

УДК 621.317.42

ФАЗОВО-ГРАДИЕНТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОМОБИЛЕ²

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

При эксплуатации электромобилей и гибридных автомобилей необходим контроль магнитного поля в реальном масштабе времени, например, для пожарной и электромагнитной безопасности. В работе предложен метод измерения магнитных полей на борту электрического автомобиля с учетом специфики этих полей. Метод опирается на дифференциальные методы измерения и минимизирует количество магнитометрических датчиков.

Ключевые слова: электромобиль, магнитное поле, электромагнитная безопасность, измерение магнитного поля, фазово-градиентный метод.

Введение

Электрификация дорожного транспорта является в настоящее время приоритетным направлением развития науки, технологий и техники. Это связано с такими факторами и рисками, как изменение климата, здоровье населения, зависимость от энергии, а также стоимость исходных материалов. Дорожный транспорт является основным источником загрязнения среды в месте нахождения автомобиля. В городах концентрация вредных выхлопов особенно велика. Растет число доказательств, связывающих автомобильное загрязнение городов с серьезными рисками для здоровья, как, например, с респираторными и кардио-респираторными заболеваниями, а также с раком легких. По сведениям Всемирной организации здравоохранения, вредные выхлопы автомобилей приводят к большему количеству смертей, чем автомобильные аварии. Исходя из этого, Европейское Сообщество в последнее время инвестирует в разработки экологичного автомобиля «green car» суммы порядка миллиарда евро. Замена обычных автомобилей, использующих двигатели внутреннего сгорания, на электрический автотранспорт – электромобили и их гибриды – представляется логичным решением и панацеей от экологических бед.

Преимуществом электромобилей по сравнению с автомобилями, оснащенными двигателями внутреннего сгорания, является отсутствие вредных выхлопов в месте нахождения автомобиля и экологичность, ввиду отсутствия нефтяного топлива, антифризов, трансмиссионных и моторных масел, а также фильтров для этих жидкостей. Дополнительным существенным преимуществом является низкая стоимость эксплуатации электромобиля, особенно в Российской Федерации, где стоимость электроэнергии сравнительно невелика, в первую очередь, в ночное время, когда, скорее всего, и будут заряжаться автомобили.

² Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, государственный контракт № 11.519.11.1011.

Необходимость анализа магнитных полей в электромобиле

С другой стороны, мировые производители электрических автомобилей столкнулись с серьезной проблемой обеспечения электромагнитной безопасности 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. Эта озабоченность подкрепляется многочисленными работами, свидетельствующими о том, что ЭМП промышленной частоты (50–60 Гц) могут представлять угрозу здоровью, в частности, могут провоцировать канцерогенные заболевания, опухоли мозга, различные неврологические нарушения, депрессии [1–4]. Кроме того, магнитные поля (МП) сверхнизкой частоты замедляют реакцию человека, что может представлять серьезную угрозу безопасности движения, если такие явления наблюдаются у водителей [3]. При этом следует учесть два «отягчающих обстоятельства»: во-первых, водители и пассажиры электромобиля будут находиться в непосредственной близости к источникам МП, и, во-вторых, они будут подвергаться экспозиции полей в течение длительного времени. Мы пользуемся феном, электробритвой или микроволновой печью в течение нескольких минут или десятков минут, а в автомобиле люди часто проводят многие часы. Оба вышеперечисленных фактора увеличивают риск негативного воздействия МП.

В то время как во всех типах автомобилей присутствуют внешние ЭМП, включая МП Земли, а также ЭМП от различных бортовых электронных устройств, электрический и гибридный автомобили благодаря своим конструктивным особенностям генерируют существенные внутренние ЭМП в широком диапазоне частот. Электрооборудование в электромобилях является источником переменного ЭМП, имеющего сильную временную и пространственную неоднородность в диапазоне частот от долей герца до сотен мегагерц [5–7]. С экологической точки зрения наиболее важной является магнитная составляющая ЭМП, так как доказано, что именно она может приводить к негативным последствиям для здоровья. МП также могут представлять риск для электромагнитной совместимости различных электротехнических средств и электронных устройств электромобиля.

Таким образом, измерение и оценка МП, а также определение их топологии в электрическом автомобиле является актуальной задачей. До сих пор работ о детальных магнитных измерениях в гибридных автомобилях очень мало, а опубликованные статьи по тестированию МП в полностью электрических автомобилях практически отсутствуют [5, 8]. Однако суммирование известных к настоящему времени сведений и сравнение с данными, полученными для других видов электрического транспорта [9–13] позволило выявить характерные, общие для таких полей, черты. В отличие от синусоидальных полей от линий передач (на частоте 50 или 60 Гц), ЭМП в электрическом автомобиле являются мультичастотными полями, т.е. они являются суперпозицией полей, генерируемых множеством источников на борту автомобиля. Кроме того, выявлено, что МП в электромобиле являются иррегулярными, быстро меняющимися во времени и крайне неоднородными в пространстве салона.

Перечисленные характерные черты МП в электромобиле осложняют подробные и точные измерения этих полей в салоне движущегося автомобиля. Для корректных измерений полей и их градиентов в салоне и в непосредственной близости от электромобиля необходимо учитывать большую пространственную неоднородность поля в салоне автомобиля, аддитивную промышленную помеху, а также естественное постоянное и переменное геомагнитное поле в том же диапазоне частот [3, 14].

Для мониторинга внутри салона автомобиля пространственно сильно неоднородных МП и построения 3D-топологии необходимо использование многочисленных равномерно распределенных датчиков МП. В настоящей работе для решения этой задачи, предлагается метод тестирования МП в электромобиле, базирующийся на дифференциальных методах измерения.

Фазово-градиентный метод

Одним из дифференциальных методов является фазово-градиентный метод, впервые предложенный в [15–20] для исследования усилителей ультранизких частот ($F=0,001–100$ Гц) геомагнитных вариаций. Этот метод позволяет по трем трехкомпонентным магнитным датчикам, расположенным треугольником на небольшом расстоянии друг от друга (магнитный градиентометр), построить вектора градиентов и фазовых скоростей магнитных вариаций для любой из трех компонент МП. Вектора градиентов геомагнитных волн, как правило, направлены к локальному источнику пульсаций, а вектора фазовых скоростей – от источника.

Градиенты и фазовые скорости магнитных вариаций можно определять по фазовым задержкам и разностям величин амплитуд вариаций между двумя любыми парами магнитного градиентометра, состоящего из трех разнесенных датчиков. Поскольку координаты магнитных датчиков и расстояние между ними известно, то можно определить градиенты и фазовые скорости для двух пар датчиков, выбранных из трех датчиков магнитного градиентометра, и затем построить вектор фазовой скорости и градиента вариаций следующим образом:

для вектора фазовой скорости:

$$\begin{cases} \alpha = \operatorname{arctg} \frac{V_{12} \cos(a_1) - V_{13} \cos(a_2)}{V_{12} \sin(a_1) + V_{13} \sin(a_2)} ; \\ V = V_{12} \cos(\alpha + a_1) \end{cases} \quad (1)$$

для вектора градиента:

$$\begin{cases} \alpha = \operatorname{arctg} \frac{G_{13} \cos(a_1) - G_{12} \cos(a_2)}{G_{12} \sin(a_1) + G_{13} \sin(a_2)} . \\ G = G_{12} / \sin(\alpha + a_1) \end{cases} \quad (2)$$

В выражениях (1)–(2) $V_{12}, V_{13}, G_{12}, G_{13}$ – величины фазовых скоростей и градиентов в направлении между парами трехкомпонентных магнитных датчиков 1 и 2, 1 и 3; α – направление соответствующего вектора относительно заданной оси (V и G – величины фазовой скорости и градиента). Углы a_1 и a_2 определяются через координаты магнитных датчиков 2 и 3 (базовый датчик 1 расположен в начале системы координат): $a_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{x_2}{y_2} \right)$, $a_2 = \operatorname{arctg} \left(\frac{x_3}{y_3} \right)$.

Градиенты и фазовые скорости могут быть выражены и через другие тригонометрические функции [16–18]. Использование выражений (1)–(2) в этом методе предполагает достаточно хорошую синхронизацию работы всех трех магнитных датчиков (если данные не записываются в один многоканальный аналого-цифровой преобразователь) и высокую дискретность регистрируемых данных.

В рамках модели плоской электромагнитной волны величина фазовой скорости между двумя точками определяется через амплитуды соответствующих компонент вариаций МП с учетом фазовой задержки следующим образом [15, 19]:

$$V_{12} = \frac{2\pi d_{12}}{T \ln \left[B_1(t) / B_2(t + \tau) \right]} . \quad (3)$$

В выражении (3) для магнитных вариаций с периодом T величины B_1 и B_2 определяются в момент времени t на первой станции и в момент времени $t + \tau$ на второй станции (τ – фазовая задержка при прохождении магнитной волны расстояния d_{12} между двумя станциями). Определив по (3) фазовые скорости V_{12} и V_{13} , можно затем воспользоваться выражениями (1) для определения направления и величины вектора фазовой скорости электромагнитных волн. При применении этого метода в качестве величин B_1 и B_2 могут быть использованы среднеквадратичные значения амплитуд.

Применение фазово-градиентного метода для измерения магнитных полей в автомобиле

Обозначим величину и градиент магнитного поля, создаваемого электрооборудованием автомобиля в какой-то точке внутри салона, как B_1 и ΔB_1 , а величину поля и градиент внешних источников (индустриальная помеха и естественное постоянное и переменное геомагнитное поле) как B_2 и ΔB_2 . Пусть $B_2 \geq B_1$, а ΔB_1 много больше ΔB_2 . Тогда разность полей в двух точках внутри салона, поскольку ΔB_1 много больше ΔB_2 , с большой точностью будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta B = (B_1 + \Delta B_1 + B_2 + \Delta B_2) - (B_1 + B_2) = \Delta B_1 + \Delta B_2 \approx \Delta B_1,$$

т.е. разность ΔB магнитных полей в двух точках внутри салона является градиентом внутренних источников автомобиля, а внешние поля исключаются.

Источники переменного ЭМП в автомобилях имеют небольшие размеры, и их можно рассматривать как излучающие точечные диполи, поля от которых затухают с расстоянием по кубическому закону, поэтому градиенты ЭМП внутри автомобиля на расстояниях до нескольких метров должны быть весьма велики. Действительно, как было показано прямыми измерениями в гибридном автомобиле «Крайслер» [21], пространственные градиенты доходили до 1 Гс/м (100 мкТл/м). В то же время градиенты внешних источников малы в связи с их удаленностью и большими размерами.

Для того чтобы выявить топологию МП в автомобиле с учетом его крайней пространственной неоднородности, датчики в салоне должны располагаться достаточно плотно, т.е. количество датчиков должно быть не менее 10–20 (равномерно на расстоянии десятка сантиметров на уровне пола, на уровне головы водителей и пассажиров и т.д.).

Для уменьшения количества датчиков предлагается использовать фазово-градиентный метод. Так как мы предполагаем, что МП от внутренних источников меняются с расстоянием как поле диполя, то мы можем использовать этот метод для построения трехмерного распределения МП внутри салона. В этом случае минимальное количество трехкомпонентных магнитных датчиков – четыре. Три из них образуют треугольник (например, два датчика на спинках сидений и один вблизи двигателя/батареи), необходимый для измерения полей и градиентов в плоскости треугольника, четвертый поднят вверх или опущен вниз для построения градиентов, направленных вертикально. В пирамиде можно выделить четыре тройки датчиков.

Используя эти тройки, можно построить четыре вектора градиентов МП. Величина и направление этих векторов позволяет интерполировать МП на весь салон электроавтомобиля.

На рисунке представлена примерная схема расположения минимального количества датчиков (4 сенсора) в плоскости пола автомобиля (рисунок, а) и в продольном сечении, перпендикулярном полу (рисунок, б).

Практическую точность метода следует определить в эксперименте.

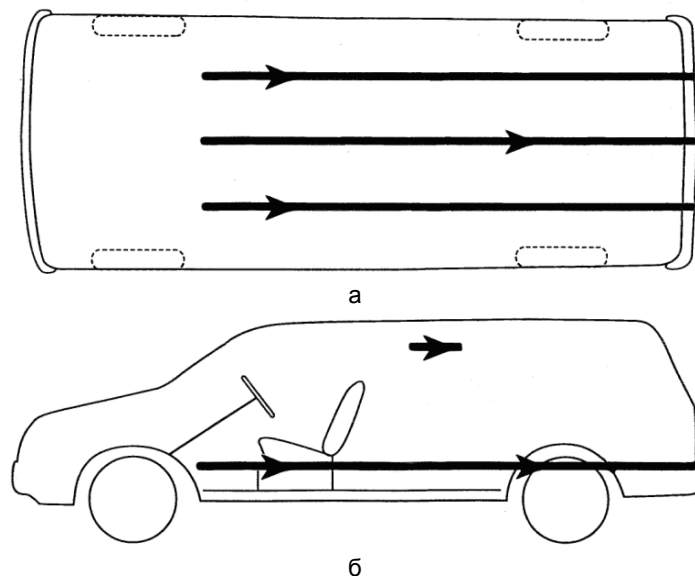


Рисунок. Схема расположения минимального количества датчиков для измерения магнитного поля и его пространственных градиентов в электрическом автомобиле: вид сверху (а); вид сбоку (б). Стрелки обозначают позицию датчиков

Заключение

Предложенный метод позволит разделить внешние и внутренние поля и определить источники увеличенных магнитных полей. В результате можно будет определить 3D-топологию магнитных полей в электрическом/гибридном автомобиле и выявить критические точки для электромагнитной совместимости, а также особенности поля и их источники, потенциально опасные для здоровья водителей и пассажиров.

Литература

1. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А., Степанов В.С., Пальцев Ю.П. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России. – М., 1997. – 91 с.
2. Portier C.J., Wolfe M.S. eds. Assessment of Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields. – NIEHS Working Group Report NIH Publication. – 1998. – № 98-3981. – 508 p.
3. Птицына Н.Г., Виллорези Дж., Дорман Л.И., Ючки Н., Тясто М.И. Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля как факторы, потенциально опасные для здоровья // Успехи физических наук. – 1998. – Т. 168. – № 7. – С. 767–791.
4. Григорьев Ю.Г., Степанов В.С., Григорьев О.А., Меркулов А.В. Электромагнитная безопасность человека. Справочно-информационное пособие. – М.: Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений, 1999. – 146 с.
5. 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. – 52 p.
6. Schick M. and Jakobus U. Advanced EMC modeling features in FEKO for Automotive Problems // Proceedings of the 22th International Conference on Electromagnetic Compatibility «EMC Europe 2012». – Rome, Italy, 2012. – 17–21 September. – 22 p.
7. Ptitsyna N., Ponzetto A. Magnetic Fields Encountered in Electric Transport: Rail Systems, Trolleybus and Cars // Proceedings of the 22th International Conference on Electromagnetic Compatibility «EMC Europe 2012». – Rome, Italy, 2012. – 17–21 September. – P. 1–6.
8. Swiss Federal Office of Public Health, Cars, hybrid cars. – Technical Report, 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/02377/index.html?lang=en>, свободный. Яз. англ. (дата обращения – 05.11.2012).

9. Vedholm K., Hamnerius Y.K. Personal Exposure Resulting from Low Level Low Frequency Electromagnetic Fields in Automobiles // Second World Congress for Electricity and Magnetism in Medicine and Biology. – Bologna, Italy, 1997. – June 8–13. – Abstract F-9. – 445 p.
10. Farag A.S., Hussain H., Said I., Abdel Kader M., Abdul Rahman N. Electromagnetic Fields Associated with Transportation Systems in Malaysia // Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN (ICNIR 2003). – Universiti Tenaga Nasional Selangor, Malaysia, 2003. – 15 p.
11. Ptitsyna N.G., Villoresi G. and Kopytenko Yu.A. Magnetic fields from railway: environmental aspects // Railway Transportation: Policies, Technology and Perspectives. – NY, Nova publishers, 2009. – P. 87–140.
12. Птицына Н.Г., Виллорези Дж., Копытенко Ю.А. Тясто М.И. Магнитные поля на электротранспорте и экология человека. – СПб: Нестор-История, 2010. – 120 с.
13. Halgamuge M.N., Abeyrathne C.D., Mendis P. Measurement and Analysis of Electromagnetic Fields from Trams, Trains and Hybrid Cars // Radiation Protection Dosimetry. – 2010. – V. 141. – № 3. – P. 255–268.
14. Ptitsyna N.G., Kopytenko Yu.A., Villoresi G., Pfluger D.H., Ismaguilov V., Ucci N., Kopytenko E.A., Zaitzev D.B., Voronov P.M., Tyasto M.I. Waveform Magnetic Field Survey in Russian DC- and Swiss AC-powered Trains: a Basis for Biologically Relevant Exposure Assessment // Bioelectromagnetics. – 2003. – V. 24. – P. 546–556.
15. Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С., Копытенко Е.А., Воронов П.М., Зайцев Д.Б. Магнитная локация источников геомагнитных возмущений // ДАН. Сер. Геофизика. – 2000. – Т. 371. – № 5. – С. 685–687.
16. Ismaguilov V.S., Kopytenko Yu.A., Hattori K., Voronov P.M., Molchanov O.A. and Hayakawa M. ULF Magnetic Emissions Connected with Under Sea Bottom Earthquakes // Natural Hazards and Earth Sys. Sci. – 2001. – V. 1. – P. 1–9.
17. Ismaguilov V.S., Kopytenko Yu.A., Hattori K., Hayakawa M. Variations of phase velocity and gradient values of ULF geomagnetic disturbances connected with the Izu strong earthquakes // Natural Hazards and Earth Sys. Sci. – 2002. – V. 20. – P. 1–5.
18. Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С., Хаттори К., Хаякава М. Investigation of the ULF electromagnetic phenomena related to earthquakes: contemporary achievements and the perspectives // Annali di Geofisika. – 2001. – V. 44. – № 2. – P. 325–334.
19. Исмагилов В.С., Копытенко Ю.А., Хаттори К., Хаякава М. Использование градиентов и фазовых скоростей УНЧ геомагнитных возмущений для определения местоположения очага будущего сильного землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия. – 2006. – Т. 46. – № 3. – С. 423–430.
20. Коробейников А.Г., Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С. Интеллектуальные информационные системы магнитных измерений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1 (71). – С. 39–44.
21. Snyder M. Magnetic Shielding for Electric Vechicles. Program Review. Contract DAAE07-93-C-R107. Army TACOM, Chrysler Corp. 1995. – 56 p.

Птицына Наталья Григорьевна

– Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, Nataliaptitsyna@yandex.ru

Исмагилов Валерий Сарварович

– Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, ученый секретарь, IVS@izmiran.spb.ru

Копытенко Юрий Анатольевич

– Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, директор, office@izmiran.spb.ru

Коробейников Анатолий Григорьевич

– Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, доктор технических наук, профессор, зам. директора, Korobeynikov_A_G@mail.ru