

## Секция 2

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

---

УДК 621.396

А. АЛХАДЖ ХАСАН, мл. науч. сотр., ТУСУР, Томск

### **КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИНИ-ТЕМ-КАМЕРЫ В СИСТЕМЕ TALGAT ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СТРУКТУР С МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ ДО ЧАСТОТЫ 5 ГГц**

Рассматривается возможность использования вычислительных ресурсов для замены измерений излучаемых эмиссий моделированием. Для этого предлагается применять квазистатический анализ перекрёстных наводок от связанных линий печатной платы с модальным резервированием на центральный проводник мини-ТЕМ-камеры, работающей до 5 ГГц.

Производители радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) должны обеспечить соответствующие уровни помехоэмиссии и помехоустойчивости на ранних этапах конструирования и изготовления до испытаний на электромагнитную совместимость (ЭМС), чтобы избежать отказов на испытаниях. Эффективный, простой и дешёвый способ одновременного обеспечения ЭМС и повышения надёжности РЭА – это модальное резервирование (МР) [1]. Между тем до изготовления первых макетов необходимо тщательно смоделировать их, получить предварительные оценки их работы и выполнить промежуточные испытания, чтобы подтвердить полученные оценки.

В соответствии со стандартами по ЭМС РЭА можно использовать ТЕМ-камеры в качестве устройства измерения уровня излучаемых эмиссий (ИЭ) от печатных плат (ПП), поскольку он пропорционален амплитудам напряжения, наводимого испытываемым объектом на концах центрального проводника камеры. Для этой цели в ТУСУРе используют миниатюрную ТЕМ-камеру, работающую в диапазоне частот до 5 ГГц [2]. Кроме того,

в вузе разрабатывается отечественная система компьютерного моделирования TALGAT [3], которая позволяет моделирование задач ЭМС с минимальными вычислительными затратами и приемлемыми результатами. Ранее виртуальные испытания с мини-ТЕМ-камерой не рассматривались.

Цель данной работы – показать использование системы TALGAT для оценки уровня ИЭ от ПП с МР до частоты 5 ГГц.

Для достижения этой цели сначала построена модель в виде отрезка многопроводной линии передачи, имитирующая ПП с МР внутри регулярной части мини-ТЕМ-камеры. Общая модель состоит из активного и пассивного проводников ПП и центрального проводника камеры. Поперечное сечение ПП в камере приведено на рисунке 1. Там же показана схема соединений (значения сопротивлений составляют 50 Ом).

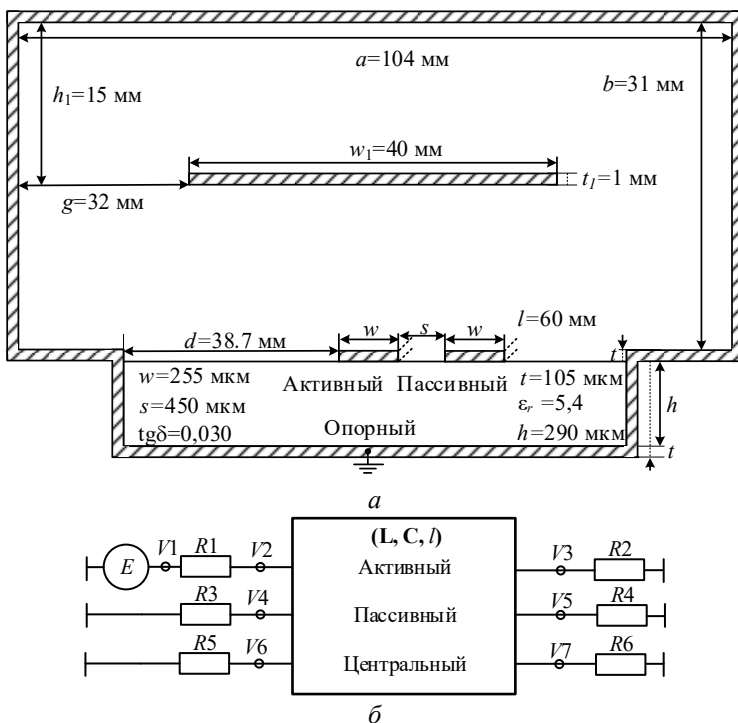


Рисунок 1 – Поперечное сечение печатной платы внутри камеры (а) и эквивалентная схема испытания (б)

Между активным проводником линии и схемной землей подключен источник гармонического воздействия с амплитудой 1 В для получения амплитудно-частотной характеристики. Вычисленные элементы исходных и симметрированных матриц электростатической (С) и электромагнитной (L) индукции, максимальные значения матрицы ошибок при симметрировании этих матриц и погонные задержки приведены в таблице 1. Видно, что асимметрия невелика, а минимальная погонная задержка чуть меньше значения, обратного скорости света, из-за погрешности вычислений. Это подтверждает корректность моделирования.

Рисунок 2 показывает частотные зависимости напряжений на входе и выходе, вычисленные при оптимальном количестве сегментов на границах проводников и диэлектрика. Эти напряжения характеризуют уровень эмиссий от ПП с МР. Также на рисунке 2 приведены результаты эксперимента, опубликованные ранее [4]. Сравнение зависимостей показало необходимость согласовать как можно лучше исходные параметры моделирования и реальные, из эксперимента, а также учесть вклад всех паразитных явлений и параметров. Видно, что результаты моделирования и эксперимента близки друг к другу и проявляется периодичность зависимостей, но выделяется сдвиг в резонансных частотах примерно в 1,5 раза. Это связано с различием реального и используемого при моделировании значений  $\epsilon_r$ . При изготовлении макетов выбран стеклотекстолит со значением  $\epsilon_r$  4,7–5,6 по данным производителя. По результатам исследований обнаружено, что с ростом  $\epsilon_r$  меняется резонансная частота и при моделировании оптимальным является значение 5,6.

Одно из преимуществ квазистатического анализа в том, что он позволяет приближенно моделировать трехмерные структуры по довольно быстрой двумерной модели. Но это подходит для регулярных структур, а для структур, меняющих поперечное сечение, усложняет анализ. В нашем случае длина проводника ПП составляет 60 мм, поэтому аналогичная длина принята для центрального проводника ТЕМ-камеры. Но в реальности эти размеры отличаются. Так, для миниатюрной ТЕМ-камеры длина центрального проводника регулярной части 100 мм, а его полная длина 125,2 мм. Исходя из этого, брать одинаковые длины для проводников ПП и центрального проводника мини-ТЕМ-камеры нецелесообразно.

Таблица 1 – Значения погонных параметров для печатной платы с модальным резервированием в мини-ТЕМ-камере

Тип	$C$ , пФ/м	$L$ , нГн/м	$\Delta C$ , %	$\Delta L$ , %	$\tau_1$ , нс/м	$\tau_2$ , нс/м	$\tau_3$ , нс/м
Исх.	$\begin{bmatrix} 78,992 & -15,049 & -3,0562 \\ -15,052 & 78,991 & -3,0572 \\ -3,0589 & -3,0589 & 62,123 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 374,52 & 72,579 & 3,4785 \\ 72,579 & 374,52 & 3,4780 \\ 3,4789 & 3,4784 & 177,32 \end{bmatrix}$	0,0442	0,0055	5,3487	5,3287	3,3095
Сим.	$\begin{bmatrix} 78,992 & -15,050 & -3,0575 \\ -15,050 & 78,991 & -3,0580 \\ -3,0575 & -3,0580 & 62,123 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 374,52 & 72,579 & 3,4787 \\ 72,579 & 374,52 & 3,4782 \\ 3,4787 & 3,4782 & 177,32 \end{bmatrix}$					

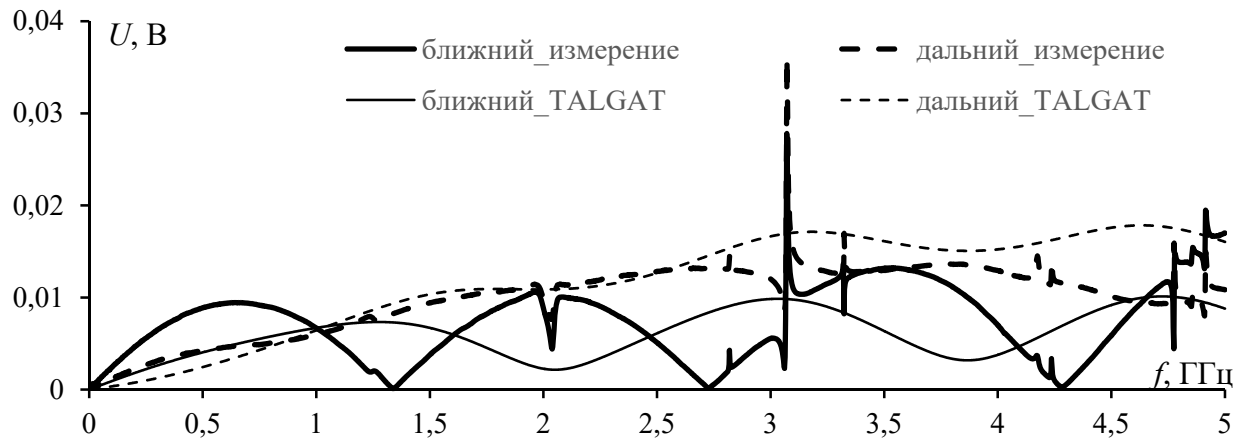


Рисунок 2 – Сравнение вычисленных и измеренных частотных зависимостей напряжений на концах центрального проводника камеры для печатной платы с модальным резервированием

Кроме того, длина соединителей тоже должна учитываться, но она при моделировании не рассматривалась.

В целом сравнение показывает согласованность результатов моделирования и эксперимента, а также необходимость более точного учета ряда параметров для корректного сравнения результатов. Верхняя частота исследования расширена до 5 ГГц по сравнению с классической ТЕМ-камерой, работающей до 2 ГГц.

*Работа выполнена в ТУСУРе при финансовой поддержке  
Российского научного фонда (проект 19-19-00424,  
<https://rscf.ru/project/19-19-00424/>)*

#### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С.117–144.

2. Пат. 2 727 075 Рос. Федерация, МПК Н 01 Р 1/00. ТЕМ-камера для оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем / Газизов Т.Р., Демаков А.В., Комнатнов М.Е. № 2019140183 ; заявл. 09.12.19 ; опубли. 17.07.2020, Бюл. № 20. 12 с.

3. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 1–7.

4. Hasan A. Alhaj, Gazizov T. R. TEM-cell measurements of the radiated emissions from PCBs with modal reservation before and after failure // IEEE The International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), September 23–25, 2022. 2022. P. 1–5.

Alhaj Hasan Adnan

#### **Quasi-static simulation of a mini-TEM cell in the TALGAT system for testing structures with modal reservation up to a frequency of 5 GHz**

The possibility of using the computational resources to replace the measurements of radiated emissions by simulation is considered. For this purpose, it is proposed to use quasi-static analysis of crosstalk from the coupled lines of the PCB with modal reservation to the central conductor of the Mini-TEM-cell, operating up to 5 GHz.