

## ДИПОЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГАРМОНИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ НА ОБЪЕКТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Д. В. КОМНАТНЫЙ

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель*

Современная железная дорога с электрическим подвижным составом нового поколения является источником мощного электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Таким образом, на железных дорогах формируется сложная электромагнитная обстановка (ЭМО), затрудняющая эксплуатацию микроэлектронных и микропроцессорных систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Проблема электромагнитной совместимости усугубляется на перспективных дорогах с применением магнитного подвеса экипажей (Маглев). Поэтому возникает потребность в разработке методов анализа электромагнитной обстановки, создаваемой большим количеством разнообразных источников. Электромагнитные поля этих источников предполагаются гармоническими. Эти поля либо монохроматические, либо могут быть представлены рядом Фурье, как сумма гармоник.

При расчете электромагнитных полей такого типа во многих случаях целесообразно представлять реальных источники в виде дипольных моделей. Для описания ЭМО удобно использовать напряженности электрической и магнитной составляющих поля. В расчетах электромагнитных полей технических объектов рационально использовать декартову систему координат. Также для технических задач оправданным является исключение аппарата сферических гармонических функций и теорем сложения (формул переразложения), который значительно усложняет проведение анализа ЭМО.

Поэтому при построении дипольной модели источника помех предполагается, что электрические диполи лежат по какой-либо оси локальной системы координат. Оси локальных систем координат параллельны осям глобальной системы координат, а центры локальных систем сдвинуты произвольным образом относительно центра глобальной системы координат. Моменты диполей считаются известными.

Векторные потенциалы таких диполей описываются известными формулами. Например, для диполя, лежащего по оси  $Oz$ , векторный потенциал дается выражением

$$\vec{A} = \frac{-j\omega\mu}{4\pi} p \frac{e^{-jkr}}{r} \vec{e}_z, \quad (1)$$

где  $A$  – векторный потенциал, В·с / м;  $\omega$  – круговая частота, рад/с;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды, Гн/м;  $p$  – момент диполя, А·м·с;  $k$  – волновое число, м<sup>-1</sup>;  $r$  – расстояние, м;  $\vec{e}_z$  – орт оси  $Oz$ .

Составляющие электромагнитного поля получаются из векторного потенциала по известным соотношениям теории поля. Так из (1) могут быть получены формулы, справедливые в локальной системе координат диполя, (ограничиваясь членами порядка  $1/r$ ,  $1/r^2$ ,  $1/r^3$ ):

$$E_x = \frac{p}{4\pi\epsilon} e^{-jkr} \left[ \frac{jk^2xz}{r^2} - \frac{jkxz}{r^3} \right], \quad (2)$$

$$E_y = \frac{p}{4\pi\epsilon} e^{-jkr} \left[ \frac{jk^2zy}{r^2} - \frac{jkyz}{r^3} \right], \quad (3)$$

$$E_z = \frac{p}{4\pi\epsilon} e^{-jkr} \left[ \frac{jk - k^2z^2}{r^2} - \frac{jkz^2 + 1}{r^3} \right] + \frac{k^2 p e^{-jkr}}{4\pi r}, \quad (4)$$

$$H_x = \frac{-j\omega}{4\pi} p e^{-jkr} \left[ \frac{jky}{r^2} - \frac{y}{r^3} \right], \quad (5)$$

$$H_y = \frac{j\omega}{4\pi} p e^{-jkr} \left[ \frac{jkx}{r^2} - \frac{x}{r^3} \right], \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость, Ф/м;  $x, y, z$  – декартовы локальные координаты точки наблюдения, м;  $E_x, E_y, E_z$  – декартовы составляющие вектора напряженности электрического поля, В/м;  $H_x, H_y$  – декартовы составляющие вектора напряженности магнитного поля, А/м.

Координаты точки наблюдения задаются, как правило, в глобальной системе координат. Для упрощения расчета следует перевычислить координаты точки наблюдения в локальной системе координат по формулам

$$\begin{aligned}x &= x_1 - r_0 \cos \varphi_0 \sin \theta_0, \\y &= y_1 - r_0 \sin \varphi_0 \sin \theta_0, \\z &= z_1 - r_0 \cos \theta_0,\end{aligned}\tag{7}$$

где  $x_1, y_1, z_1$  – глобальные координаты точки наблюдения, м;  $r_0$  – расстояние между центрами систем координат, м;  $\theta_0, \varphi_0$  – угловые сферические координаты центра локальной системы координат в глобальной системе координат, рад.

Выражения (2)–(7) являются примером дипольной модели источника электромагнитных помех.

В монографии Б. Б. Акбашева, Н. В. Балюка и Л. Н. Кечиева приведены общие выражения для напряжения помех, наведенного в рецепторах, модели которых представлены в виде электрического или магнитного диполей. Для расчета гармонических полей в частотной области эти выражения могут быть преобразованы по теореме о спектре производной. В результате получаются расчетные формулы:

$$\begin{aligned}\text{– для магнитного диполя } U(j\omega) &= -j\mu S \frac{R}{L} H(j\omega) \quad R \ll \omega L, \\U(j\omega) &= -j\mu S H(j\omega) \quad R \gg \omega L, \\ \text{– для электрического диполя } U(j\omega) &= -j\omega h R C E(j\omega) \quad R \ll \frac{1}{\omega C}, \\U(j\omega) &= -j\omega h E(j\omega) \quad R \gg \frac{1}{\omega C},\end{aligned}$$

где  $U$  – напряжение, В;  $S$  – площадь дипольной антенны, м<sup>2</sup>;  $R$  – сопротивление нагрузки антенны, Ом;  $L$  – индуктивность антенны, Гн;  $H$  – составляющая напряженности магнитного поля, перпендикулярная контуру дипольной антенны, А/м;  $h$  – длина антенны, м;  $C$  – емкость антенны, Ф;  $E$  – составляющая напряженности электрического поля, перпендикулярная длине антенны, В/м.

Приведенные расчетные соотношения являются дипольной моделью рецептора электромагнитных помех.

Отличительной особенностью рассмотренных в докладе дипольных моделей является простой математический аппарат. Расчетные соотношения не используют специальных функций математической физики. Вместе с тем, как показывает анализ литературных источников, дипольные модели позволяют получить достаточные для практики оценки электромагнитных помех от промышленного оборудования и транспортных систем. Поэтому можно сделать вывод по докладу, что рассмотренный способ получения дипольных моделей ЭМО является оптимальным для решения актуальных задач, возникающих как составная часть проблемы электромагнитной безопасности современных и перспективных электрифицированных железных дорог.

УДК 621.372.5

## **ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПУТЕВЫХ ФИЛЬТРОВ**

*Д. Д. МЕДВЕДЕВ, С. И. ХОМЕНКО, И. О. ЖИГАЛИН*  
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Классические рельсовые цепи (РЦ) имеют ряд недостатков, одним из которых является наличие изолирующих стыков, дающих 30 % отказов по работе рельсовых цепей. В настоящее время приме-