УДК 621.371: 574

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОБОЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, СОЗДАВАЕМОГО СИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ АВТОМОБИЛЕЙ С ГИБРИДНЫМ ПРИВОДОМ

А.В. Баранкин, инженер Научно-образовательного центра технической электродинамики и антенных систем филиала (НОЦ ТАЭС) ФГУП НИИР — СОНИИР; barankinav@soniir.ru

Д.А. Голубенко, младший научный сотрудник НОЦ ТАЭС филиала ФГУП НИИР — СОНИИР; golubenko@soniir.ru

М.Ю. Маслов, директор НОЦ ТАЭС филиала ФГУП НИИР — СОНИИР, к.т.н., доцент; mikem@soniir.ru

Ю.М. Сподобаев, главный научный сотрудник НОЦ ТАЭС филиала ФГУП НИИР — СОНИИР, д.т.н., профессор; spod@soniir.ru

Проводится электродинамическое моделирование с помощью метода конечных элементов, исследуются электромагнитные поля опытного гибридного автомобиля. Для учета вторичных вихретоковых полей предложена оригинальная формулировка стационарной задачи для уравнения Пуассона, учитывающая гармонически изменяющееся во времени первичное электрическое поле.

Ключевые слова: *гибридные автомобили, электромагнитная безопасность, электромагнитная совместимость, электропривод, вихревые токи, метод конечных элементов.*

Введение. Сегодня автомобили с гибридными силовыми установками заняли устойчивую позицию на рынке транспортных средств класса hi-end. Равномерное распределение тяги по оборотам, оптимальные режимы работы двигателя внутреннего сгорания, низкие расход топлива и содержание токсичных веществ в выхлопных газах — далеко не полный перечень преимуществ, обеспечиваемых данной концепцией построения автомобиля. Этим вопросам посвящено значительное количество публикаций, как в нашей стране, так и за рубежом. Вопросы же контроля побочных электромагнитных полей, актуальность которых, по нашему мнению, вполне очевидна, оказались за пределами поля зрения большинства исследователей.

При этом не вызывает сомнения тот факт, что значительные стационарные и переходные токи в силовых и сигнальных цепях электропривода являются источниками электромагнитного поля сложной пространственно-временной структуры значительной величины, учет которого необходим при решении вопросов внутренней ЭМС и особенно электромагнитной безопасности человека — пользователя автомобиля.

Последнее обстоятельство, усугубленное и без того сложной электромагнитной обстановкой в городах, не позволяет исключать системы питания электротранспорта из рассмотрения при решении практических задач контроля электромагнитной обстановки. С другой стороны, корректное решение вопросов ЭМС и электромагнитной безопасности на этапе проектирования автомобиля позволит производителям сформулировать принципиально новое конкурентное преимущество своей продукции.

Статья является попыткой авторов восполнить указанный пробел в исследованиях, посвященных гибридному приводу. Предпосылками послужил опыт в решении сходных по характеру задач [1, 3].

Постановка задачи. С точки зрения электродинамического моделирования цепи питания электротранспорта представляют собой линейные источники стационарного поля, и к расчету полей целесообразно применять тот же подход, что и к линиям электропередач [1, 2]. При моделировании цепей питания вполне оправдано пренебрежение блуждающими токами в толще земной поверхности [1].

Отдельного рассмотрения требует вопрос, связанный с расчетом поля внутри и в непосредственной близости транспортного средства, поскольку находящиеся внутри пассажиры испытывают непосредственное влияние этого поля. При этом очевидно, что требуется детальный учет элементов конструкции транспортного средства, существенно влияющих на характеристики излучаемого поля. В качестве материальных объектов, влияние на совокупное электромагнитное поле которых должно быть учтено, следует выделить поверхности, ограничивающие анализируемую область пространства (кузовные элементы транспортного средства).

Относительно электромагнитных полей, создаваемых силовым оборудованием, можно отметить, что в анализируемой области пространства выполняется условие квазистационарности [4], поэтому представляется целесообразным оценивать электромагнитную обстановку раздельно по факторам электрического и магнитного полей. Их источниками являются заряды и токи, локализованные в конструктивных элементах оборудования силового оборудования. Кроме того, необходимо учитывать нелинейный характер материала магнитопроводов силовых трансформаторов и электрических машин.

Методы решения. Электродинамический анализ соленоидов с нелинейностями построим на основе непосредственного решения стационарной краевой электродинамической задачи. При этом в правых частях уравнений Максвелла останутся только первые члены [5]:

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j};\ \operatorname{rot}\vec{E} = 0;\ \operatorname{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0\varepsilon};\ \operatorname{div}\vec{H} = 0, \qquad (1)$$

где плотность тока в проводниках, образующих обмотку, равна $\vec{j} = \vec{z}_0 \dfrac{I}{\pi a^2}$; $\vec{z}_0$ — азимутальный орт декартовой системы координат (ось z совпадает с осью соленоида); a — радиус провода; I — ток, приведенный к витку. Первое и четвертое уравнение используем для расчета магнитного поля, второе и третье — электрического.

Уравнения (1) для квазистационарного случая нетрудно преобразовать в систему уравнений второго порядка следующего вида [4]:

$$\nabla^2\vec{E} = \mathrm{grad}\frac{\rho}{\varepsilon_0\varepsilon};\quad -\nabla^2\vec{H} = \mathrm{rot}\ \vec{j}. \qquad (2)$$

Систему, состоящую из уравнений (2), необходимо дополнить условиями, накладываемыми на искомое решение на границе области тока.

Численное решение сформулированной задачи Дирихле целесообразно проводить с помощью метода конечных элементов, реализация которого подробно описана в [1, 5]. С учетом того что вторичные поля, создаваемые вихревыми токами, наведенными в проводящих элементах кузова автомобиля, окажутся значительной величины, потребуется модификации исходных уравнений [2].

Первичное переменное магнитное поле оказывает незначительное влияние на вторичное поле, поэтому его учет при электродинамическом моделировании необязателен. Таким образом, следует подвергнуть модификации лишь первое уравнение, исходя из предпосылки, что $\mathrm{rot}\,\vec{E} \neq 0$. Иными словами, переходя к уравнению Пуассона, применим операцию ротора к обеим частям уравнения:

$$\mathrm{rot}\,\vec{H} = \vec{j} + \varepsilon_0\varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}. \qquad (3)$$

В результате получим

$$\mathrm{grad}\,\mathrm{div}\,\vec{H} - \nabla^2\vec{H} = \mathrm{rot}\,\vec{j} + \varepsilon_0\varepsilon\frac{\partial}{\partial t}\mathrm{rot}\,\vec{E}. \qquad (4)$$

Принимая, что электрическое поле изменяется во времени по гармоническому закону (~cosωt), а также используя материальное уравнение $\vec{j} = \sigma\vec{E}$, придем к соотношению:

$$-\nabla^2\vec{H} = \mathrm{rot}\,\vec{j} - \varepsilon_0\varepsilon\sin\omega t\,\mathrm{rot}\frac{\vec{j}}{\sigma}. \qquad (5)$$

Группируя однородные слагаемые в правой части (5), запишем конечный вариант уравнения:

$$-\nabla^2\vec{H} = \left[1 - \frac{\cos\omega t}{\mathrm{tg}\,\delta}\right]\mathrm{rot}\,\vec{j}, \qquad (6)$$

где tgδ — тангенс угла диэлектрических потерь материала корпуса.

В правых частях координатных уравнений появится дополнительный множитель, зависящий от времени по гармоническому закону. В результате системы уравнений примут вид:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = -\left[1 - \frac{\cos\omega t}{\mathrm{tg}\,\delta}\right]\frac{\partial j_z}{\partial y};\\
&\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} = \left[1 - \frac{\cos\omega t}{\mathrm{tg}\,\delta}\right]\frac{\partial j_z}{\partial x};\\
&\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} = 0.
\end{aligned} \qquad (7)$$

Аналогичным образом изменится система координатных уравнений для цилиндрической системы координат:

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_r}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 H_r}{\partial\phi^2} + \frac{\partial^2 H_r}{\partial z^2} = \left[1 - \frac{\cos\omega t}{\mathrm{tg}\,\delta}\right]\left[\frac{\partial j_\phi}{\partial z} - \frac{1}{r}\frac{\partial j_z}{\partial\phi}\right];\\
&\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_\phi}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 H_\phi}{\partial\phi^2} + \frac{\partial^2 H_\phi}{\partial z^2} = \left[1 - \frac{\cos\omega t}{\mathrm{tg}\,\delta}\right]\left[\frac{\partial j_z}{\partial r} - \frac{\partial j_r}{\partial z}\right];\\
&\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_z}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 H_z}{\partial\phi^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} = \frac{1}{r}\left[1 - \frac{\cos\omega t}{\mathrm{tg}\,\delta}\right]\left(\frac{\partial j_r}{\partial\phi} - \frac{\partial}{\partial r}(r j_\phi)\right).
\end{aligned} \qquad (8)$$

Совокупность изложенных выше подходов к электродинамическому моделированию позволяет проводить расчетное прогнозирование электромагнитных полей различных видов электротранспорта.

На рис. 1–5 приведены результаты расчета магнитного поля, создаваемого силовыми цепями и электрическими машинами автомобиля «МАМИ-Квант» (прототип гибридного автомобиля на шасси УАЗ-3153) при различных режимах работы системы электропривода.

На рис. 1 показано распределение магнитного поля при переходе обеих электрических машин в двигательный режим посредством реостатного пуска, на рис. 2 — распределение магнитного поля при холостом ходе обеих машин. Рис. 3 иллюстрирует распределение поля при интенсивном

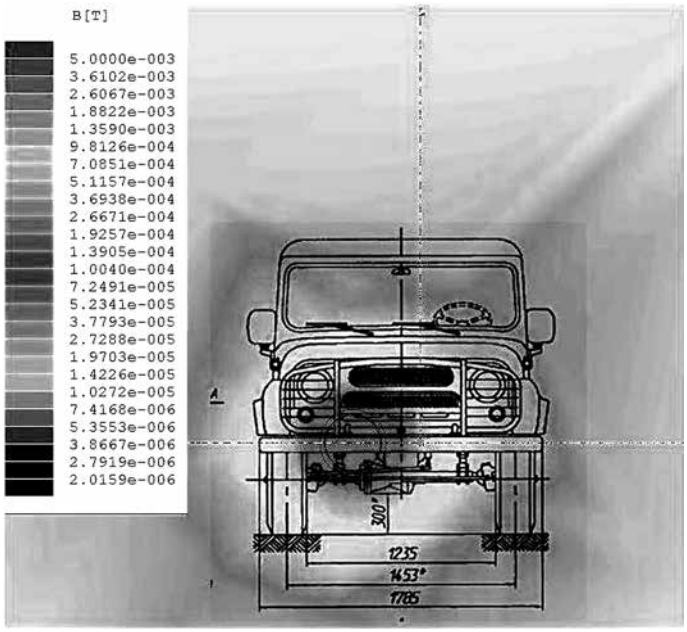

Рис. 1. **Распределение магнитного поля при переходе обеих электрических машин в двигательный режим посредством реостатного пуска**

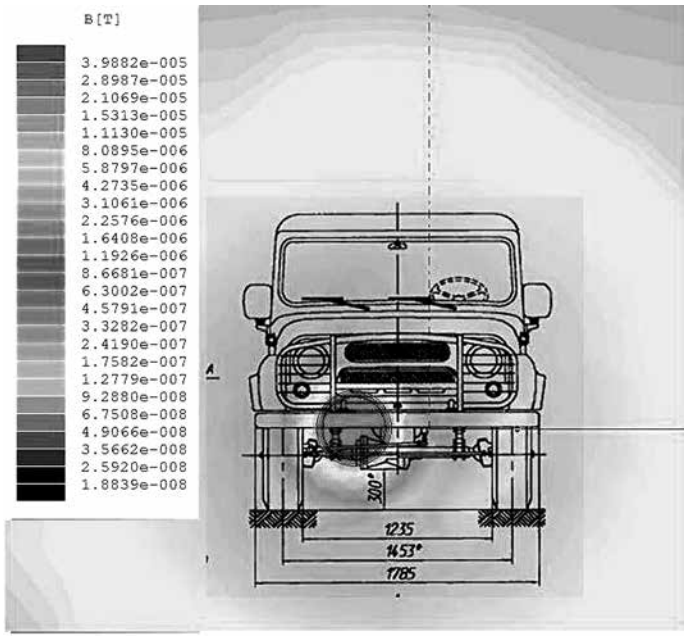

Рис. 2. **Распределение магнитного поля при холостом ходе обеих машин**

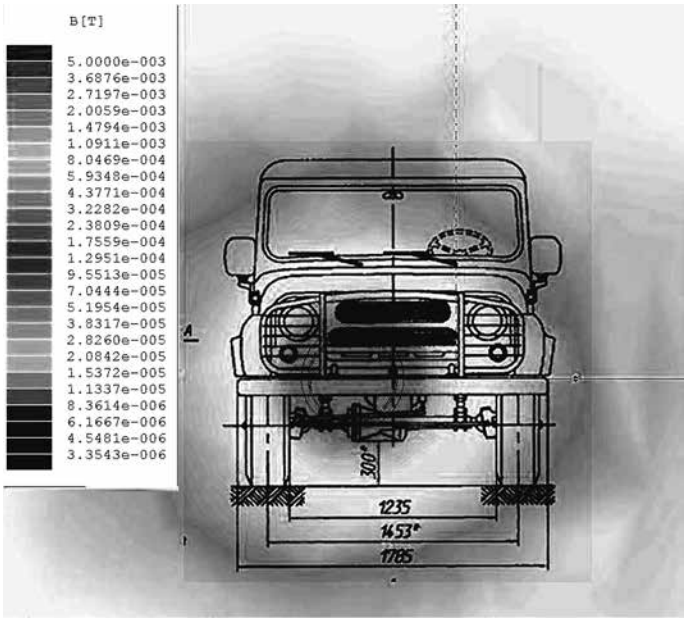

Рис. 3. **Распределение поля при интенсивном разгоне в режиме полного разблокированного привода**

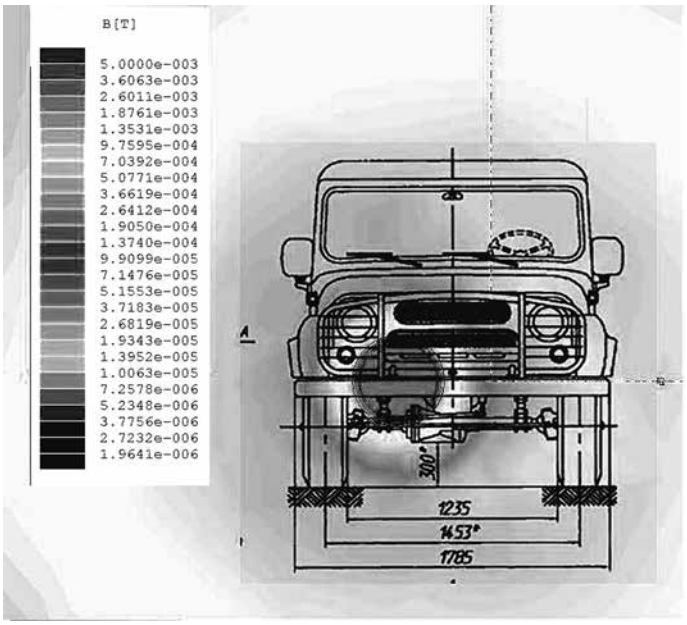

Рис. 4. **Распределение магнитного поля в предположении, что автомобиль движется с равномерной скоростью 60 км/ч**

разгоне в режиме полного разблокированного привода (разгон от 0 до 60 км/ч за 10 с без загрузки на горизонтальной дороге). На рис. 4 распределение магнитного поля построено в предположении, что автомобиль движется с равномерной скоростью 60 км/ч по горизонтальной дороге без загрузки в режиме заднего привода. Распределение поля в режиме рекуперативного торможения приведено на рис. 5 (генераторный режим работы двух электрических машин). Масса автомобиля 2500 кг.

Все распределения построены в среднем сечении рабочего места водителя. Приведенные результаты свидетельствуют о существенных превышениях ПДУ 5 мкТ практически во всех режимах. Данное обстоятельство существенно отличает автомобиль с ГСУ от образцов общественного электротранспорта [2]. Обусловлено такое отличие существенно более плотной компоновкой токоведущих элементов

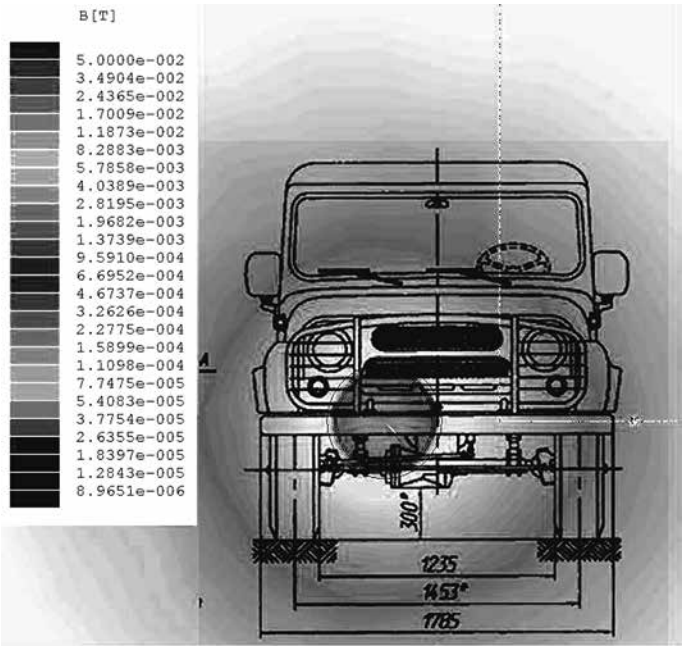

Рис. 5. **Распределение поля в режиме рекуперативного торможения**

и больших энергий, потребляемых в экстремальных режимах от источника, и является неизбежной платой за динамичность разгонных режимов.

Заключение. Электродинамическое моделирование и исследование электромагнитных полей опытного автомобиля с гибридным приводом проведено методом конечных элементов. Предложенная оригинальная формулировка стационарной задачи в виде уравнения Пуассона для гармонически изменяющегося во времени первичного электрического поля позволила учесть вторичные вихретоковые поля. При построении конечно-элементных моделей учтены элементы конструкции транспортного средства, влияющие на электромагнитную обстановку как на открытых пространствах, так и внутри салона.

Результаты, представленные в статье, получены при выполнении работ по договору о сотрудничестве филиала ФГУП НИИР — СОНИИР и в рамках реализации мероприятий «Дорожной карты» развития Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М**. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем. — Самара: ИПК «Содружество», 2009. — 198 с.
2. **Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М., Сподобаев М.Ю**. Современные проблемы электромагнитной экологии // Электросвязь. — 2014. — № 10. — С. 39–42.
3. **Довбыш В.Н., Сподобаев Ю.М., Маслов М.Ю**. Электромагнитный мониторинг энергетических систем // Академия энергетики. — 2006. — № 1(09). — С. 4–7.
4. **Никольский В.В**. Электродинамика и распространение радиоволн. — М.: Наука, 1973. — 543 с.
5. **Маслов М.Ю., Ситникова С.В., Сподобаев Ю.М**. Численный анализ электромагнитного поля монитора с электронно-лучевой трубкой // Вестник СОНИИР. — 2005. — № 1. — С. 44–47.
6. **Маслов М.Ю., Сподобаев М.Ю., Сподобаев Ю.М**. Задачи электромагнитной экологии в теории и практике излучающих систем // Электросвязь. — 2011. — № 12. — С. 28–35.

Получено 15.07.15