

Таким образом, вычислены значения погонных задержек с помощью аналитических выражений. Результаты показали возможность ускоренного (в 1,3 раза) вычисления погонных задержек импульсов, а также использования аналитических выражений для оптимизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417 X0172.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – №3. – С. 79–83.
2. Белоусов А.О. Трехкритериальная оптимизация как ресурс для совершенствования зеркально-симметричного модального фильтра / А.О. Белоусов, Е.Б. Черникова, А.М. Заболоцкий // Матер. 23-й Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-23–2017)». – Томск, 24 ноября, 2017. – С. 150–154.
3. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – Т. 2, № 36. – С. 45–50.
4. You H. Crosstalk analysis of interconnection lines and packages in high-speed integrated circuits / H. You, M. Soma // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. – Aug. 1990. – Vol. 37, No. 8. – P. 1019–1026.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ КАМЕРЫ

А.В. Демаков, инженер

*Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, vandervals@inbox.ru*

Анализ распределения электромагнитного поля (ЭМП) в реверберационных камерах (РК) основывается на численных методах, которые позволяют получить общую картину электрического и магнитного полей на заданной частоте и в определенный момент времени [1, 2]. Однако использование подобных методов требует значительных вычислительных затрат из-за сложности конструкции и больших размеров камеры. На предварительном этапе разработки РК возникает необходимость в получении грубых и быстрых оценок распределения ЭМП на заданных частотах.

Цель данной работы – представить теоретические основы для разработки аналитической модели для РК с прямоугольным корпусом и механическим перемешиванием типов волн.

Резонансные частоты возбуждаемых типов волн в РК могут быть вычислены согласно выражению для прямоугольного резонатора

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме; m, n, p – целые неотрицательные числа, a, b и d ($a < b < d$) – ширина, высота и глубина корпуса РК соответственно.

На заданной частоте внутри РК возбуждается ряд типов волн, суперпозиция которых определяет результирующее ЭМП. Каждому возбуждаемому типу волны на частоте f соответствует весовой коэффициент I , который определяется как функция от теоретической частоты его резонанса f_{mnp} и добротности РК $Q(f)$ [3]:

$$I(f, f_{mnp}) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2(f) \left(f / f_{mnp} - f_{mnp} / f \right)^2}}. \quad (2)$$

Предполагая, что электромагнитная волна распространяется вдоль оси z , прямоугольные компоненты для ТЕ- и ТМ-волн могут быть найдены по выражениям [4]

$$E_{x_{mnp}}^{TE^z} = \frac{-j\omega_{mnp} \mu k_y H_0}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \cos k_x x \sin k_y y \sin k_z z, \quad (3)$$

$$E_{y_{mnp}}^{TE^z} = \frac{-j\omega_{mnp} \mu k_x H_0}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \sin k_x x \cos k_y y \sin k_z z, \quad (4)$$

$$E_{z_{mnp}}^{TE^z} = 0, \quad (5)$$

$$E_{x_{mnp}}^{TM^z} = \frac{-k_x k_z E_0}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \cos k_x x \sin k_y y \sin k_z z, \quad (6)$$

$$E_{y_{mnp}}^{TM^z} = \frac{-k_y k_z E_0}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \sin k_x x \cos k_y y \sin k_z z, \quad (7)$$

$$E_{z_{mnp}}^{TM^z} = E_0 \sin k_x x \cos k_y y \sin k_z z. \quad (8)$$

Результирующее электромагнитное поле на частоте f вычисляется как сумма полей, возбуждаемых каждым резонансным типом волны (3)–(8), в пределах диапазона $f \pm \Delta f$, где $\Delta f = 100f / Q(f)$, с учетом (3)

$$E_i(f, x, y, z) = \sum_{f_{mnp} \in f \pm \Delta f} I(f, f_{mnp}) \left(E_{x_{mnp}}^{TM^i} + E_{x_{mnp}}^{TE^i} \right), \quad (9)$$

где i – индекс, определяющий прямоугольную компоненту напряженности поля (x , y или z).

В качестве источника воздействия в модели используется бесконечно малый изотропный излучатель, помещенный внутрь корпуса РК. Для учета влияния расположения излучателя на распределение ЭМП используются коэффициенты [5]

$$C_{x_{mnp}}^{TM^z} = I(f, f_{mnp}) \frac{-k_x k_z}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \cos k_x x_e \sin k_y y_e \sin k_z z_e, \quad (10)$$

$$C_{x_{mnp}}^{TE^z} = I(f, f_{mnp}) \frac{-j\omega_{mnp} \mu k_y}{k_{mnp}^2 - k_z^2} \cos k_x x_e \sin k_y y_e \sin k_z z_e, \quad (11)$$

где x_e, y_e, z_e – координаты местоположения излучателя внутри корпуса.

Таким образом, выражение для расчета прямоугольной компоненты напряженности электрического поля примет вид

$$E_i(f, x, y, z) = \sum_{f_{mnp} \in f \pm \Delta f} \left(C_{x_{mnp}}^{TM^i} E_{x_{mnp}}^{TM^i} + C_{x_{mnp}}^{TE^i} E_{x_{mnp}}^{TE^i} \right). \quad (12)$$

Механическое перемешивание типов волн является наиболее распространенным способом изменения граничных условий в РК. В реальных РК изменение пространственного положения механического смесителя приводит к сдвигу резонансных частот каждого типа волны. Также в модели необходимо учитывать корреляцию между распределением ЭМП при различных позициях смесителя. Для имитации вращения смесителя в модели выполнено вычисление резонансных частот каждого типа волны для M -положений смесителя [6]

$$f'_{mnp_i} = f_{mnp} + S_i, \quad (13)$$

где S_i – сумма N случайных чисел r в диапазоне от 0 до 1, $i = 1 \dots M$.

Принцип расчета последовательности чисел S_i с заданным коэффициентом корреляции ρ пояснен на примере для четырех положений смесителя ($M = 4$), $N = 100$, $\rho = 0,8$ (рис. 1).

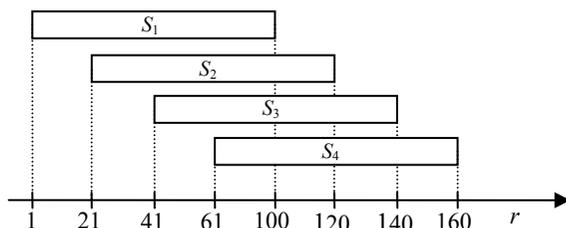


Рис. 1. Последовательность S_i с коэффициентом корреляции ρ

Таким образом, в данной работе представлены теоретические основы для нахождения оценки распределения ЭМП в РК с прямоугольным корпусом и механическим перемешиванием типов волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417 X0172.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bruns C. A closer look at reverberation chambers – 3D-simulation and experimental verification / C. Burns, R. Vahldieck // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2005. – Vol. 45, №1. – P. 117–119.
2. Demakov A.V. Improved TEM-cell for EMC tests of integrated circuits / A.V. Demakov, M.E. Komnatov // Proc. of IEEE Intern. multi-conf. on engineering, computer and information sciences (Novosibirsk, Akademgorodok, Russia, 18–24 Sep. 2017). – Novosibirsk, 2017. – P. 399–402.
3. Terman F.E. Radio Engineer's Handbook. – McGraw-Hill Book Company, 1943.
4. Hill D.A. Electromagnetic Fields in Cavities: Deterministic and Statistical Theories. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
5. Amador E. Source stirring analysis in a reverberation chamber based on modal expansion of the electric field / E. Amador, P. Besnier // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. – Aug. 16–22, 2015. – P. 434–439.
6. Andrieu G. Analytical Model of a Mechanically Stirred Reverberation Chamber Based on EM Field Modal Expansion. / G. Andrieu, A. Soltane, A. Reineix // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. – Sept. 5–9, 2016. – P. 217–222.

ВЫЯВЛЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭКСТРЕМУМОВ СИГНАЛА В ДВУХВИТКОВОЙ МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ

Рустам Р. Газизов, студент каф. БИС;

Руслан Р. Газизов, м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС», аспирант каф. ТУ

С развитием радиоэлектронной аппаратуры повышаются требования к обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС). Поэтому важны выявление и локализация экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи (МПЛП), поскольку их результаты могут быть полезны для определения мест возможных паразитных взаимовлияний и излучений, чтобы своевременно принять меры по их устранению для обеспечения ЭМС. Теоретические основы и алгоритм квазистатического вычисления отклика вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП приведены в [1, 2] и здесь опускаются.

Ранее были выполнены исследования по выявлению и локализации экстремумов сигнала в двухвитковой [3] и одновитковой [4] меандровых линиях, а также в шине печатной платы системы автоном-