

где E – напряженность электрического поля, В/м; H – напряженность магнитного поля, А/м; l – длина щели, м; λ – длина волны, м; r – расстояние до точки наблюдения, м; $U(j\omega)$ – напряжение импульса помехи, В; $Z_T(j\omega)$ – комплексное переходное сопротивление прокладки, Ом; ω – круговая частота, рад/с; θ, φ – угловые координаты точки наблюдения, рад; k – волновой вектор рад/м; Z_0 – импеданс свободного пространства, Ом.

Из приведенных выражений следует, что уровень излучения существенным образом зависит от переходного сопротивления прокладки $Z_T(j\omega)$. Как показано в монографии Л. Н. Кечиева, Б. Б. Акбашева и П. В. Степанова, переходное сопротивление прокладки может быть определено по схеме замещения, в которой последовательно соединены три двухполюсника. Первый и третий двухполюсники являются параллельным соединением емкости, численно равной емкости между стенкой корпуса и прокладкой, и омического сопротивления, численно равного переходному омическому сопротивлению между этими деталями. Второй двухполюсник образован последовательным соединением омического сопротивления, численно равного омическому сопротивлению прокладки, и индуктивности, численно равной индуктивности прокладки.

В монографии «Электромагнитная совместимость научного космического комплекса АРКАД-3» и в книге Дж. Барнса приведены соотношения для определения собственного омического сопротивления и индуктивности прямоугольной и цилиндрической прокладок. Эти параметры существенным образом зависят от частоты возбуждающего напряжения. Причем в зависимости от диапазона частот расчетные формулы имеют совершенно различную математическую форму. В этих же источниках имеется расчетная формула для переходного омического сопротивления. Емкость между круглой прокладкой и плоской полубесконечной стенкой может быть вычислена по формулам из справочника Ю. Я. Иоссея, И. С. Кочанова и М. Г. Струнского, где она выражена через эллиптические интегралы.

Импульсные электромагнитные помехи, возбуждающие щели с прокладками имеют широкий непрерывный спектр. Частотные свойства комплексного переходного сопротивления таковы, что аналитические выражения для спектра излучения такой щели будут иметь громоздкую и неудобную форму. Поэтому для реализации расчетов следует применить метод, предложенный Б. Б. Акбашевым в диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. А именно спектр возбуждающей щель помехи дискретизируется; для каждой дискретной частоты вычисляются значения напряженностей электрической и магнитной составляющей поля. После чего производится интерполяция спектра этих составляющих по их дискретным значениям.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет анализировать электромагнитные излучения внутри экрана от щели с защитной прокладкой, в том числе и при воздействии сверхширокополосных импульсных помех. Учет вклада излучения каждой такой неоднородности в суммарное помеховое электромагнитное поле в защищаемом объеме повышает адекватность моделирования действия электромагнитного экрана, а следовательно, верность его проектирования. Правильно сконструированные экраны обеспечивают безопасность функционирования аппаратуры систем управления движением поездов в условиях воздействия электромагнитных помех, в том числе и таких опасных, как электростатический разряд, молниевый разряд, электромагнитные импульсы преднамеренного воздействия. Защита от последнего вида помех в современных условиях является крайне актуальной задачей в связи с резким снижением политической стабильности в мире.

УДК 656.25

РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОКА МОЛНИИ В КАБЕЛЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ АВТОБЛОКИРОВКИ

Д. В. КОМНАТНЫЙ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

При оборудовании неэлектрифицированного участка железной дороги современной микропроцессорной системой автоблокировки (АБ), во-первых, увеличивается протяженность кабельных ли-

ний на перегоне, во-вторых, возрастает чувствительность оборудования к электромагнитным помехам, в том числе и к молниевым разрядам. Поэтому актуальной является задача расчета процесса распространения тока в кабеле при поражении его молнией с целью прогнозирования воздействия тока на аппаратуру АБ и принятия защитных мер.

На неэлектрифицированных участках допустимо применение кабеля СЦБ без внешнего металлического экрана. Поэтому для описания процессов в таком кабеле при ударе молнии используются известные уравнения длинной линии

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i; \quad -\frac{\partial i}{\partial x} + j(x, t) = C_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (1)$$

где u – напряжение в кабеле, В; x – координата, м; R_0 – погонное омическое сопротивление кабеля, Ом/км; i – ток в кабеле, А; j – ток молнии, А; C_0 – погонная емкость кабеля, Ф/км; t – время, с.

Из уравнений (1) путем преобразований можно получить дифференциальное уравнение в частных производных типа Фурье для тока в кабеле

$$\frac{\partial i}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} + f(x, t), \quad (2)$$

в котором $a^2 = \frac{1}{C_0 R_0}$, $f(x, t) = -a^2 \frac{\partial}{\partial x} j(t) \delta(x - x_0)$ (x_0 – координата удара молнии, м; δ – дельта-функция Дирака).

При рассмотрении электромагнитных процессов в кабеле, вызванных ударом молнии, допустимо считать кабель бесконечно длинным. Тогда решение (2), известное из работ по математической физике, записывается в следующем виде, с учетом того, что $i(x, t) = 0$:

$$i(x, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi}} \int_0^t \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi, \tau) e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2(t-\tau)}} \frac{d\xi d\tau}{\sqrt{t-\tau}}. \quad (3)$$

Пользуясь известными свойствами дельта функции, выражение (3) можно привести к виду

$$i(x, t) = \frac{1}{4a\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{j(\tau)(x-x_0)}{(t-\tau)^{3/2}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4a^2(t-\tau)}} d\tau. \quad (4)$$

При $t = \tau$ выражение (4) имеет в подынтегральной функции особенность 0/0. Для ее исключения

используется подстановка из монографий Б. П. Юдаева и Э. М. Карташова $\beta = \frac{x-x_0}{2a\sqrt{t-\tau}}$. С ее по-

мощью уравнение (4) преобразуется к виду

$$i(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x-x_0}{2a\sqrt{t}}}^{\infty} j \left(t - \frac{(x-x_0)^2}{4\beta^2 a^2} \right) e^{-\beta^2} d\beta. \quad (5)$$

Несобственный интеграл в уравнении (5) может быть найден численно методами, указанными в монографии В. И. Ракитина и В. С. Первушина или монографии Ш. Е. Цимринга.

В литературе известны решения задачи о распространении тока молнии в кабеле. Но они получены более сложным методом преобразования Лапласа и приведены в неполной форме. Следовательно, предлагаемая в докладе формула для расчетов электромагнитных процессов при ударе молнии в кабель СЦБ отличается высокой адекватностью. Это, в свою очередь, необходимо при проектировании систем обеспечения безопасности движения поездов.