

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.391.823;530.17

МЕТОДИКА И МОДЕЛИ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ АВТОТРАНСПОРТА

© 2021 г. З. М. Гизатуллин^а, *, Р. М. Гизатуллин^а, М. Г. Нуриев^а

^аКазанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111 Российская Федерация

*E-mail: Gzm_zinnur@mail.ru

Поступила в редакцию 08.06.2018 г.

После доработки 07.03.2019 г.

Принята к публикации 27.11.2020 г.

Предложены методика и модели для физического моделирования электромагнитных помех на примере анализа помехоустойчивости электронных средств автомобиля при мощном электромагнитном воздействии контактной сети электротранспорта. Разработаны физические модели и экспериментальный стенд для физического моделирования электромагнитных помех в линии связи. Полученные результаты позволяют реализовать практическую методику прогнозирования помехоустойчивости электронных средств автомобиля при воздействии магнитного поля контактной сети электротранспорта на основе физического моделирования.

DOI: 10.31857/S0033849421060103

ВВЕДЕНИЕ

Задача обеспечения помехоустойчивости электронных систем современного автотранспорта, в связи с непрерывным насыщением современными электронными средствами (ЭС), является важнейшей задачей безопасного их использования [1–3]. При эксплуатации, автотранспорт часто подвергается мощным электромагнитным воздействиям, в том числе в связи с наличием множества переходов над контактной сетью электротранспорта (КСЭ). Крупные производители автомобилей придерживаются правила, что в диапазоне частот 1...2000 МГц ЭС, обеспечивающие управление и связанные с защитой участников движения, должны нормально работать при электромагнитных полях напряженностью до 100 В/м. Но, как показывают реальные экспериментальные исследования большого количества современных автомобилей, данное значение колеблется от 20 до 500 В/м. При этом выявляются следующие опасные нарушения функционирования ЭС: самопроизвольное вращение электромеханического усилителя рулевого управления; сбой контроллера автоматической коробки передач; сбой антиблокировочной системы тормозов; сбой контроллера системы управления двигателем и т.д.

Контактная сеть является одним из наиболее распространенных и мощных промышленных мак-

роисточников, встречаемых в городских и пригородных территориях [4–6]. В городской контактной сети используется диапазон напряжения от 600 до 825 В; на железной дороге номинальным уровнем постоянного напряжения принято считать 3.3 кВ, а переменного напряжения – 25 кВ. Можно выделить несколько видов влияния КСЭ на ЭС: электрическое, обусловленное потенциалом контактной сети по отношению к земле; магнитное, обусловленное возникновением постоянных или переменных тяговых токов, токов короткого замыкания и коммутационных процессов. Последние два случая создают наиболее распространенные мощные электромагнитные воздействия, и при этом вызывают наибольшую сложность проведения натурных экспериментальных исследований из-за случайного характера возникновения таких токов.

Анализ помехоустойчивости электронных систем автотранспорта, в том числе автомобильных, при электромагнитных воздействиях неразрывно связан с точным определением электромагнитной обстановки в области их эксплуатации и расчетом электромагнитных помех в линиях связи. На практике, очень часто в формировании электромагнитной обстановки вокруг ЭС непосредственно участвуют макрообъекты. В рассматриваемой задаче это элементы контактной сети электротранспорта, такие как контактные прово-

да; опоры и кузовные элементы автомобиля. Учет этих особенностей приводит к трудностям с изготовлением макетов и имитаторов электромагнитного поля в реальном масштабе.

Целью данной работы является создание методики и моделей для физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи на примере прогнозирования помехоустойчивости бортовых ЭС автомобиля при воздействии магнитного поля КСЭ.

1. МЕТОД РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Задача физического моделирования может быть решена определением критериев подобия при протекании электромагнитных процессов на макрообъектах с различными электромагнитными характеристиками, в предположении, что электромагнитные процессы на оригинале и модели описываются феноменологическими уравнениями Максвелла. Базовые выражения, определяющие критерии подобия при протекании электромагнитных процессов на макрообъектах с различными электромагнитными характеристиками представлены в работах [7, 8].

Основные задачи реализации масштабных физических моделей связаны с необходимостью подбора материалов с определенными свойствами исходя из следующих выражений и условий:

$$\epsilon' = k_\epsilon \epsilon, \quad \mu' = k_\mu \mu, \quad \sigma' = k_\sigma \sigma, \quad k_v = \frac{1}{\sqrt{k_\epsilon k_\mu}},$$

где ϵ', ϵ — диэлектрическая проницаемость материалов модели и оригинала; μ', μ — магнитная проницаемость материалов модели и оригинала; σ', σ — проводимость материалов модели и оригинала; k_ϵ — коэффициент изменения диэлектрической проницаемости; k_μ — коэффициент изменения магнитной проницаемости; k_σ — коэффициент изменения проводимости материалов; k_v — коэффициент масштабирования скорости движения носителей оригинала и модели (на практике, $k_v = 1$). В реальных условиях проведения масштабного эксперимента возникают сложности подбора материалов с определенными, сильно отличающимися от оригинала диэлектрическими и магнитными свойствами. Поэтому обычно придерживаются следующих значений коэффициентов: $k_\epsilon = 1, k_\mu = 1$. Тогда, согласно условию, $k_l k_\sigma k_\mu = 1$, получаем $k_\sigma = 1/k_l$, где k_l — коэффициент изменения геометрических размеров модели. Поэтому, в идеальном случае масштабирование активного сопротивления осуществляется путем замены материала оригинала другим материалом, проводимость которого отличается в k_σ раз. Но в то же

время в работе [9] указано, что пропорциональное изменение физических размеров модели, при сохранении ее характеристик по электрической и магнитной проницаемости, приводит к пропорциональному изменению величин всех индуктивностей и емкостей. Поэтому считается, что для задач, где активное сопротивление сравнительно мало, именно индуктивности и емкости являются определяющими при формировании электромагнитных процессов.

В научно-технической литературе [10–20] приведены примеры применения данного метода для исследования электромагнитных полей и помех в линиях связи электронных средств, при воздействии источника тока на элементы металлоконструкции здания, разряда молнии на систему молниеотводов или летательные аппараты. Расхождение результатов физического моделирования от реальных процессов для рассмотренных задач составляет не более 30% (нестабильность выходных параметров генератора-имитатора $\pm 10\%$; расхождение между масштабными расчетными и экспериментальными значениями параметров $\pm 5\%$; точность измерительного прибора в данном диапазоне частот $\pm 5\%$; из-за несимметричного подключения генератора-имитатора для случая воздействия разряда молнии $\pm 10\%$).

2. МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для физического моделирования электромагнитных помех в линии связи, в частности применительно к ЭС автомобиля при воздействии электромагнитных полей КСЭ, предлагается следующая методика.

Шаг 1. Определить основные проектные параметры автомобиля: размеры, геометрию и материал кузова, основные конструктивные отверстия, расположение ЭС и линии связи и т.п. В данном примере “приемником” электромагнитных полей КСЭ в составе ЭС автомобиля считаем контур длиной 4 м, образованный двухпроводной линией с нагрузками 50 Ом на обоих концах (рис. 1).

Шаг 2. Определить потенциальные параметры электромагнитных помех КСЭ. Например, рассмотрим импульсное магнитное поле в ближней зоне, образованное из-за токов в КСЭ (рис. 2) [4]. Максимальная напряженность импульсного магнитного поля короткого замыкания КСЭ постоянного тока достигает 2 кА/м.

Шаг 3. Выбрать первичные масштабные коэффициенты физического моделирования (табл. 1). Данные коэффициенты в первую очередь зависят от размеров лаборатории, геометрических размеров стенда имитатора, параметров генератора, размеров объекта исследования и др.

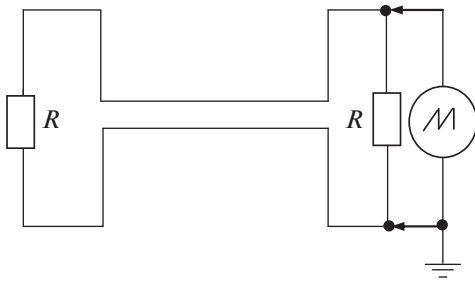


Рис. 1. Схема измерения помех в линии связи автомобиля.

Шаг 4. Рассчитать значения масштабных параметров автомобиля и источника электромагнитных помех в соответствии с принятыми масштабными коэффициентами (см. табл. 1).

Шаг 5. Разработать стенд и масштабную модель автомобиля с исследуемым контуром внутри (рис. 3). Для создания магнитного поля используется одновитковая катушка со сторонами 1 м (рабочий объем $0.6 \times 0.6 \times 0.5$ м). Максимальный размер масштабной модели автомобиля не превышает 0.6 м.

Шаг 6. Провести экспериментальные исследования по измерению электромагнитной помехи $U'(t')$ в линии связи масштабной модели автомобиля при воздействии магнитного поля КСЭ (рис. 4а).

Шаг 7. На основе измеренных значений провести физическое моделирование электромагнитных помех $U(t)$ в линии связи реального автомобиля при воздействии магнитного поля КСЭ в соответ-

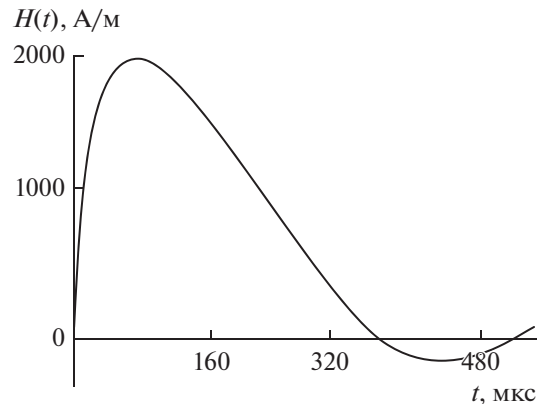


Рис. 2. Импульсная магнитная помеха КСЭ.

ствии со следующими математическими моделями (рис. 4б):

$$U'(t') = \mu_0 a' b' \frac{dH'(t')}{dt'} = \mu_0 k_l^2 ab \frac{k_H}{k_t} \frac{dH(t)}{dt},$$

$$U(t) = 20U'(10t'),$$

где a, b — размеры исследуемого контура; k_H — коэффициент изменения амплитуды напряженности магнитного поля; k_t — коэффициент изменения оси времени.

Шаг 8. Для прогнозирования помехоустойчивости ЭС автомобиля необходимо провести сравнение параметров электромагнитных помех в линиях связи с критическими значениями, приводящими к временному нарушению функ-

Таблица 1. Первичные масштабные коэффициенты для физического моделирования

Физическая величина	Масштабные коэффициенты	Пример расчета коэффициентов
Геометрические размеры (l)	$l' = k_l l$	$k_l = 1/10$ (уменьшение в 10 раз)
Свойства материалов:		
—диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon' = k_\varepsilon \varepsilon$	$k_\varepsilon = 1$
—магнитная проницаемость	$\mu' = k_\mu \mu$	$k_\mu = 1$
—проводимость	$\sigma' = k_\sigma \sigma$	$k_\sigma = \frac{1}{k_l} = 10$
Время (t)	$t' = k_t t$	$k_t = 1/10$
Частота (f)	$f' = k_f f$	$k_f = 10$
Напряженность магнитного поля $H(t)$	$H'(t') = k_H H(t)$	$k_H = 1/2$

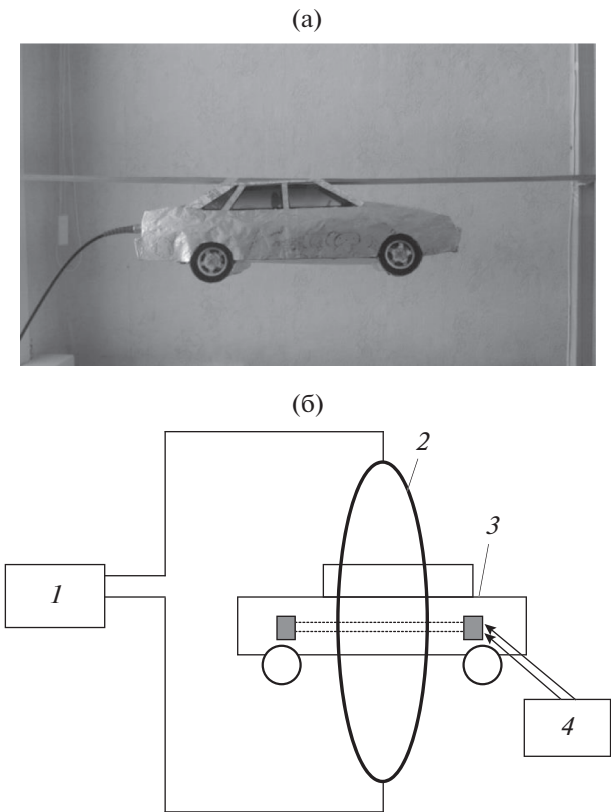


Рис. 3. Фото (а) и схема (б) стенда для физического моделирования: 1 – генератор-имитатор; 2 – катушка; 3 – физическая модель автомобиля; 4 – измерительное оборудование.

ционирования (табл. 2) [21] или повреждению чувствительных элементов [22].

На основе результатов сравнения можно сделать вывод об обеспечении помехоустойчивости ЭС автомобиля к воздействию импульсного магнитного поля КСЭ. При прогнозировании возможных нарушений помехоустойчивости ЭС автомобиля необходимо заранее принимать известные и но-

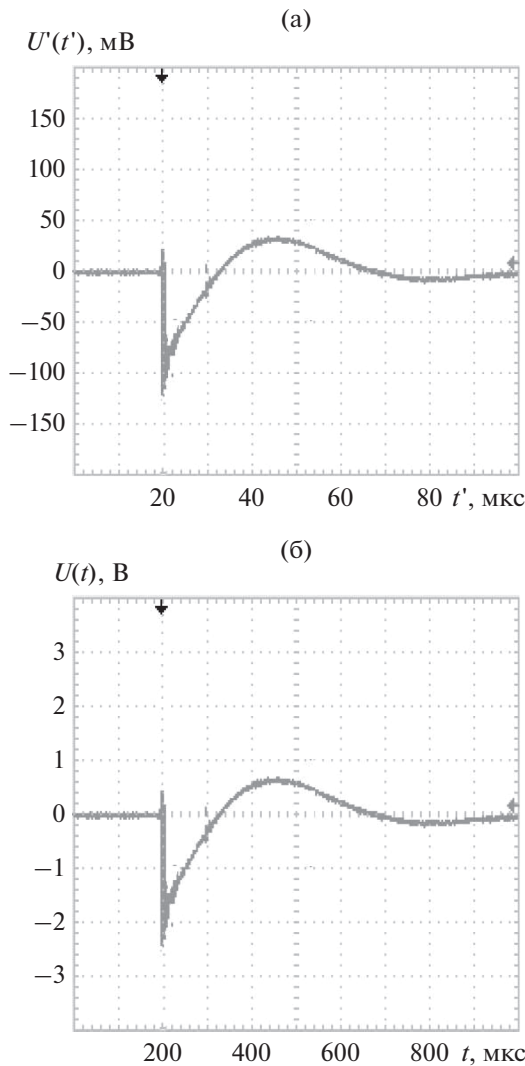


Рис. 4. Электромагнитная помеха в линии связи автомобиля: а – измерение на масштабной модели; б – физическое моделирование.

Таблица 2. Параметры основных семейств логических интегральных микросхем

Серия микросхем	Напряжение питания (НП), В	Низкий уровень, В		Высокий уровень, В		Переключение, В	
		мин	макс	мин	макс	мин	макс
ТТЛ	$5 \pm 10\%$		0.8	2.0		1.2	
НВТТЛ	$3.3 \pm 10\%$	-0.3	0.8	2.0	НП-0.3	1.2	3.3
GTL	$1.2 \pm 5\%$		ОН-0.05	ОН-0.05		0.2	
HSTL	1.5 ± 0.1	-0.3	ОН-0.1	ОН-0.05	НП-0.3	0.2	1.5
ЭСЛ	$-5.2 \pm 5\%$	-1.81	-1.62	-1.025	-0.88	0.595	0.93
ПЭСЛ	$5.0 \pm 5\%$	3.19	3.38	3.98	4.12	0.6	0.93
НВПЭСЛ	$3.3 \pm 5\%$	1.49	1.825	2.24	2.42	0.415	0.93
LVDS		0.9	1.1	1.5	1.7	0.4	0.8

Примечание: ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика; НВТТЛ – низковольтная транзисторно-транзисторная логика с пониженным напряжением питания; GTL – низковольтная высокоскоростная логика; HSTL – высокоскоростная логика; ЭСЛ – эмиттерно-связанная логика на переключаемых токах; ПЭСЛ – позитивная ЭСЛ; НВПЭСЛ – низковольтная позитивная ЭСЛ; LVDS – низковольтная передача дифференциальных сигналов; ОН – опорное напряжение.

вые меры по снижению помех, например, за счет частичного экранирования наиболее чувствительных узлов [23–25], применения плоских витых пар, алгоритмических методов [26, 27] или применения специальных линий для разложения помех [28, 29].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в случаях, когда возникают трудности с анализом электромагнитных помех в линиях связи электронных средств, связанных с необходимостью изготовления макетов и имитаторов электромагнитного поля в реальном масштабе, возможно применение физического моделирования. Предложенная методика физического моделирования, математические и физические модели, экспериментальный стенд и расчетные параметры физических моделей составляют основу для анализа электромагнитных помех в линиях связи, что позволяет, в частности, применить его для прогнозирования помехоустойчивости ЭС автомобиля при воздействии импульсного магнитного поля КСЭ. В перспективе на основе предложенной методики и моделей возможно применение физического моделирования для задач прогнозирования помехоустойчивости ЭС при воздействии других макроисточников, таких как высоковольтные линии электропередачи, разряд молнии, преднамеренные источники и т.п.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госконтракт 2.1724.2017/4.6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев П.А. // Технологии электромагнитной совместимости. 2014. № 4. С. 72.
2. Николаев П.А., Николаев А.Д. // Технологии электромагнитной совместимости. 2010. № 4. С. 12.
3. Lyasheva S.A., Shleymovich M.P., Shakirzyanov R.M. // Proc. Int. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok. 1–4 Oct 2019. N.Y.: IEEE, 2019. P. 8934298. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934298>
4. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987.
5. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. М.: Группа ИДТ, 2007.
6. Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М., Гизатуллин З.М. // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 2. С. 137.
7. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. М.: Высш. шк., 1976.
8. Schumacher C.R. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. № 7. P. 2616.
9. Johnson H., Graham M. High Speed Signal Propagation. Advanced Black Magic. New Jersey: Prentice Hall, 2003.
10. Gizatullin Z.M., Nuriev M.G., Shleimovich M.P. // Proc. 2017 Conf. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk. 14–16 Nov. 2017. N.Y.: IEEE, 2017. P. 8239453. <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2017.8239453>
11. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. // Электротехника. 2018. № 5. С. 45.
12. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. // РЭ. 2018. Т. 63. № 1. С. 97.
13. Piantini A., Janiszewski J.M., Borghetti A. et al. // IEEE Trans. 2007. V. PD-22. № 1. P. 710.
14. Ibrahim A.M., Heidler F.H., Zischank W.J. // IEEE Trans. 2006. V. EC-48. № 2. P. 414.
15. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M., Drozdikov V.A. // Proc. 2019 Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon). Sochi. 8–14 Sep. 2019. N.Y.: IEEE, 2019. P. 8867658. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867658>
16. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. // РЭ. 2014. Т. 59. № 5. С. 463.
17. Gizatullin R.M., Gizatullin Z.M., Shkinderov M.S., Khuziyakhmetova E.A. // Proc. 2018 14th Int. Scientific-Technical Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. Novosibirsk. 2–6 Nov. N.Y.: IEEE, 2018. V. 1. Pt. 3. P. 332. <https://doi.org/10.1109/APEIE.2018.8545943>
18. Сафина Р.М. // Изв. вузов. Математика. 2017. № 8. С. 53.
19. Gizatullin R.M., Suetina T.A. // Int. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok. 1–4 Oct 2019. N.Y.: IEEE, 2019. P. 8934266. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934266>
20. Cooray V. Lightning Electromagnetics. L.: Institution of Engineering and Technology, 2012.
21. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: Группа ИДТ, 2007.
22. Пирогов Ю.А., Солодов А.В. // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.pdf>
23. Gizatullin Z.M., Shkinderov Z.M. // Proc. 2019 Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon). Sochi. 8–14 Sep. 2019. N.Y.: IEEE, 2019. P. 8867761. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867761>
24. Аверин С.В., Кириллов В.Ю., Машуков Е.В. и др. // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 3. С. 113.
25. Шкinderов М.С., Гизатуллин З.М. // РЭ. 2018. Т. 63. № 11. С. 1181.
26. Kostyukhina, G.V., Lyasheva, S.A., Shleymovich, M.P. // Proc. SPIE. 2018. V. 11146. P. 111460L. <https://doi.org/10.1117/12.2523097>
27. Lyasheva, S.A., Shleymovich, M.P. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1202. P. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1202/1/012006>
28. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. // IEEE Trans. 2016. V. EC-58. № 4. P. 1136. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2548783>
29. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. // IEEE Trans. 2017. V. EC-59. № 6. P. 1864. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2678019>