

УДК 621.317.42

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ: ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ И ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ¹

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

При эксплуатации транспортных средств, работающих на электротяге, генерируются магнитные поля, которые могут нарушить электромагнитную безопасность. Поэтому для ее обеспечения и электромагнитной совместимости необходимо знание характеристик и источников магнитных полей в электротранспорте. В работе проведено обобщение имеющейся информации о магнитных полях в автомобилях и сравнение их с результатами измерений, проведенными в других видах электрифицированного транспорта.

Ключевые слова: автомобиль, магнитное поле, электромагнитная безопасность, измерение магнитного поля.

Введение

Переход на электротранспорт является одной из наиболее актуальных мировых тенденций. Многие развитые высокотехнологичные страны имеют национальные программы по развитию экологичного электрического транспорта. Примером может служить программа Европейского Союза «Green Car Initiative», направленная на финансирование разработок в области создания электрического автотранспорта (с электрическими и с комбинированными, «гибридными» энергоустановками) и соответствующей инфраструктуры [1]. Общая сумма средств на данную программу достигает 1 млрд. евро. Россия также включилась во всеобщее движение по созданию автомобилей на электротяге.

Однако мировые производители электрического автомобилестроения столкнулись с серьезными проблемами обеспечения электромагнитной совместимости всех устройств на борту транспортной системы и электромагнитной безопасности пользователей электротранспорта [2–5]. В связи с этим тестирование, мониторинг и анализ магнитных полей (МП) в электротранспорте являются актуальной задачей.

Автомобили, работающие на электрической тяге, имеют силовые установки, датчики, устройства систем управления, информации и связи. Электрические токи, текущие через электродвигатель, цепи питания и батареи во время движения, генерируют МП в низкочастотных диапазонах (ультранизкочастотные (УНЧ), 0,001–10 Гц; крайне низкочастотные (КНЧ), 10–300 Гц). Более высокие гармоники электромагнитного поля в автомобиле генерируются разнообразными электронными устройствами на борту, информационными системами и системами связи. Например, в гибридных автомобилях наблюдаются магнитные импульсы до 5 кГц, которые генерируются во время переключения двигателя внутреннего сгорания и электрического режима. Кроме того, во всех типах автомобилей генерируется низкочастотное пульсирующее магнитное поле во время вращения стальных колесных дисков. Частота f этого поля определяется скоростью вращения колес, и обычно $f < 20$ Гц, но в спектре присутствуют также и гармоники с более высокой частотой [6].

Электромобиль является новой технологической системой, которая только сейчас выходит на широкий рынок. Производство и использование таких электромобилей пока не стало массовым, поэтому в мире и, в частности, в России отсутствуют достаточно обширные и детальные измерения МП в таких транспортных средствах. Работ о магнитных измерениях в гибридных автомобилях очень мало, а тестирование полей в полностью электрических автомобилях практически не проводится [7–9].

Поскольку в автомобилях, как и в других видах электротранспорта, МП генерируются токами, текущим по токовым системам (проводам и кабелям) транспортного средства, то можно полагать, что МП во всех транспортных системах, работающих на электрическом токе, будут иметь схожие параметры. Однако это предположение требует проверки. Целью настоящей работы является обобщение скудной информации о МП в автомобилях и сравнение их с результатами наших измерений, проведенными в других видах электрифицированного транспорта.

Магнитные поля в автомобиле

Vedholm и Namerius [10] провели измерение магнитного поля (5–2000 Гц) в неподвижном гибридном автомобиле с включенным двигателем и кондиционером. Измерения проводились в 7 автомобилях в районе всех четырех сидений на уровне щиколоток, коленей, бедер, груди и головы. Так как автомобили были неподвижны, поля, генерированные вращением колес, отсутствовали. Магнитное поле, в котором находится водитель и пассажиры, было получено осреднением и представлено в таблице.

В гибридах, в которых батарея была размещена спереди (Авто 1–5), при отсутствии движения наблюдались маленькие поля. Более сильные поля наблюдались в автомобилях, в которых батарея была размещена сзади (Авто 6 и 7). В этих автомобилях батарея расположена под багажником или под задним

¹ Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, государственный контракт № 11.519.11.1011.

сиденьем, и ток течет через весь автомобиль из передней части, от генератора до батареи. Такой большой токовый контур генерирует значительные МП. Максимальное поле 14 мкТл было отмечено у заднего правого сиденья (как правило, детского) на уровне ног.

Точка измерения	Авто 1	Авто 2	Авто 3	Авто 4	Авто 5	Авто 6	Авто 7
Левое переднее сиденье	0,12	0,11	0,15	0,22	0,14	2,6	3,2
Правое переднее сиденье	0,13	0,15	0,33	0,37	0,11	1,1	0,8
Левое заднее сиденье	0,06	0,04	0,03	0,03	0,06	2,4	4,0
Правое заднее сиденье	0,11	0,10	0,04	0,04	0,03	1,3	1,5

Таблица. Среднее магнитное поле (мкТл) в диапазоне частот (5–2000 Гц) в неподвижном гибридном электромобиле с включенным двигателем и кондиционером

Технический университет г. Биля по поручению Швейцарского федерального департамента здоровья провел измерения МП в двух гибридных автомобилях [3]. Измерения были сделаны в движении по городу и в лаборатории, где имитировались условия движения. Датчики МП помещались на переднее пассажирское сиденье, на пол у сиденья водителя, а также на место детского кресла (заднее правое сиденье). Колеса были сделаны из немагнитных материалов, чтобы исключить влияние МП, возникающего во время вращения ферромагнитных масс колес, на результаты измерений. Во время этого исследования установлено, что интенсивность МП постоянно менялась во время движения автомобиля и сильно зависела от способа ускорения и торможения. Наибольшая интенсивность наблюдается во время ускорения и торможения.

Во время движения МП на детском сиденье было в пределах 0,1–3 мкТл. МП в других измеренных точках имело примерно такой же уровень. Было получено, что в гибридных автомобилях генерируется смесь МП в частотном диапазоне 5–500 Гц. Надо заметить, что в данном исследовании измерительные приборы не фиксировали МП ниже 5 Гц.

В работе австралийских исследователей [8] приведены результаты измерений МП в разных точках гибридного автомобиля. Было найдено, что интенсивность поля находится в пределах 0–35 мГс (0–3,5 мкТл). Максимальные поля выше 10 мГс наблюдались на частоте 12 Гц. На рис. 1 показано МП, измеренное в задней части гибридного автомобиля во время движения в разном режиме (ускорение, торможение).

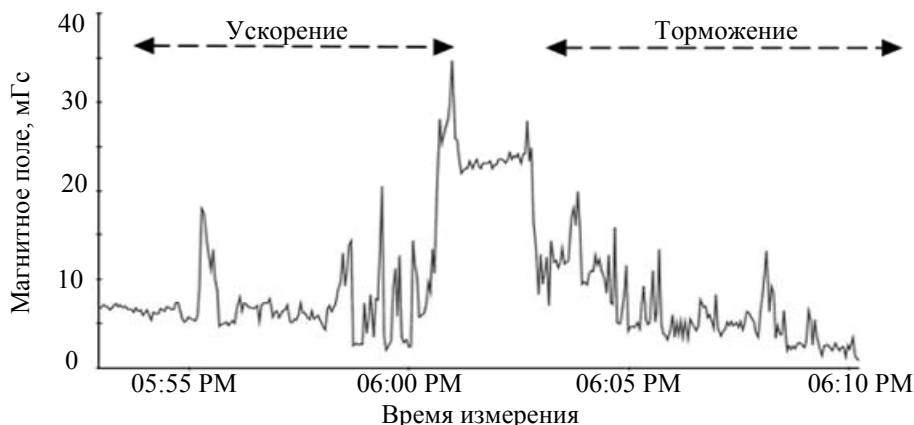


Рис. 1. Магнитные поля на левом заднем сидении гибридного автомобиля.

Группа исследователей из США исследовала МП в различных электромобилях производства США, а также на заправочной станции во время зарядки авто [11]. Эти автомобили использовали двигатели как постоянного, так и переменного тока. Измерения показали, как и в предыдущих случаях, что наибольшие поля генерировались во время максимального ускорения и рекуперативного торможения. Наиболее сильное поле было обнаружено на местах водителей. Во время зарядки электромобиля самые большие поля, равные 64,37 мГс, фиксировались на расстоянии 50 см от панели автоматического прерывателя тока. Результаты измерений установили, что в электромобилях генерируются низкочастотные МП в диапазоне частот 60–420 Гц. Авторы этого исследования заключают, что такие МП могут угрожать здоровью водителей и пассажиров, и поэтому их следует экранировать.

Достаточно детальное исследование МП в гибридном автомобиле Крайслер, ориентированное на экранирование и уменьшение этих полей, было проведено в совместном проекте армейской группы Агту ТАСОМ и Крайслер К^о [12]. Поля измерялись индукционным магнитометром в широком диапазоне частот (0–50 кГц). В исследуемом автомобиле батарея находилась над задними колесами. При силе тока в 200 А максимальное поле ~1200 мГс (120 мкТл) наблюдалось в районе заднего сиденья, а пространственные градиенты доходили до 1000 мГс/м. Эти значения лежат в тех же пределах, что и в электропоездах.

Магнитные поля в электропоездах, метро, трамвае и троллейбусе

Авторы данной работы провели многочисленные измерения МП в различных видах электрического транспорта, как то: электролокомотивы и электрички, работающие как на постоянном, так и на переменном токе (16,34 Гц), метро, трамвай и троллейбус, работающие на постоянном токе. Результаты измерений и анализа частично представлены в [13–15]. Мониторинг полей, как правило, сопровождался фиксацией информации об условиях движения (ускорение, замедление, торможение, прохождение подстанций, встречных поездов или других ферромагнитных масс и т.д.), что позволило идентифицировать источники различных магнитных вариаций наблюдаемых в электротранспорте. Примеры такой идентификации показаны на рис. 2–4.

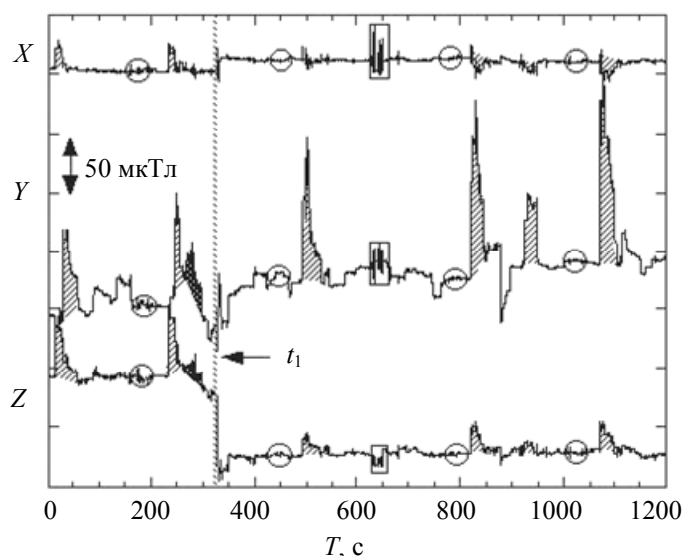


Рис. 2. УНЧ магнитное поле (компоненты X , Y , Z) в электричке, работающей на постоянном токе, в вагоне с моторами. Заштрихованная область – фаза ускорения, черная область – подстанция, прямоугольник – встречный поезд, круг и эллипс – фаза торможения. В момент t_1 датчик был помещен в точку непосредственно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

На рис. 2 представлена запись X -, Y - и Z -компонент МП, измеренного в пассажирском вагоне, т.е. в вагоне с электродвигателями. Вариации МП в направлении вдоль рельсов (X -компонента) пренебрежимо малы по сравнению с вариациями Y - и Z -компонент, перпендикулярных к рельсам. Наибольшие скачки поля происходят во время ускорения поезда, величина скачков в Y -компоненте на этом участке пути достигает 150 мкТл. Некоторое увеличение поля происходит также во время торможения. Встречные или стоящие вдоль пути поезда вызывают заметные вариации поля из-за влияния их ферромагнитных масс.

На рис. 3 приведена Y -компонента МП, измеренного в электровозе вблизи рабочего места машиниста. Видно, что максимальные значения вариаций здесь достигают 100 мкТл. Вариации, наблюдаемые в X - и Z -компонентах, имеют тот же вид, что и в Y -компоненте, но с гораздо меньшей амплитудой. Здесь при проведении измерений нулевые уровни датчиков соответствовали полям, измеренным на платформе до отправления поезда (т.е. обычному фону магнитной окружающей среды).

Данные, приведенные на рис. 3, позволяют оценить уровень постоянного МП внутри поезда. Видно, что величина поля внутри поезда обычно гораздо выше, чем на платформе, т.е. выше уровня магнитного фона окружающей среды. Однако иногда, например, при прохождении первой силовой подстанции значение поля становится ниже уровня окружающей среды (на рис. 3 для времени $T \approx 150$ –200 с значение поля отрицательно).

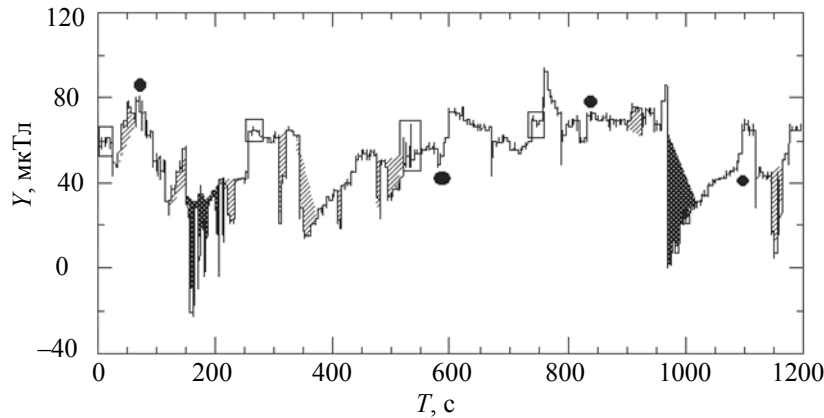


Рис. 3. Y-компонента УНЧ магнитного поля локомотива, работающего на постоянном токе, вблизи рабочего места машиниста (15 см от его головы). • – моменты нулевого тока. Остальные обозначения те же, что на рис. 2

Типичный пример записи МП в локомотивах, работающих на переменном токе (16,67 Гц) приведен на рис. 4. Измерения были выполнены на линии Цюрих-Берн. На рис. 4, а, показаны вариации трех компонент, зарегистрированные в течение 20 мин с частотой регистрации 200 Гц. Более детальная 20-секундная запись вариаций приведена на рис. 4, б. Этот рисунок показывает «движущуюся картину», получающуюся в результате непрерывных измерений МП. Оказалось, что для швейцарских электровозов, как и для российских поездов, можно связать различные особенности МП с рабочими режимами в различные моменты движения, как показано на рис. 4. Анализ показал, что на рабочем месте машиниста основным источником вариаций был ток в рельсовой цепи, который менялся в соответствии с обстоятельствами движения.

Рис. 2–4 демонстрируют, что основными источниками вариаций МП в электропоездах являются электрические токи в токовых цепях. Эти токи и, соответственно, МП уменьшаются / увеличиваются при смене режима движения (ускорение, торможение, прохождение подстанции). Кроме того, источником вариаций МП внутри является меняющаяся внешняя ферромагнитная обстановка (встречные поезда, мосты и т.д.).

Были проведены также измерения МП в трамвае ЛВК-86К [16]. Исследовалась зависимость амплитудных значений МП от режима эксплуатации вагона (стоянка, разгон, движение, торможение). Уровень УНЧ полей, возникающих в результате изменений тока в цепи согласно нуждам движения, менялся в пределах от нуля до нескольких сотен мкТл. Установлено, что в кабине водителя трамвая уровни индукции постоянного МП составили 3,4–98 мкТл, в салоне для пассажиров – 14–500 мкТл. В отдельных местах, вблизи отверстий в перегородке, отделяющей кабину водителя трамвая от салона для пассажиров, значения индукции достигали 1000 мкТл (вследствие возникающих там явлений дифракции и интерференции), что в 15 раз превышает постоянное поле Земли.

Источниками постоянных и переменных МП в трамвае являются токонесущие элементы, электрооборудование, печи электрообогрева. Высокие уровни МП регистрировались вблизи реостатного блока. Наибольшие значения индукции МП в салоне обнаружены в зоне расположения сидений пассажиров в начале вагона слева по линии расположения токоведущих элементов, где находятся места для пассажиров с детьми и инвалидов. В вагоне трамвая регистрировались значительные градиенты МП, являющиеся существенным биотропным параметром.

По той же методике [15, 16] были проведены измерения в двух типах метропоездов г. Санкт-Петербурга (вагон 81717 и автоматизированный вагон ЕМА). Как выяснилось, источниками МП в электропоездах метрополитена являются тяговые двигатели, пускотормозные сопротивления, групповые переключатели, кабели токоприемника, токонесущий провод. Значительные УНЧ вариации МП наблюдались в кабинах машинистов петербургского метро в горизонтальной Y-компоненте (перпендикулярно рельсам), где значения «от пика до пика» достигали 425 мкТл в кабине машиниста вагона 81717 и 350 мкТл в вагоне ЕМА. Таким образом, в этих местах МП в 7–14 раз превосходит величину естественного постоянного поля Земли (около 50 мкТл). В пассажирских салонах поле варьировало в пределах 75–300 мкТл. Анализ показал, что МП в поездах метрополитена и на платформах неоднородно по пространству.

Измерения МП в троллейбусе были проведены в Москве и Санкт-Петербурге. Исследовалась зависимость амплитудных значений МП от точки измерения и от режима эксплуатации троллейбуса (стоянка, разгон, движение, торможение). Точки измерений были выбраны вблизи источников наибольших колебаний индукции МП: в кабине водителя, в салоне на переднем пассажирском сидении, над тяговым электродвигателем, над компрессором и на задней площадке на трех высотах от пола: 0,5 м; 1,0 м; 1,4 или

1,7 м [17]. В каждой точке осуществлялось по 200 измерений в секунду каждой из трех компонент индукции МП в течение 3 мин. Результаты мониторинга записывались вместе с данными о режиме движения троллейбуса по маршруту.

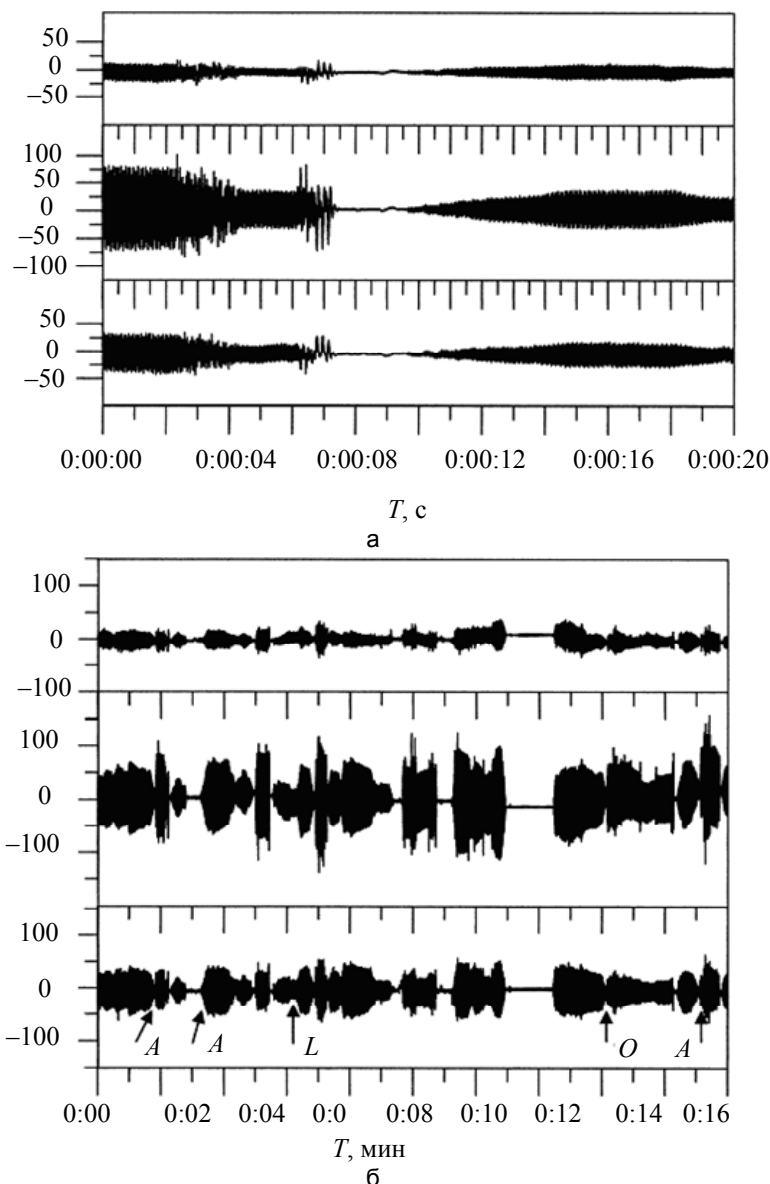


Рис. 4. Магнитное поле в швейцарском электролокомотиве, работающем на переменном токе (16,67 Гц): а – 20-минутная; б – 20-секундная запись. А – ускорение; L – низкая скорость; O – нулевой ток

В водительской кабине троллейбуса зафиксированы самые большие значения $H_{cp} = 93 \pm 45$ мкТл за головой водителя в 20 см от проводов, по которым текут рабочие токи до 200 А от токоприемников к контакторной панели и тяговому электродвигателю. В этой точке имеется самый большой размах колебаний: $\Delta H = H_{max} - H_{min} = 20 - 36 = 168$ мкТл. Наибольший размах зарегистрирован в горизонтальных компонентах: $\Delta X = 141$ мкТл, $\Delta Y = 172$ мкТл, тогда как вертикальная компонента имеет меньший, но тоже значительный размах: $\Delta Z = 50$ мкТл. Результаты измерений свидетельствуют, что МП в кабине троллейбуса не только резко меняется со временем, но и имеет пространственный градиент порядка 100 мкТл/м.

Аналогичное исследование было проведено в троллейбусах марки ЗИУ-9 и ЗИУ-10 в Санкт-Петербурге. Статистический анализ МП в кабине и пассажирском салоне петербургского троллейбуса показал, что в целом характер поля и его отклик на условия движения по маршруту имеют такой же характер, что и в московском троллейбусе. Основная мощность спектра поля в петербургском троллейбусе также лежит в области УНЧ частот (менее 10–15 Гц). Размах колебаний МП в петербургском троллейбусе, как и в Москве, зависит от режима движения и значительно увеличивается при движении троллейбуса в пробках при частых разгонах и торможениях.

Заключение

Сравнение измерений магнитного поля, проведенного в различных видах транспорта, показало, что эти поля кардинально отличаются от синусоидальных полей, которые генерируют линии передач (50 Гц или 60 Гц). Магнитные поля в электрическом транспорте, включая автомобиль, являются мультичастотными полями, которые быстро меняются во времени и пространстве автомобиля. Эти черты магнитного поля являются следствием суммирования многообразных источников магнитного поля на борту транспортного средства и меняющихся режимов движения (ускорение, торможение и т.д.). Однако большая часть магнитной энергии концентрируется в наиболее низких частотных диапазонах (квазистатическом и ультранизком, 0,001–10 Гц).

Ниже приведены максимальные уровни полей, встречающихся в различных видах электротранспорта, включая электромобили, в квазистатическом и ультранизкочастотном диапазоне [2, 4, 12, 15]:

– трамвай	500 мкТл;
– метро	450 мкТл;
– троллейбус	350 мкТл;
– электромобили/гибридные	140 мкТл;
– электропоезд	120 мкТл;
– электрокар	104 мкТл;
– легкий электробус	80 мкТл.

Видно, что наибольшие уровни полей встречаются в трамвае и метро. Измеренные к настоящему времени уровни полей в электрическом автомобиле сравнимы по порядку величин с магнитными полями, измеренными в электропоездах – в вагонах электричек и на рабочем месте машиниста электровоза. Эти магнитные поля значительно превосходят поля от линий передач, с которыми человек обычно сталкивается дома и на работе.

С учетом того факта, что водители и пассажиры электромобилей находятся в непосредственной близости от источников тока, очевидно, что для обеспечения их электромагнитной безопасности необходимо вести поиски разумных и недорогих способов уменьшения магнитных полей. Обычно инженерно-техническая защита строится на мероприятиях по ограничению эмиссионных параметров источников поля либо на базе экранирования поля. Это могут быть многослойные экраны, изготовленные из современных материалов на основе сплавов с аморфной и нанокристаллической структурой, которые не утяжеляют конструкцию авто и могут уменьшать низкочастотные магнитные поля, характерные для электротранспорта, в 5–10 раз [15].

Литература

1. European Green Car Initiative, 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.green-cars-initiative.eu/public/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 05.01.2013).
2. Dietrich F.M., Jacobs W.L. Survey and assessment of electric and magnetic field (EMF) public exposure in the transportation environment. – US Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Report № PB99-130908, 1999. – 52 p.
3. 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 05.01.2013).
4. 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. – 56 p.
5. zur Nieden F., Scheier S., Frei S. Can Cross-Talk on PCBs Cause Permanent ESD-Damages // Proceedings of the 22th International Conference on Electromagnetic Compatibility. EMC Europe 2012. – Rome, Italy, 17–21 September. – 2012. – 73 p.
6. Milham S., Hatfield J., Richard T. Magnetic fields from steel-belted radial tyres: implications for epidemiologic studies // Bioelectromagnetics. – 1999. – V. 20. – № 7. – P. 440–445.
7. Electromagnetic Health Organization, EMF test of 2007 Toyota Prius Hybrid, Electromagn. Health, 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://electromagnetichealth.org/wp-content/uploads/2008/11/emf_test_of_2007_toyota_prius_hybrid-3.pdf свободный. Яз. англ. (дата обращения 05.01.2013).
8. Halgamuge M.N., Abeyrathne C.D., Mendis P. 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. – 2010. – V. 141. – № 3. – P. 255–268.
9. Птицына Н.Г., Исмагилов В.С., Копытенко Ю.А., Коробейников А.Г. Фазово-градиентный метод измерения магнитного поля в электромобиле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 1 (83). – С. 108–112.

10. 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, June 8-13, Bologna, Italy, 1997. – Abstract F-9. – 445 p.
11. Berisha Shahin H., Karady George G., Raed Ahmad, Ray Hobbs, Donald Karner. Magnetic Field Generated From Different Electric Vehicles // Electric Transportation Application, DOI: 951934, 1995. – P. 1–5.
12. Snyder M. Magnetic Shielding for Electric Vehicles. Program Review. Contract DAAE07-93-C-R107. Army TACOM, Chrysler Corp. 1995. – 56 p.
13. Копытенко Ю.А., Виллорези Дж., Птицына Н.Г., Копытенко Е.А., Исмагилов В.С., Зайцев Д.Б., Воронцов П.М., Тясто М.И., Ючи Н., Пфлюгер Д. Измерение магнитных полей электрического транспорта прибором, фиксирующим форму волны: российские и швейцарские поезда, метро, трамвай и троллейбус // Материалы второй международной конференции «Проблемы электромагнитной безопасности человека. Фундаментальные и прикладные исследования. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация». – 20–24 сентября. – М., 1999. – С. 90.
14. Ptitsyna N.G., Kopytenko Y.A., Villorresi G., Pfluger D.H., Ismaguilov V., Iucci 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. – № 8. – P. 546–556.
15. Птицына Н.Г., Виллорези Дж., Копытенко Ю.А. Тясто М.И. Магнитные поля на электротранспорте и экология человека. – СПб: Изд-во «Нестор-История», 2010. – 120 с.
16. Никитина В.Н., Ляшко Г.Г., Копытенко Ю.А. и др. Гигиеническая оценка электромагнитных полей в электропоездах и технологических зонах метрополитена // Медицина труда и промышленная экология. – 2002. – № 3. – С. 16–18.
17. Авенариус И.А., Лелюхин А.М., Копытенко Ю.А., Птицына Н.Г. Исследование низкочастотного магнитного поля в кабине и пассажирском салоне троллейбуса // Вестник МАДИ (ГТУ). – 2007. – № 3 (10). – С. 107–114.

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

Копытенко Юрий Александрович

– 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

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

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