УДК 621.31

# МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОМЕХОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПРОНИКАЮЩЕГО ЧЕРЕЗ КРУГЛОЕ ОТВЕРСТИЕ В ПЛОСКОМ ЭКРАНЕ

Д.В. КОМНАТНЫЙ

*Белорусский государственный университет транспорта,*
*г. Гомель, Республика Беларусь*

Составной частью проблемы комплексной защиты информации является защита критически важных объектов информационной инфраструктуры от воздействия некондуктивных электромагнитных помех. Особенную актуальность этот вопрос приобретает в современных условиях, когда имеется возможность осуществления деструктивных воздействий на указанные объекты с помощью преднамеренных электромагнитных помех (электромагнитный терроризм). Целью воздействия указанных помех могут оказаться оборудование хранения больших объемов информации (серверы), оборудование сетей передачи данных, оборудование конечных пользователей. В частности, потенциальным объектом воздействия оказываются диспетчерские центры магистральных железных дорог и высокоскоростных городских линий, а также современные микропроцессорные системы управления движением поездов.

Основным средством защиты от некондуктивных помех является электромагнитное экранирование. Вопросы проектирования сплошных электромагнитных экранов хорошо разработаны [1, 2]. Но практическое изготовление сплошных экранирующих оболочек затруднено необходимостью наличия различных технологических отверстий в экране. Поэтому необходимы средства анализа проникновения помехового электромагнитного поля через отверстия в экране.

Л.И. Мандельштам и Х. Бете предложили способы расчета проникновения электромагнитного поля через круглое отверстие в бесконечном металлическом экране [3, 4]. Способ Х. Бете базируется на рассмотрении более простой задачи о проникновении через такое отверстие электростатического или магнитостатического поля. Поэтому для инженерных целей необходим простой и эффективный способ решения последней задачи.

В литературных источниках предложено большое число решений задачи о проникновении равномерного электростатического поля через круглое отверстие в проводящем плоском экране. Эти решения отличаются выбором системы координат для описания электродинамической системы задачи. Разнообразие теоретических решений затрудняет их приложение к практическим расчетам конструкций электромагнитных экранов. Поэтому в докладе предпринята систематизация опубликованных результатов и их отбора по критерию вычислительной эффективности для практических приложений.

В [1] для решения рассматриваемой задачи применена сферическая система координат с центром, совпадающим с центром отверстия. Вводится сфера радиуса, равного радиусу отверстия. На поверхности сферы требуется удовлетворение граничным условиям непрерывности векторов нормальной и тангенциальной составляющих вектора напряженности электростатического поля. Это позволяет получить выражения для потенциала поля в области отверстия, в областях до экрана и за экраном.

Так, выражение потенциала поля в области за экраном имеет вид

$$u_2 = -\sin\varphi \sum_{n=2k}^{\infty} C_n r^{-n-1} P_n^1\left(\cos\theta\right)\sin\varphi ,$$

где $u_2$ – потенциал, В; θ, φ – угловые сферические координаты, рад; $C_n$ – постоянные интегрирования, В; $r$ – радиальная сферическая координата, м; $P_n$ – полином Лежандра.

Недостатками такого решения являются: введение сферической поверхности, не заданной физическими соображениями; представление решения в форме бесконечного ряда. Последнее вызывает необходимость оценки числа удерживаемых членов ряда и усложняет расчет с требуемой точностью.

Решение в цилиндрической системе координат требует выполнения граничного условия равенства нулю потенциала экрана и условия сопряжения на отверстии. Условие сопряжения заключается в том, что напряженность поля в отверстии численно равна напряженности поля, которая существовала бы на поверхности сплошного экрана, и имеет только нормальную составляющую. Тогда потенциал в области за экраном имеет выражение [5]

$$u_2(r,z)=\int_0^\infty C(\lambda)e^{-\lambda z}J_0(\lambda r)\,d\lambda,$$

где $C(\lambda)$ – функция; $\lambda$ – расчетная переменная; $z, r$ – линейные цилиндрические координаты, м; $J_0$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

В [5] показано, что для функции $C(\lambda)$ справедливо парное интегральное уравнение

$$\int_0^\infty \lambda C(\lambda)J_0(\lambda r)\,d\lambda = E_0 \quad 0\le r\le a,$$

$$\int_0^\infty C(\lambda)J_0(\lambda r)\,d\lambda = 0 \quad a<r\le\infty,$$

где $a$ – радиус отверстия, м; $E_0$ –напряженность электростатического поля в области до экрана, В/м.

Там же показано, что решение этого парного интегрального уравнения имеет замкнутую математическую форму, таким образом, функция $C(\lambda)$ равна

$$C(\lambda)=\frac{2}{\pi}\int_0^a \sin\lambda t\,dt\int_0^t \frac{yE_0}{\sqrt{t^2-y^2}}\,dy=\frac{2E_0}{\pi}\left[\frac{1}{\lambda^2}\sin\lambda a-\frac{a}{\lambda}\cos\lambda a\right].$$

Недостатком этого решения является необходимость вычислять несобственный интеграл от специальной функции Бесселя, что затрудняет инженерные расчеты.

В [3, 6] получено решение рассматриваемой задачи в эллипсоидальной системе координат. В этой системе координат потенциал поля в области за экраном имеет замкнутое выражение

$$u_2(x,z)=\frac{E_0 z}{\pi}\left(\operatorname{arctg}\lambda+\frac{1}{\lambda}\right),$$

$$\lambda=\sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{z^2}{r_0^2}+\frac{x^2}{r_0^2}-1\right)+\frac{1}{2}\sqrt{\frac{4z^2}{r_0^2}+\left(\frac{z^2}{r_0^2}+\frac{x^2}{r_0^2}-1\right)^2}},$$

где $x, z$ – декартовы координаты, м; $r_0$ – радиус отверстия, м.

Достоинством приведенного решения является то, что оно имеет замкнутую форму и не использует бесконечных рядов или несобственных интегралов.

Проведенный в докладе сравнительный анализ предложенных решений задачи о проникновении электростатического поля через круглые отверстия в плоском экране показывает, что наиболее удобным для практического использования является решение, представленное в эллипсоидальных координатах. Как видно, оно имеет меньше источников возможных расчетных ошибок и погрешностей решения. Эллипсоидальная координата $\lambda$

достаточно просто выражается через декартовы, поэтому применение эллипсоидальной системы координат не вызывает затруднений при анализе реальных конструкций экранов и корпусов. Эллипсоидальную координату можно рассматривать как параметр, не учитывая ее геометрический смысл.

На больших расстояниях от отверстия поле имеет дипольный характер. Для расчета момента диполя получены очень простые выражения [3], а поле диполя может быть рассчитано в любой системе координат, в том числе в декартовой.

Следовательно, анализ проникновения помехового поля через круглое отверстие в экране может быть выполнен без существенных затруднений на основе хорошо известных публикаций.

Необходимо отметить, что упомянутый в докладе метод Бете справедлив для помеховых электромагнитных полей, находящихся в сравнительно узкой полосе частот. Если электромагнитное поле имеет очень широкую полосу частот от единиц Гц до единиц ГГц, то необходимо использовать расчетные методы, основанные на известном в теории дифракции интеграле Кирхгофа [6]. Такой полосой частот обладают электростатический разряд и электромагнитные импульсы преднамеренного воздействия. Применение интеграла Кирхгофа для расчета проникновения таких импульсов через отверстия в экранах впервые обосновано в [7].

**Литература**

1. Аполлонский, С.М. Расчет сложных электромагнитных экранирующих конструкций / С.М. Аполлонский.– М.: РУСАЙНС, 2011. – 554 с.

2. Князев, А. Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, В.В. Петров. – М.: Радио и связь, 1989. – 222 с.

3. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: в 12 т. / Лифшиц. – 7-е изд., испр. – М.: Наука, 1982. – Т. 8. Электродинамика сплошных сред. – 620 с.

4. Джексон, Дж. Классическая электродинамика / Дж. Джексон. – М.: Мир, 1965. – 702 с.

5. Уфлянд, Я.С. Метод парных уравнений в задачах математической физики / Я.С. Уфлянд. – Л.: Наука, 1977. – 220 с.

6. Шимони, К. Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М.: Мир, 1964. – 713 с.

7. Бочков, К. А. Элементы моделирования электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков, Д. В. Комнатный. – Гомель: БелГУТ, 2013. – 185 с.