

Коробейников А.Г., Исмагилов В.С.,  
Копытенко Ю.А., Птицына Н.Г.

---

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

***Аннотация:** Электрификация дорожного транспорта в настоящее время является одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники. Одной из труднейших задач, вставшей перед всеми производителями электромобилей, является проблема обеспечения электромагнитной безопасности пользователей и электромагнитной совместимости различных устройств находящихся в транспортных системах. Кроме того, имеется озабоченность населения и средств массовой информации по поводу возможных рисков для здоровья и безопасности движения из-за воздействия электромагнитных полей, генерируемые сильными токами, текущими в электропроводах и кабелях электрического автотранспорта. Дополнительно отмечается, что эти токи и генерируемые ими магнитные поля также могут представлять риск для электромагнитной совместимости различных электротехнических средств и электронных устройств электромобиля. В связи с этим, измерение и оценка магнитных полей, а также определение их топологии в электрическом автомобиле в реальном масштабе времени является актуальной задачей. В работе проводится сравнительный анализ методов детектирования магнитных полей в электромобиле с учетом выявленных специфических особенностей этих полей. В статье рассмотрена задача определения основных характеристик магнитных полей в электромобиле. На основании этих характеристик сделан вывод, что наиболее перспективными датчиками магнитного поля для целей электромагнитной безопасности в электромобиле являются традиционные для геофизики магнитостатические датчики, а также современные датчики на основе гигантского импеданса*

***Ключевые слова:** магнитное поле, детекторы магнитного поля, измерение магнитного поля, дорожный транспорт, гибридный автомобиль, электрический автомобиль, электромагнитные поля, экология, электромагнитная безопасность, электромобиль*

### Введение

Эта работа выполнена при поддержке грантов Министерства образования и науки «Методы создания детектирующего оборудования на основе микро- и наноструктур для использования в системах электромагнитной безопасности в электромобилях» (государственный контракт № 11.519.11.1011) и гранта Европейского Сообщества

## Измерительные системы магнитных полей в электромобилях

---

«Электромагнитная безопасность в электрическом автомобиле» (European 7th Framework Program, проект № 265773). Электрификация дорожного транспорта является в настоящее время приоритетным направлением развития науки, технологий и техники. Мы присутствуем при революции в автомобильной промышленности: электромобили и гибриды завоевывают рынок в США и Европе. Но это связано со многими факторами и рисками как то: изменение климата, здоровье населения, зависимость от энергии, а также стоимость исходных материалов.

К 2020 г. на дорогах Европы согласно анализу авторитетной американской аналитической компании Pike Research будет более чем 1.8 миллион чистых электромобилей (EV или BEV), 1.2 миллиона подключаемых гибридных автомобилей (PHEV) и 1.7 миллионов гибридов HEV [1]. К 2020 г. топ-шестерка Европейских стран по выпуску электромобилей будет: Германия, Франция, Норвегия, Англия, Нидерланды и Швеция (67% всего рынка электромобилей). Только в Германии, согласно заявлению федерального канцлера Ангелы Меркель, в 2020 году по дорогам страны должны будет ездить миллион электромобилей.

У России есть все предпосылки занять лидирующие позиции в области разработки, создания и производства электрических транспортных средств. Здесь, в первую очередь, следует отметить значительные запасы необходимых полезных ископаемых (литий, редкоземельные металлы и др.), необходимые для производства электромобилей, емкий рынок, а также высокий уровень фундаментальных научных разработок в областях, связанных с электрическим автомобилестроением (электрохимия, магнитных материалов и др.).

Необходимо отметить, что мировые производители электрического автомобилестроения столкнулись с серьезной проблемой обеспечения электромагнитной безопасности (ЭБ) пользователей электрического автомобильного транспорта. Существует озабоченность населения и средств массовой информации по поводу возможных рисков для здоровья и безопасности движения из-за воздействия электромагнитных полей (ЭМП), которые будут генерироваться в электрическом автотранспорте сильными токами, текущими в электропроводах и кабелях [1]. Эти токи и генерируемые ими магнитные поля (МП) также могут представлять риск для электромагнитной совместимости различных электротехнических средств и электронных устройств электромобиля. Следовательно, для массового запуска в производство электрических автомобилей должна быть еще решена задача обеспечения электромагнитной безопасности.

В связи с этим, измерение и оценка МП, а также определение их топологии в электрическом автомобиле является актуальной задачей. Однако, эта задача осложняется

специфическими чертами МП наблюдаемого в электротранспорте и, в частности, в электромобиле. Эти специфические особенности накладывают серьезные ограничения на выбор методов и средств для детектирования МП в электромобиле.

Цель данной статьи – выявить основные характеристики МП в электромобиле и определить методы и датчики МП, наиболее подходящие для детектирования МП в аспекте ЭБ.

### Магнитные поля в электротранспорте

В то время как во всех типах автомобилей присутствуют внешние ЭМП, включая магнитное поле Земли (МПЗ), а также ЭМП от различных бортовых электронных устройств, электрический и гибридный автомобили генерируют существенные внутренние ЭМП в широком диапазоне частот благодаря своим конструктивным особенностям. Кроме того, электрический автомобиль – новая технология и поэтому работ о детальных магнитных измерениях в них очень мало, а опубликованные статьи по тестированию полей в полностью электрических автомобилях практически полностью отсутствуют [2]. Однако, в электромобилях МП генерируются токами, текущим по токовым системам (провода и кабели) транспортного средства точно так же, как и в других видах электротранспорта. Поэтому МП во всех транспортных системах, работающих на электрическом токе, имеют схожие черты [3-6]. Для примера на Рис. 1 и Рис.2 приведены МП, измеренные в гибридном автомобиле в Австралии [4] и результаты наших измерений в электричке в районе Санкт Петербурга.

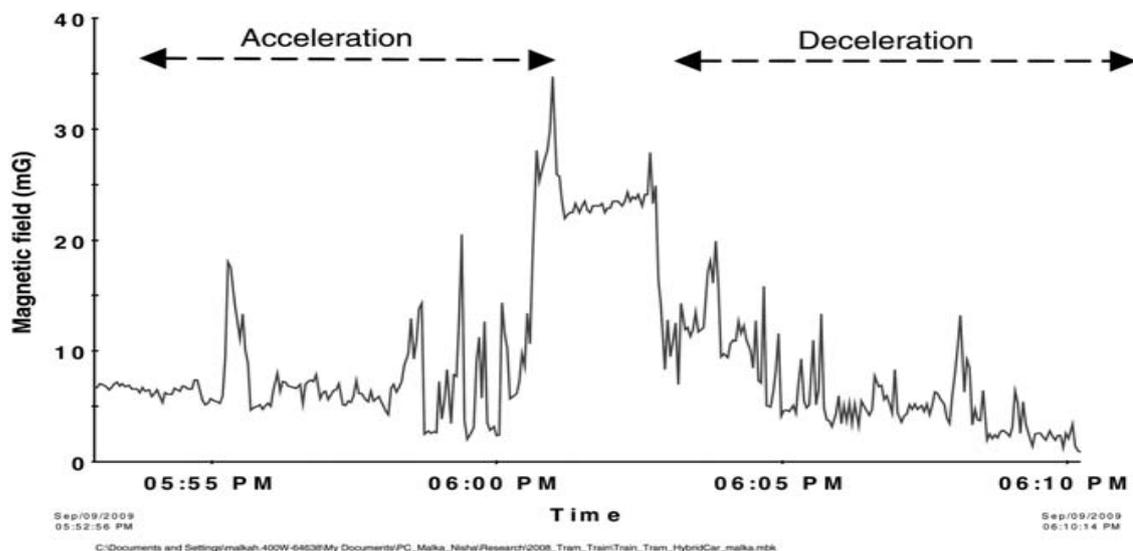


Рис. 1. Магнитные поля на левом переднем сиденье гибридного автомобиля [4]. Интенсивность магнитного поля дана в мГ, по оси ординат отложено время; первый

## Измерительные системы магнитных полей в электромобилях

и последний отрезки времени измерения соответствуют остановке автомобиля, а центральная часть – движению. Высоковольтная батарея расположена под задними сиденьями.

На Рис. 1 приведены вариации полного МП, измеренные в гибридном электромобиле в процессе движения в течение 10 минут [4]. Видно, что наибольших значений МП (в данном примере  $\sim 35$  мГ, т.е.  $3,5$  мкТл) достигает во время ускорения. На Рис. 2 приведены вариации 3-х компонент МП в Санкт Петербургской электричке в течение 20-минутного отрезка времени. Видно, что наибольших значений МП так же, как и в электромобиле, достигает во время ускорения. При этом из Рис. 2 следует, что максимальные вариации поля наблюдаются в Y-компоненте (перпендикулярной оси движения).

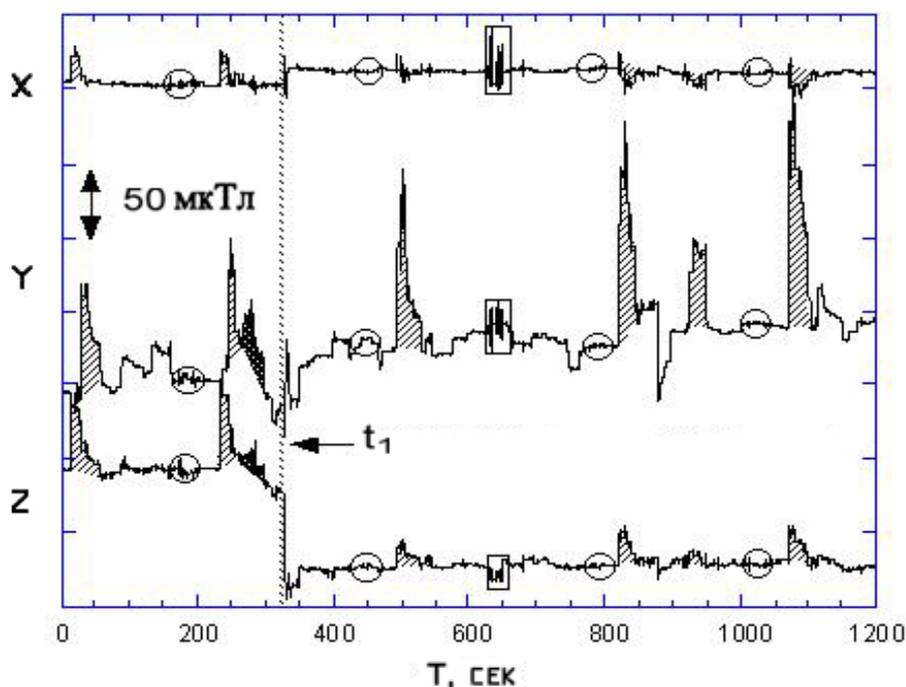


Рис. 2. УНЧ магнитное поле (компоненты X, Y, Z) в электричке (МВС), работающей на постоянном токе, в вагоне с моторами. Заштрихованная область - фаза ускорения, черная область - подстанция, прямоугольник - встречный поезд, круг и эллипс - фаза торможения. В момент  $t_1$  датчик был помещен в точку непосредственно над электродвигателем. Резкое изменение поля в этот момент свидетельствует о больших пространственных градиентах.

Видно, что максимальные значения вариаций здесь  $\sim 100$  мкТл. Из этого же рисунка видно наличие больших пространственных градиентов МП, которые могут достигать  $\sim 100$  мкТ/м [5]. Такие же пространственные градиенты можно ожидать и в

электромобиле. Действительно, как было показано прямыми измерениями, в гибридном автомобиле Крайслер [7], пространственные градиенты доходили до 1000 мГ/м (100 мкТ/м). В этой же работе получены максимальные значения поля ~ 120 мкТл. В вагоне трамвая регистрировались значительные градиенты МП, являющиеся существенным биотропным параметром.

Наши результаты и обзор литературы свидетельствуют, что электрооборудование в электротранспорте и, в частности, в электромобиле, является источником переменного ЭМП, имеющего сильную временную и пространственную неоднородность в диапазоне частот от 0 до сотен мегагерц [3,8]. Это связано с тем фактом, что МП в электротранспорте является суперпозицией полей от многих источников. Непосредственными источниками МП в электротранспорте являются тяговые электродвигатели, батареи, токнесущие элементы, различное электрооборудование, например, пускотормозные сопротивления, групповые переключатели, реостатные блоки, электрические цепи вентиляции, освещения, обогрева и т.д. Электронные устройства на борту также являются источниками электромагнитного излучения, как правило, более высокочастотного, чем МП, связанные с изменениями режима движения электротранспорта.

Из этого следует, что магнитометрические системы для измерения и последующего анализа МП в электрическом автомобиле с целью обеспечения безопасности должны удовлетворять следующим условиям:

- измерять волновую форму, а не усредненную характеристику интенсивности в некотором диапазоне частот;
- измерять поля в диапазоне частот УНЧ (0-10 Гц) и КНЧ (10-300 Гц);
- иметь большой динамический диапазон по амплитуде;
- иметь возможность измерять резкие скачки интенсивности в диапазоне частот 0-20 Гц, а также магнитные импульсы в диапазоне кГц
- работать в полях с большими пространственными градиентами.

### **Методы детектирования магнитных полей**

Для разнообразных целей детектирования МП, встречающихся в окружающей среде, широко используются различные магнитные датчики. МП и цели их детектирования весьма разнообразны: детектирование МПЗ и его вариаций в навигационных целях, величины и направления намагниченности ферромагнитных масс различных конструкций и объектов, величины магнитных моментов постоянных магнитов из различных сплавов а также МП от электрических токов мощных силовых установок, подстанций

## Измерительные системы магнитных полей в электромобилях

и электротранспорта. К последней задаче относится и, актуальное в последнее время, детектирование МП, сгенерированных в процессе работы электрическим автомобилем, с целью ЭБ и экологии.

МП измеряются в большом динамическом диапазоне амплитуд от единиц нанотесла до 1 тесла в широком диапазоне частот от  $10^{-5}$  до  $10^9$  Гц с использованием магнитных датчиков, работающих на различных физических принципах [9,10].

В связи с этим магнитные датчики условно разделяют на три категории для регистрации малых МП ( $\leq 0,1$  нТл), средних МП ( $\leq 1$  мТл) и больших МП ( $> 1$  мТл). В данной работе мы сосредоточили наше внимание на средних МП, которыми в основном являются МП от электрифицированного транспорта. В этот диапазон входят постоянное МПЗ и его вариации, которые присутствуют в автомобиле и искажаются за счет его ферро-магнитной массы и токовых систем. Для проведения измерений таких МП могут быть использованы магнитные датчики, основанные на различных физических принципах: сверхпроводящие магнитометры (SQUID) [9], волоконно-оптические [9], квантовые магнитометры с оптической накачкой [9,11] протонные магнитометры [9,11], феррозондовые [12,13], индукционные [9 - 11], магниторезистивные [9, 11] и магнитостатические (torsion) магнитометры [14,15].

Все вышеперечисленные магнитные датчики обладают своими преимуществами и недостатками. Например, наиболее высокую чувствительность и температурную стабильность имеют SQUID и квантовые магнитометры, однако они могут использоваться только в стационарных лабораторных условиях или на магнитных обсерваториях. Протонные магнитометры широко используются в геофизических приложениях (обсерватории, экспедиции, наземные и морские магнитные съемки). Однако эти приборы зависят от установки относительно магнитного меридиана и их применение ограничено в больших градиентах МП. Ферромагнитные и индукционные приборы используются как в стационарных, так и в полевых условиях. Однако их применение ограничено в сильных МП с большими градиентами. Магниторезистивные датчики (AMR и GMR) [9 - 11] являются наиболее широкополосными малогабаритными, однако имеют ограниченную чувствительность и высокую зависимость от температуры.

Магнитостатические (торсионные) магнитометры регистрируют напряженность поля за счет отклонения магнитной системы или изменения периода ее механических колебаний в исследуемом МП. Магнитостатические магнитометры имеют достаточно высокую чувствительность, независимость от сильных градиентов МП, большой динамический диапазон по амплитуде, плоскую амплитудно-частотную характеристику, просты в изготовлении и экономичны по потреблению питания. Эти магнитометры



## Измерительные системы магнитных полей в электромобилях

биях иррегулярные – они резко меняются в диапазоне от нуля до тысячи мкТ.

Для ответа на многие фундаментальные вопросы ЭБ человека в электрическом автомобиле, и, в частности, для выяснения какой именно параметр МП (частота, амплитуда, поляризация, т.е. геометрические характеристики) может быть ответственным за биологические эффекты, необходимо измерение всех аспектов МП, а не только его амплитуды. Таким образом, необходимо измерять волновую форму поля. Индукционные магнитометры не позволяют это сделать, так как они измеряют производную МП.

Этих недостатков лишены традиционные приборы магнитостатического типа. К тому же магнитостатические магнитометры измеряют три компоненты МП, имеют малые размеры и, в отличие от приборов других типов, способны измерять статическую составляющую МП, что позволяет использовать их для мониторинга полей в электромобиле.

В последние годы появились новые типы магнитометров, основанные на инновационных научных разработках и современных технологиях, а именно магнитометры на основе гигантского магнетосопротивления (ГМС), гигантского магнитного импеданса (ГМИ). Рассмотрим этот способ детектирования МП более подробно.

### Магнитометры на основе гигантского импеданса

Магнетосопротивлением называют зависимость электрического сопротивления образца от величины внешнего МП. Численно его характеризуют величиной:

$$\delta_H = \frac{R(0)}{R(H)},$$

где  $R(0)$  – сопротивление образца в отсутствие МП,

$R(H)$  – его сопротивление в магнитном поле с напряжённостью  $H$  [16,17].

На практике также применяются альтернативные формы записи, отличающиеся знаком выражения и использующие удельное электрическое сопротивление [18,19].

Иногда используют отношение изменения сопротивления к его значению в нулевом поле [17].

Термин «гигантское магнетосопротивление» (ГМС) указывает на то, что величина  $\delta_H$  для многослойных структур значительно превосходит анизотропное магнитное сопротивление, как правило, составляющее не более нескольких процентов [16,20]. Эффект

ГМС был экспериментально открыт в 1988 году двумя научными коллективами независимо друг от друга: лабораториями Альберта Ферта и Петера Грюнберга. Практическая значимость этого открытия была отмечена присуждением Ферту и Грюнбергу Нобелевской премии по физике в 2007 г. Ферт и Грюнберг изучали эффекты, связанные с электрическим сопротивлением структур, включающих в себя ферромагнитные и неферромагнитные материалы. В частности, Ферт занимался проводимостью многослойных плёнок, а Грюнберг в 1986 году открыл обменное взаимодействие антиферромагнитного характера в плёнках Fe/Cr. Была показана сильная зависимость сопротивления образца (изменение до 50 %) от величины внешнего МП.

Можно подобрать достаточно много комбинаций веществ, которые будут обладать эффектом ГМС [21]. Некоторыми из наиболее часто применяющихся и широко исследуемых являются следующие:

$\text{FeCr}^{\circ}$

$\text{Co}_{10}\text{Cu}_{90}$ :  $\delta_H = 40\%$  при комнатной температуре

$\text{Co}_{95}\text{Fe}_5/\text{Cu}$ :  $\delta_H = 110\%$  при комнатной температуре

Величина магнетосопротивления зависит от многих параметров, таких как геометрия прибора, температура образца, толщина слоёв ферромагнитных и немагнитных материалов. При температуре 4,2 К и фиксированной толщине слоя кобальта в 1,5 нм изменение толщины слоя меди  $d_C$  от 1 до 10 нм приводило к резкому уменьшению  $\delta_H$  от 80 до 10 %.

Магнитоимпендансная чувствительность основывается на большом изменении абсолютного значения импеданса магнитомягкого проводника под воздействием приложенного постоянного МП.

Открытие эффекта ГМИ в проволоках (ГМИ эффекта) имело большое значение для производства микромагнитных сенсоров [22,23]. Датчики МП на основе ГМИ эффекта обладают очень высокой чувствительностью. Например, в статье [24] описывается магнитный датчик со следующей конфигурацией – тонкая нить с высоким содержанием кобальта, покрытая немагнитным материалом. Чувствительность такого датчика достигала 20 пТ. Кроме того, датчики МП на базе ГМИ эффекта обладают малым размером, хорошей линейностью, высокой чувствительностью, могут работать в широком диапазоне частот, а также, что немаловажно, имеют низкую стоимость [25-28]. Эти качества делают датчики МП на основе ГМИ эффекта наиболее подходящим современным вариантом для мониторинга электротранспортных МП, производимого для целей экологии человека и ЭБ.

### Заключение

ЭМП во всех видах электротранспорта, в том числе в электромобиле, представляют собой суперпозиции полей, генерируемых множеством источников. Множественность источников ЭМП и вариабельность режимов их эксплуатации определяет специфику электромагнитной обстановки внутри любого электрического транспорта, включая электромобиль. Различные источники генерируют МП различной частоты и амплитуды. Суперпозиция вариаций с разными амплитудами и частотами определяет сложный характер МП, причем это поле весьма изменчиво по времени из-за постоянно изменяющихся режимов движения. Кроме того, внутри электротранспорта МП очень изменчиво в пространстве: например, в электромобиле пространственные градиенты доходят до 100 мкТ/м.

С учетом вышеизложенного способ детектирования МП в электрическом автомобиле с целью повышения электромагнитной совместимости и контроля ЭБ водителей и пассажиров должен включать непрерывную фиксацию формы волны и работу в условиях больших временных и пространственных градиентов поля. Кроме того, прибор должен измерять МП в широком диапазоне частот (от квазистатических до полей с частотой до кГц) и в диапазоне амплитуд 0-200 мкТ. Наш анализ эффективности различных способов детектирования МП показал, что наиболее перспективными датчиками МП для целей ЭБ являются традиционные для геофизики магнитостатические датчики, а также современные датчики на основе ГМИ.

### Библиография:

1. Птицына Н.Г., Копытенко Ю. А., Исмагилов В.С., Коробейников А.Г., Электромагнитная безопасность электротранспортных систем: основные источники и параметры магнитных полей//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.-Санкт-Петербург: СПбНИУ ИТМО, 2013.-Вып. 84.-№ 2.
2. Анализ и синтез сложных систем.-С.65-71.-180 с.-ISSN 2226-1494. 2. Pike Research. A part of Navigant, 2012, <http://www.pikeresearch.com/>. Дата последнего доступа 24.01.2014
3. Muc A.M., Electromagnetic Fields Associated with Transportation Systems, Radiation Health and Safety Consulting, Contract Report 4500016448, Air Health Effects Division, Healthy Environments and Consumer Safety Branch Health, Canada, 2002
4. Halgamuge, M. N., C. D. Abeyrathne and P. Mendis. Measurements performed in electric trains-Comparison with ICNIRP Limit & Laboratory Experiments. "Measurement and Analysis of Electromagnetic Fields from Trams, Trains and Hybrid Cars", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 141, Issue 3, pp 255-268, 2010.

5. Птицына Н.Г., Виллорези Дж., Копытенко Ю.А. Тясто М.И. Магнитные поля на электротранспорте и экология человека//Санкт-Петербург, Изд. Нестор-История. 2010. 120 с.
6. А.Г. Коробейников, Н.Г. Птицына, В.С. Исмагилов, Ю.А. Копытенко Вычисление топологии магнитного поля в электромобиле с использованием фазово-градиентного метода // Программные системы и вычислительные методы.-2013.-1.-С. 45-55. DOI: 10.7256/2305-6061.2013.01.4
7. Snyder M. Magnetic Shielding for Electric Vechicles. Program Review. Contract DAAE07-93-C-R107. Army TACOM, Chrysler Corp. 1995.
8. Ptitsyna N., Ponzetto A. Magnetic Fields Encountered in Electric Transport: Rail Systems, Trolleybus and Cars. IEEE Conference Publications. Proceedings of the Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2012 International Symposium on Fields, Waves & Electromagnetics, Rome, Italy, 17-21 Sep., P.1 – 5, 2012. DOI 10.1109/EMCEurope.2012.6396901 . 2012.
9. Lenz J.E. A Review of Magnetic Sensors, Proc IEEE, Vol. 78, No. 6:973-989. 1990
10. Bartland T., Caruso M., Schneider R., Smith C. A New Perspective on Magnetic Field Sensing. Sensors. Electric/Magnetic, December 1, 1998.
11. Janicke J.M. The Magnetic Measurement Handbook, New Jersey: Magnetic Research Press. 1994
12. Ramsden E. Sept. «Measuring Magnetic Fields with Fluxgate Sensors,» Sensors:87-90. 1994.
13. Ripka P. «Review of Fluxgate Sensors,» Sensors and Actuators A, 33:129-141. 1996.
14. Сергеев В.Г., Шихин А.Я. Магнитоизмерительные приборы и установки//М. Энергоиздат, Электроизмерительные приборы; Вып. 24. 152 С.,1982.
15. Kopytenko Y.A., Kopytenko E.A., Amosov L.G., Zaitsev D.B., Voronov P.M., Timoshenkov Y.P., Magnetovariation complex MVC-2. Proc. of VI Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing. Dourbes, Belgium, 1994.
16. Hirota, E., Sakakima, H., Inomata, K. Giant Magneto-Resistance Devices. Springer, 2002, P. 30, 177 p. , ISBN 978-3-540-41819-1
17. Муковский Я. М. Получение и свойства материалов с колоссальным магнетосопротивлением // Рос. хим. ж. , 2001, Т. XLV, № 5-6, С. 32-41.
18. Нагаев Э. Л. Манганиты лантана и другие магнитные проводники с гигантским магнетосопротивлением //Успехи физических наук. 1996, Т. 166, № 8, С. 833-858. DOI:10.3367/UFNr.0166.199608b.0833
19. Никитин С. А. Гигантское магнетосопротивление // Соросовский обозревательный журнал. 2004, Т. 8, № 2, С. 92-98.
20. Chappert C., Fert A. and Nguyen Van Dau F. (2007). «The emergence of spin electronics in data storage». Nature Materials 6: 813–823. DOI:10.1038/nmat2024.
21. Coehoorn R. Novel Magnetoelectronic Materials and Devices. Giant magnetoresistance and magnetic interactions in exchange-biased spin-valves. Lecture Notes. Technische Universiteit Eindhoven (2003).

22. Panina LV, Mohri K. Magneto-impedance effect in amorphous wires. *Appl Phys Lett*; 65: 1189-91. 1994.
23. Beach R, Berkowitz A. Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire. *Appl Phys Lett*; 64: 3652-4. 1994
24. Gudoshnikov S., Zhukova A., Zhukova A., Sitnov Yu. Correlation of magnetic properties and Giant magnetoimpedance characteristics of Co-rich amorphous microwires. *Phis. Status Solidi, A* 206, No. 4, P. 625-629, 2009.
25. Cobeno AF, Zhukov A, Blanco JM, Gonzalez J. Giant magnetoimpedance effect in CoMnSiB amorphous microwires. *J Magn Mater*; 234: L359-65. 2001.
26. Honkura Y. Development of amorphous wire type MI sensors for automobile use. *J Magn Mater*; 249: 375-81. 2002.
27. Zhukova V, Ipatov M, Zhukov A. Thin magnetically soft wires for magnetic microsensors. *Sensors*; 9: 9216-40. 2009.
28. Geliang Yu., Chao X., Hong X. Design of a GMImagneticsensor based on longitudinal excitation. *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol 161, Issues 1–2, pp 72–77, 2010.

### References:

1. Ptitsyna N.G., Kopytenko Yu. A., Ismagilov V.S., Korobeinikov A.G., *Elektromagnitnaya bezopasnost' elektrotransportnykh sistem: osnovnye istochniki i parametry magnitnykh polei// Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki.-Sankt-Peterburg: SPBNIU ITMO, 2013.-Vyp. 84.-№*
2. *Analiz i sintez slozhnykh sistem.-S.65-71.-180 s.-ISSN 2226-1494. 2. Pike Research. A part of Navigant, 2012, <http://www.pikeresearch.com/>. Data poslednego dostupa 24.01.2014*
3. Muc A.M., *Electromagnetic Fields Associated with Transportation Systems, Radiation Health and Safety Consulting, Contract Report 4500016448, Air Health Effects Division, Healthy Environments and Consumer Safety Branch Health, Canada, 2002*
4. Halgamuge, M. N., C. D. Abeyrathne and P. Mendis. Measurements performed in electric trains-Comparison with ICNIRP Limit & Laboratory Experiments. "Measurement and Analysis of Electromagnetic Fields from Trams, Trains and Hybrid Cars", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 141, Issue 3, pp 255-268, 2010.
5. Ptitsyna N.G., Villorezi Dzh., Kopytenko Yu.A. Tyasto M.I. *Magnitnye polya na elektrotransporte i ekologiya cheloveka//Sankt-Peterburg, Izd. Nestor-Istoriya. 2010. 120 s.*
6. A.G. Korobeinikov, N.G. Ptitsyna, V.S. Ismagilov, Yu.A. Kopytenko *Vychislenie topologii magnitnogo polya v elektromobile s ispol'zovaniem fazovo-gradientnogo metoda // Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody.-2013.-1.-C. 45-55. DOI: 10.7256/2305-6061.2013.01.4*
7. Snyder M. *Magnetic Shielding for Electric Vechicles. Program Review. Contract DAAE07-93-C-R107. Army TACOM, Chrysler Corp. 1995.*
8. Ptitsyna N., Ponzetto A. *Magnetic Fields Encountered in Electric Transport: Rail Systems, Trolleybus and Cars. IEEE Conference Publications. Proceedings of the Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2012 International Symposium on Fields, Waves & Electromagnetics, Rome, Italy, 17-21 Sep., P.1 – 5, 2012. DOI 10.1109/*

EMCEurope.2012.6396901 . 2012.

9. Lenz J.E. A Review of Magnetic Sensors, Proc IEEE, Vol. 78, No. 6:973-989. 1990

10. Bartland T., Caruso M., Schneider R., Smith C. A New Perspective on Magnetic Field Sensing. Sensors. Electric/Magnetic, December 1, 1998.

11. Janicke J.M. The Magnetic Measurement Handbook, New Jersey: Magnetic Research Press. 1994

12. Ramsden E. Sept. «Measuring Magnetic Fields with Fluxgate Sensors,» Sensors:87-90. 1994

13. Ripka P. «Review of Fluxgate Sensors,» Sensors and Actuators A, 33:129-141. 1996.

14. Sergeev V.G., Shikhin A.Ya. Magnitoizmeritel'nye pribory i ustanovki//M. Energoizdat, Elektroizmeritel'nye pribory; Vyp. 24. 152 S.,1982.

15. Kopytenko Y.A., Kopytenko E.A., Amosov L.G., Zaitsev D.B., Voronov P.M., Timoshenkov Y.P., Magnetovariation complex MVC-2. Proc. of VI Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing. Dourbes, Belgium, 1994.

16. Hirota, E., Sakakima, H., Inomata, K. Giant Magneto-Resistance Devices. Springer, 2002, P. 30, 177 p. , ISBN 978-3-540-41819-1

17. Mukovskii Ya. M. Poluchenie i svoistva materialov s kolossal'nym magnetosoprotivleniem // Ros. khim. zh. , 2001, T. XLV, № 5-6, S. 32-41.

18. Nagaev E. L. Manganity lantana i drugie magnitnye provodniki s gigantskim magnetosoprotivleniem //Uspekhi fizicheskikh nauk. 1996, T. 166, № 8, S. 833-858.

DOI:10.3367/UFNr.0166.199608b.0833

19. Nikitin S. A. Gigantskoe magnetosoprotivlenie // Sorosovskii obozrevatel'nyi zhurnal. 2004, T. 8, № 2, S. 92-98.

20. Chappert C., Fert A. and Nguyen Van Dau F. (2007). «The emergence of spin electronics in data storage». Nature Materials 6: 813–823. DOI:10.1038/nmat2024.

21. Coehoorn R. Novel Magnetoelectronic Materials and Devices. Giant magnetoresistance and magnetic interactions in exchange-biased spin-valves. Lecture Notes. Technische Universiteit Eindhoven (2003).

22. Panina LV, Mohri K. Magneto-impedance effect in amorphous wires. Appl Phys Lett; 65: 1189-91. 1994.

23. Beach R, Berkowitz A. Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire. Appl Phys Lett; 64: 3652-4. 1994

24. Gudoshnikov S., Zhukova A., Zhukova A., Sitnov Yu. Correlation of magnetic properties and Giant magnetoimpedance characteristics of Co-rich amorphous microwires. Phis. Status Solidi, A 206, No. 4, P. 625-629, 2009.

25. Cobeno AF, Zhukov A, Blanco JM, Gonzalez J. Giant magnetoimpedance effect in CoMnSiB amorphous microwires. J Magn Mater; 234: L359-65. 2001.

26. Honkura Y. Development of amorphous wire type MI sensors for automobile use. J Magn Mater; 249: 375-81. 2002.

27. Zhukova V, Ipatov M, Zhukov A. Thin magnetically soft wires for magnetic microsensors. Sensors; 9: 9216-40. 2009.

28. Geliang Yu., Chao Kh., Hong X. Design of a GMImagneticsensor based on longitudinal