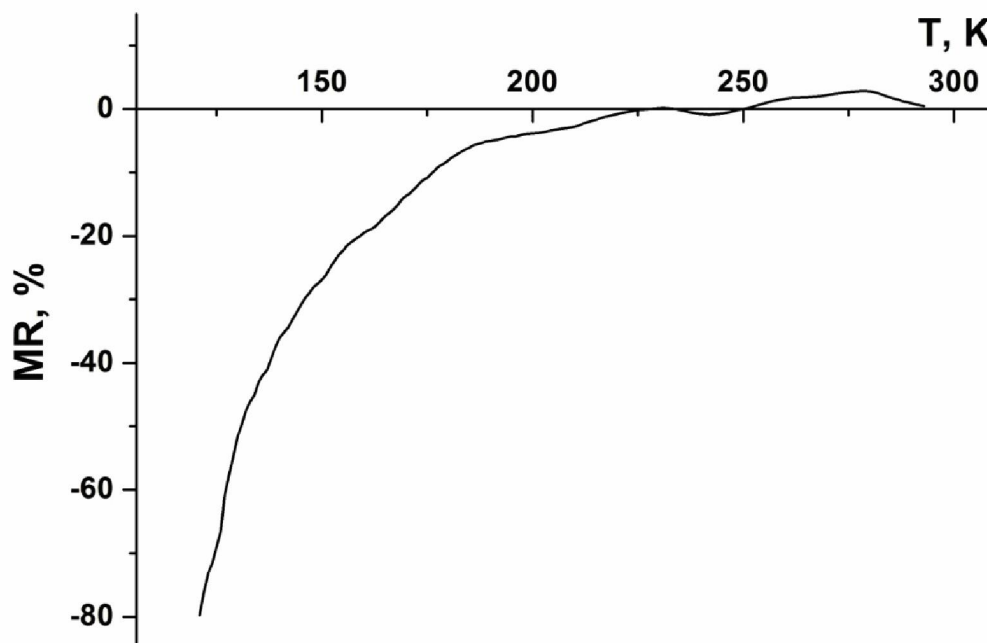


Рис. 3. Температурная зависимость магнитосопротивления манганита $\text{La}_{0,700}\text{Sr}_{0,300}\text{Mn}_{0,900}\text{Mg}_{0,050}\text{Ti}_{0,050}\text{O}_3$ после дополнительной вакуумной термообработки (медные контакты)

Стоит отметить, что быстродействие датчика определяется, прежде всего, скоростью работы АЦП микроконтроллера. Поэтому одним из методов увеличения скорости получения

значений электросопротивления сенсорных элементов может быть использование микроконтроллеров с буферизованными АЦП. Такие микроконтроллеры могут автоматически и без предварительного опроса записывать значения измеренной величины во внутренний стек.

Заключение. Таким образом, в работе предложен способ построения цифровых датчиков напряженности магнитного поля на основе манганитов с эффектом КМС, позволяющий учитывать нелинейные температурные и вольтамперные характеристики как манганитов, так и контактов, а также влияние сопутствующих эффектов при вычислении измеряемых величин. Это обеспечивается наличием процедур автоматической калибровки каждого магниточувствительного элемента, что дает возможность расширить диапазон допустимых значений электромагнитных параметров манганитов и интервал рабочих температур, исключив при этом необходимость термостабилизации датчиков.

Дальнейшее развитие метода предусматривает калибровку датчиков в единицах измерения магнитного поля или использование методов формирования сигналов сравнения измеренной величины с предварительно установленными значениями.

Создание подобных «интеллектуальных» датчиков обеспечивает повышение надежности и достоверности измерений, а также облегчает организацию современных интерфейсов для передачи полученных данных. Использование для обработки данных SoC (Systems-on-Chip) способствует дальнейшему развитию сенсорных матричных систем для анализа неоднородностей распределения магнитных полей, температуры и обеспечения автоматического управления.

Список литературы

1. Balcells LL., Cifre J., Calleja A., Fontcuberta J., Varela M. and Benitez F. Room-temperature magnetoresistive sensor based on thick films manganese perovskite. *Sensors and Actuators*, 2000, vol. 81, pp. 64-66.
2. Balcells LL., Enrich R., Calleja A., Fontcuberta J. and Obradors X. Designing and testing of a sensor based on a magnetoresistive manganese perovskite thick film, *J. Appl. Phys.*, 1997, vol. 81, pp. 4298-4300.
3. Dagotto E., Hotta T. and Moreo A. Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation. *Physics Reports*, 2001, no. 344, pp. 1-153.
4. Demin R.V., Koroleva L.I., Muminov A.Z., and Mukovski Ya.M. Giant volume magnetostriction and colossal magnetoresistance in $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ at room temperature. *Physics of the Solid State*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 322-325.
5. González O. J., Castaño E., Castellano J. C., Gracia F. J. Magnetic position sensor based on nanocrystalline colossal magnetoresistances. *Sensors and Actuators*, 2001, vol. A92, pp. 137-143.
6. Karpasyuk V., Smirnov A., and Badelin A. Ceramic Manganites with Contacts of Various Metals in Magnetic Field Sensors. *World Applied Sciences Journal*, 2014, vol. 32, no. 10, pp. 2028-2031.
7. Karpasyuk V.K., Badelin A.G., Smirnov A.M., Sorokin V.V., Evseeva A., Doyutova E., Shchepetkin A.A. N-type current-voltage characteristics of manganites. *Journal of Physics: Conf. Series*, 2010, vol. 200, 052026 (pp.4).
8. Koroleva L.I., Zashchirinski D.M., Khapaeva T.M., Gurski L.I., Kalanda N.A., Trukhan V.M., Szymczak R., Krzumanska B. Magnetic, electrical, magnetoelectrical, and magnetoelastic properties of $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_{3-y}$ manganites. *Physics of the Solid State*, 2010, vol. 52, no. 1, pp. 96-100.
9. Merkulov D., Badelin A., Estemirova S. and Karpasyuk V. Mechanisms of Substituting Quadrivalent Ions Influence on the Properties of La-Sr manganites. *Acta Physica Polonica A*, 2015, vol. 127, no. 2, pp. 248-250.
10. Rinkevich A.B., Nosov A.P., Rigmant M.B., Vasil'ev V.G., and Vladimirova E.V. Magnetic-field sensors based on lead-doped lanthanum manganites. *Russ. J. Nondestructive Testing*, 2006, vol. 42, pp. 516-524.
11. Volkov N. V. Spintronics: manganite-based magnetic tunnel structures. *Physics-Uspekhi*, 2012, vol. 55, no. 3, pp. 250-269.
12. Yunhui Hu, Memmert U., Hartmann U. Magnetic field sensors from polycrystalline manganites. *Sensors and Actuators*, 2001, vol. A91, pp. 26-29.

References

1. Balcells LL., Cifre J., Calleja A., Fontcuberta J., Varela M. and Benitez F. Room-temperature magnetoresistive sensor based on thick films manganese perovskite. *Sensors and Actuators*, 2000, vol. 81, pp. 64-66.
2. Balcells LL., Enrich R., Calleja A., Fontcuberta J. and Obradors X. Designing and testing of a sensor based on a magnetoresistive manganese perovskite thick film, *J. Appl. Phys.*, 1997, vol. 81, pp. 4298-4300.
3. Dagotto E., Hotta T. and Moreo A. Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation. *Physics Reports*, 2001, no. 344, pp. 1-153.
4. Demin R.V., Koroleva L.I., Muminov A.Z., and Mukovski Ya.M. Giant volume magnetostriction and colossal magnetoresistance in $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ at room temperature. *Physics of the Solid State*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 322-325.
5. González O. J., Castaño E., Castellano J. C., Gracia F. J. Magnetic position sensor based on nanocrystalline colossal magnetoresistances. *Sensors and Actuators*, 2001, vol. A92, pp. 137-143.
6. Karpasyuk V., Smirnov A., and Badelin A. Ceramic Manganites with Contacts of Various Metals in Magnetic Field Sensors. *World Applied Sciences Journal*, 2014, vol. 32, no. 10, pp. 2028-2031.
7. Karpasyuk V.K., Badelin A.G., Smirnov A.M., Sorokin V.V., Evseeva A., Doyutova E., Shchepetkin A.A. N-type current-voltage characteristics of manganites. *Journal of Physics: Conf. Series*, 2010, vol. 200, 052026 (pp.4).
8. Koroleva L.I., Zashchirinski D.M., Khapaeva T.M., Gurski L.I., Kalanda N.A., Trukhan V.M., Szymczak R., Krzumanska B. Magnetic, electrical, magnetoelectrical, and magnetoelastic properties of $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_{3-y}$ manganites. *Physics of the Solid State*, 2010, vol. 52, no. 1, pp. 96-100.
9. Merkulov D., Badelin A., Estemirova S. and Karpasyuk V. Mechanisms of Substituting Quadrivalent Ions Influence on the Properties of La-Sr manganites. *Acta Physica Polonica A*, 2015, vol. 127, no. 2, pp. 248-250.
10. Rinkevich A.B., Nosov A.P., Rigmant M.B., Vasil'ev V.G., and Vladimirova E.V. Magnetic-field sensors based on lead-doped lanthanum manganites. *Russ. J. Nondestructive Testing*, 2006, vol. 42, pp. 516-524.
11. Volkov N. V. Spintronics: manganite-based magnetic tunnel structures. *Physics-Uspekhi*, 2012, vol. 55, no. 3, pp. 250-269.
12. Yunhui Hu, Memmert U., Hartmann U. Magnetic field sensors from polycrystalline manganites. *Sensors and Actuators*, 2001, vol. A91, pp. 26-29.