

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

ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТРУКТУРЫ С МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ В СИСТЕМЕ TALGAT

Проведено сравнение результатов измерения частотных зависимостей напряжения на входе и выходе центрального проводника классической ТЕМ-камеры для структур с модальным резервированием и результатов моделирования этих измерений в системе TALGAT. Результаты показали возможность использования вычислительных ресурсов для получения быстрых оценок без измерений.

Важно учитывать уровни помехоэмиссии и помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на ранних этапах конструирования и изготовления для экономии финансов и времени производителя до их испытания на электромагнитную совместимость (ЭМС), что позволит избежать отказа на испытаниях. В настоящее время модальное резервирование (МР) является эффективным, простым и дешёвым способом для обеспечения ЭМС и повышения надёжности РЭА на этапе конструирования [1]. До изготовления первых макетов необходимо сначала провести моделирование, получить предварительные оценки их работы и выполнить промежуточные испытания, чтобы выявить возможные причины расхождения.

ТЕМ-камеры рекомендуются стандартами по ЭМС РЭА как устройства для измерения уровня излучаемых эмиссий (ИЭ) от печатных плат (ПП), поскольку он пропорционален амплитудам напряжения, наводимого испытываемым объектом на концах центрального проводника камеры. В ТУСУРе для этой цели используют классическую ТЕМ-камеру, работающую в диапазоне частот до 2 ГГц [2], и систему компьютерного моделирования TALGAT [3] для моделирования задач ЭМС с минимальными вычислительными затратами и приемлемыми результатами.

Цель работы – подтвердить возможность использования системы TALGAT для быстрой оценки уровня ИЭ от ПП с МР путём виртуальных испытаний без измерений в реальной камере.

Для достижения этой цели и имитации виртуальной лаборатории сначала построена модель многопроводной линии передачи (МПЛ), которая имитирует ПП с МР внутри регулярной части классической ТЕМ-камеры. Общая модель состоит из активного и пассивного проводников ПП и центрального проводника камеры. Поперечное сечение и параметры ПП в камере приведены на рисунке 1. Там же приведена схема соединений линии, где все сопротивления равны 50 Ом. Между активным проводником линии и схемной землей подключен источник гармонического воздействия с амплитудой 1 В для получения амплитудно-частотной характеристики.

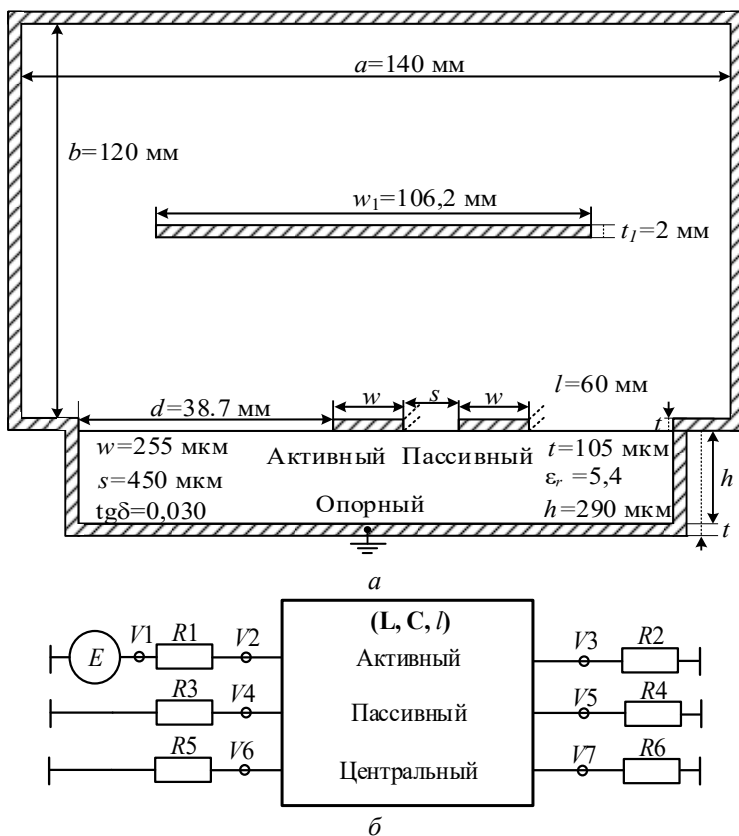


Рисунок 1 – Поперечное сечение печатной платы внутри камеры (а) и эквивалентная схема испытания (б)

Полученные элементы исходных и симметризованных матриц электростатической (C) и электромагнитной (L) индукции, максимальные значения матрицы ошибок при симметрировании этих матриц и погонные задержки приведены в таблице 1. Видно, что асимметрия мала, а минимальная погонная задержка чуть меньше значения, обратного скорости света, из-за погрешности вычислений.

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 для сравнения приведены результаты эксперимента, опубликованные ранее [4]. Сравнение показало необходимость согласовать как можно лучше исходные и реальные (из эксперимента) параметры моделирования, а также учесть вклад всех паразитных явлений и параметров. Видно, что результаты моделирования и эксперимента близки друг к другу, но выделяется сдвиг в резонансных частотах примерно в два раза. Это связано с различием реального и используемого при моделировании значения диэлектрической проницаемости ϵ_r . При изготовлении макетов выбран стеклотекстолит со значением $\epsilon_r = 4,7-5,6$ по данным производителя. По результатам исследования обнаружено, что с ростом ϵ_r меняется резонансная частота и при моделировании оптимально 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, усложняется анализ. В нашем случае длина проводника ПП принята равной 60 мм, поэтому аналогичная длина принята для центрального проводника ТЕМ-камеры. Но в реальности эти размеры отличаются. Так, для классической 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 ТЕМ-камеры нецелесообразно. Кроме того, длину соединителей тоже следует учитывать, но она при моделировании не рассматривалась.

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

Тип	C, пФ/м	L, нГн/м	Δ_C , %	Δ_L , %	τ_1 , нс/м	τ_2 , нс/м	τ_3 , нс/м
Исх.	$\begin{bmatrix} 79,769 & -13,782 & -0,8046 \\ -13,780 & 79,770 & -0,8044 \\ -0,8058 & -0,8056 & 61,889 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 374,60 & 72,643 & 0,8564 \\ 72,643 & 374,60 & 0,8563 \\ 0,8565 & 0,8564 & 179,63 \end{bmatrix}$	0,0870	0,0046	5,4327	5,3149	3,3336
Сим.	$\begin{bmatrix} 79,769 & -13,781 & -0,8052 \\ -13,781 & 79,770 & -0,8051 \\ -0,8052 & -0,8051 & 61,889 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 374,60 & 72,643 & 0,8564 \\ 72,643 & 374,60 & 0,8564 \\ 0,8564 & 0,8564 & 179,63 \end{bmatrix}$					

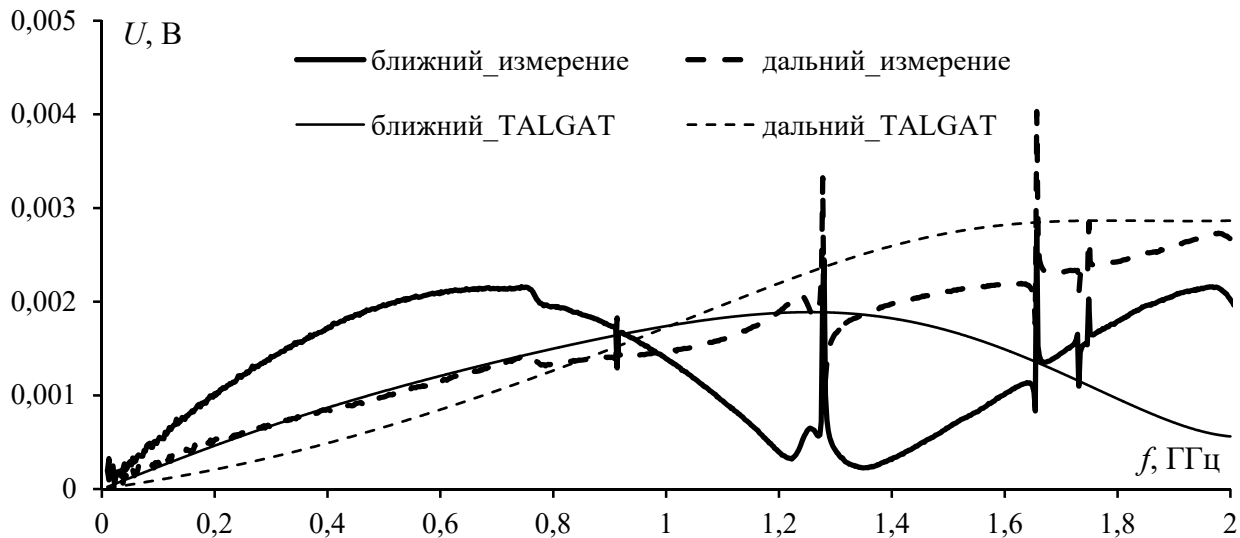


Рисунок 2 – Сравнение вычисленных и измеренных частотных зависимостей напряжений на концах центрального проводника камеры для печатной платы с модальным резервированием

В целом сравнение показывает согласованность результатов моделирования и эксперимента, а также необходимость более точного учета ряда параметров для корректного сравнения результатов.

*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. 2606173 Рос. Федерация, МПК Н 01 Р 1/00. ТЕМ-Камера / Газизов Т. Р., Комнатнов М. Е. № 2015156668 ; заявл. 28.12.15 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. 15 с.
3. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // OP 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

Virtual experiment of a structure with modal reservations in the TALGAT system

We compared the results of measuring the frequency dependences of the voltage input and output of the classical TEM-cell central conductor for a structure with modal reservation with the results of simulation of these measurements in the TALGAT system. The results showed the possibility of using the computational resources to obtain fast estimates, without measurements.