

П.А. Попов, Т.И. Третьяков, А.В. Демаков

Разработка измерительных печатных плат для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость в ТЕМ-камере

Представлены результаты разработки печатных плат для измерения излучаемых эмиссий интегральной схемы STM32F103C8T6 и S -параметров микрополосковой и копланарной линий передачи в ТЕМ-камере. Выполнен анализ требований к измерительным платам на основе действующих стандартов испытаний в ТЕМ-камере и приведены особенности их разработки. Представлены результаты измерений эмиссии интегральной схемы и S -параметров линий передачи, выполненных на основе разработанных плат.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, интегральная схема, испытательная плата.

Для измерения уровня излучаемых электромагнитных эмиссий и восприимчивости интегральных схем (ИС) широкое применение получил метод измерения в ТЕМ-камере [1]. Данные измерения проводятся согласно нормативным документам [2, 3], которые также содержат требования к измерительной установке. Для проведения измерений в ТЕМ-камере [4] исследуемый объект устанавливается на измерительную печатную плату (ПП), размещаемую в апертуре камеры. Исследуемый объект размещается во внутреннем пространстве ТЕМ-камеры, при этом образуя электромагнитную связь с ее центральным проводником. Излучаемые эмиссии от объекта представляются в виде частотных зависимостей напряжения на входе ТЕМ-камеры.

При этом токоведущие проводники и электронные компоненты, размещаемые на измерительной ПП для обеспечения работы исследуемого объекта, также могут вносить свой вклад в измеряемый уровень эмиссии. В то же время измерительная ПП представляет собой электромагнитный экран для снижения влияния внешних электромагнитных помех на результаты измерений. В рамках исследований излучаемых эмиссий с помощью ТЕМ-камеры требуется разработка измерительных ПП для ИС, микрополосковой (МЛП) и копланарной (КЛП) линий передачи в соответствии с требованиями [2, 3].

Цель работы – разработать измерительные ПП для проведения исследований излучаемых эмиссий от ИС, МЛП и КЛП в ТЕМ-камере.

Требования стандартов испытаний к измерительным платам

Согласно требованиям нормативных документов [2, 3], размеры измерительной ПП для ИС должны составлять $100 \times 100 \text{ мм}^2$ при наличии не менее четырех проводящих слоев. Два внутренних слоя ПП используются в качестве сигнальных проводников, а два внешних слоя имеют сплошные полигоны заземления. Края внешнего слоя ПП со стороны размещения ИС представляют собой сплошные полигоны заземления для обеспечения электрического контакта ПП с внешним проводником ТЕМ-камеры для обеспечения экранирования. С обратной стороны ПП размещаются периферийные устройства, необходимые для работы ИС, при этом переходные металлизированные отверстия располагаются под выводами ИС (рис. 1).

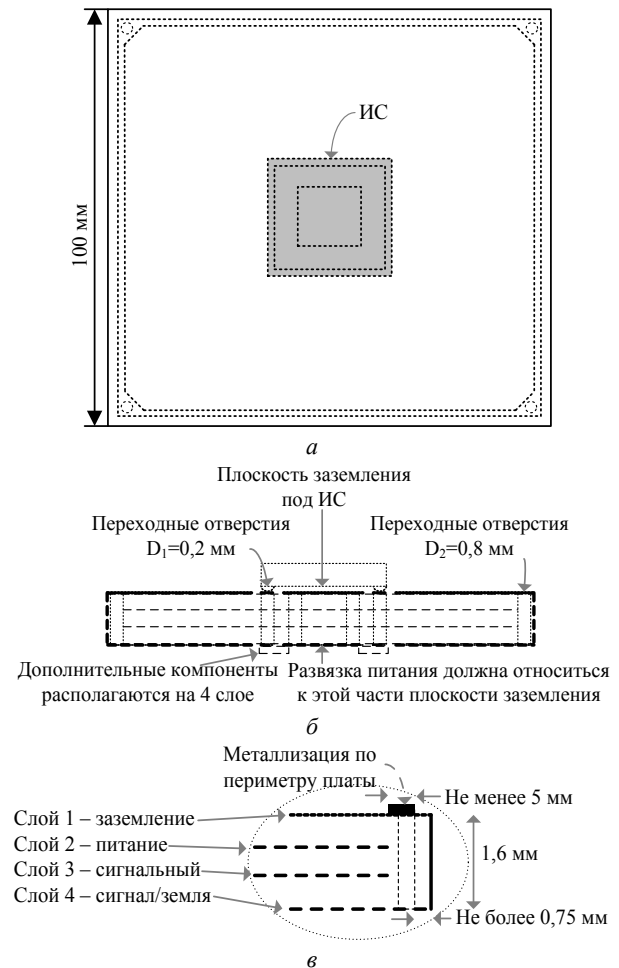


Рис. 1. Структура измерительной платы: вид сверху (а), вид сбоку (б), поперечное сечение (в)

Длина трасс, размещение и ориентация компонентов должны быть оптимизированы с целью минимизации площади контуров протекания токов. Диаметры переходных отверстий, расположенных под выводами ИС и по краям ПП, должны составлять не менее $D_1 = 0,2 \text{ мм}$ и $D_2 = 0,8 \text{ мм}$ соответственно. Переходные отверстия, соединяющие плоскости заземления на первом и четвертом слое ПП, должны находиться на расстоянии не более 10 мм. Переходные отверстия, соединяющие сигнальные трассы, должны располагаться как можно ближе к переходным отвер-

ствиям, соединяющим полигоны «земли», для уменьшения пути протекания обратных токов.

Развязка по электропитанию ИС должна быть выполнена в соответствии с рекомендациями производителя. Блокировочные конденсаторы по питанию должны быть подключены к полигону «земли» в непосредственной близости от ИС.

Импеданс источника питания платы может оказать влияние на результаты измерений в случае, если развязка источника питания не рассчитана должным образом. Для контроля импеданса питания для любого внешнего источника питания ПП должна иметь группу развязывающих конденсаторов.

Разработка измерительной ПП для ИС STM32F103C8T6

Выполнена разработка структурной схемы измерительной ПП для проведения испытаний микроконтроллера STM32F103C8T6 на излучаемые эмиссии. Напряжение питания 5 В поступает через разъем mini USB. Для работы ИС необходимо напряжение 3,3 В, которое поступает с выхода стабилизатора напряжения. Фильтр Ф1 предотвращает возникновение пульсаций напряжения на входе стабилизатора, а фильтр Ф2 поддерживает стабильность напряжения на выходе стабилизатора. Отладочные интерфейсы SW/JTAG используются для отладки ИС. Устройства ввода и вывода предназначены для подключения внешних устройств к испытательной плате. Тактовый генератор обеспечивает точность и стабильность опорной частоты, а также синхронизацию ИС с внешними устройствами (рис. 3).

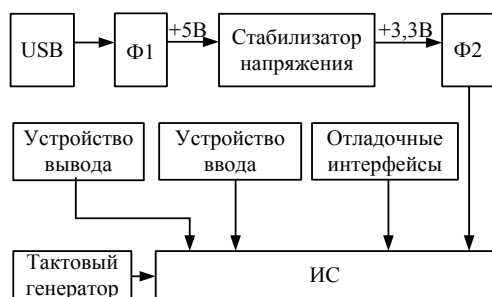
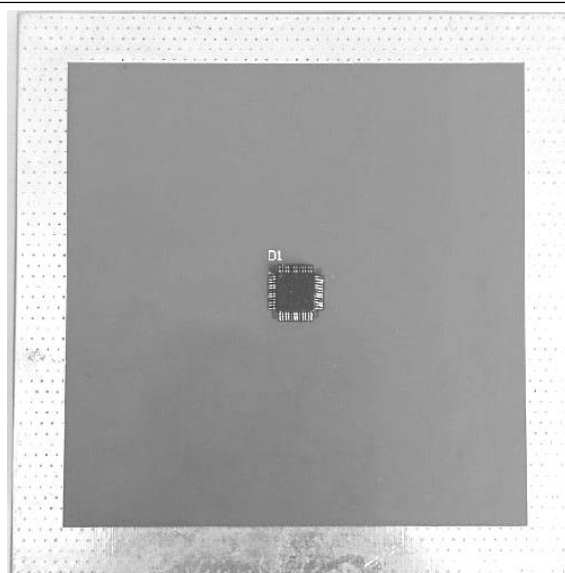


Рис. 2. Структурная схема измерительной ПП

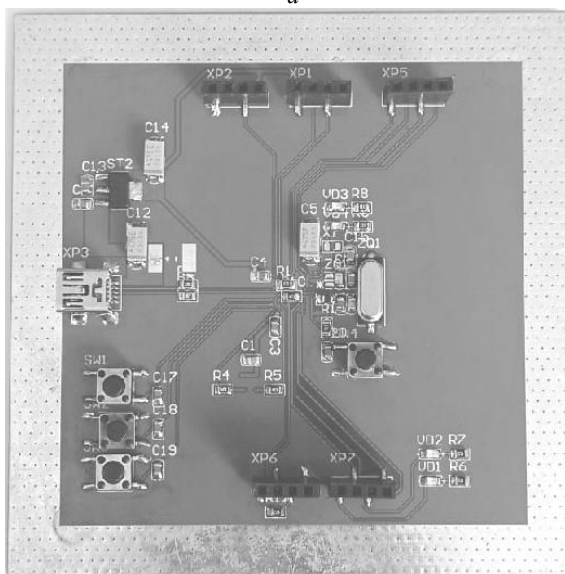
На основе предъявляемых требований и разработанной структурной схемы создана измерительная ПП, лицевая и обратная стороны которой приведены на рис. 3.

Разработка измерительных ПП с линиями передачи

Для исследования электромагнитной связи объекта испытания в виде линии передачи и внутреннего проводника ТЕМ-камеры согласно аналогичным требованиям разработаны две измерительные ПП с МЛП и КЛП. В качестве диэлектрика ПП использован стеклотекстолит ($\epsilon_r = 4,5$) толщиной $h = 1,6$ мм при толщине проводников $t = 0,035$ мм. Ширина активного проводника для МЛП $w_1 = 3,256$ мм, а для КЛП – $w_2 = 2,65$ мм при значении ширины зазора $s_1 = 0,8$ мм (рис. 4).



а



б

Рис. 3. Измерительная ПП для ИС STM32F103C8T6: лицевая (а) и обратная (б) стороны

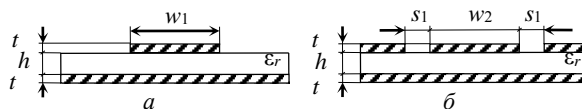


Рис. 4. Поперечные сечения МЛП (а) и КЛП (б)

Для подключения МЛП и КЛП к измерительному оборудованию использованы коаксиально-волноводные переходы (КВП) ПКМ2-40-05P-0,3Ф2 (рис. 5).

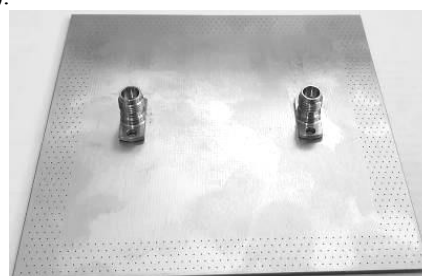


Рис. 5. Сборка КВП и измерительной ПП

На рис. 6 приведены лицевые стороны измерительных ПП с МЛП и КЛП.

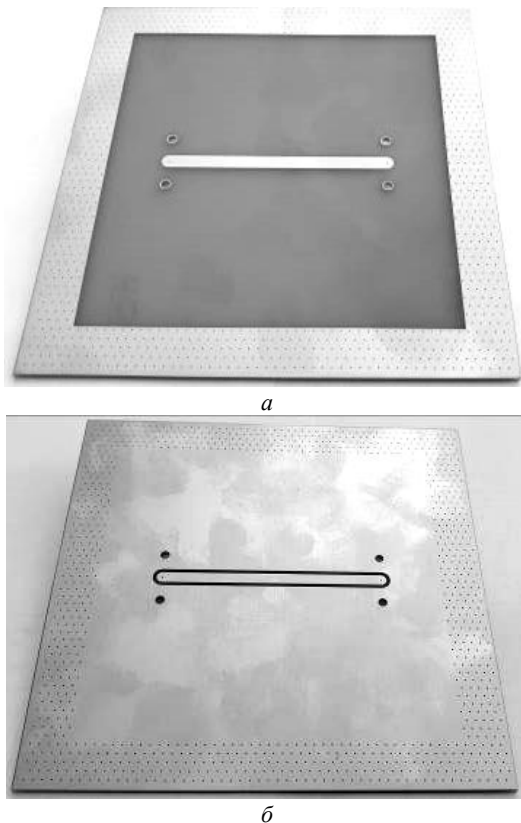


Рис. 6. Измерительные ПП с МЛП (а) и КЛП (б)

Результаты измерений

Выполнено измерение излучаемой эмиссии ИС STM32F103C8T6 при помощи измерительного приемника (ИП) R&S ESPR 7 и ТЕМ-камеры [5, 6] с диапазоном частот от 50 кГц до 5,2 ГГц. Получены частотные зависимости напряжения на входе ИП в диапазоне частот от 0,15 до 100 МГц. Наблюдается незначительное увеличение уровня эмиссии до 10 дБ вблизи частоты 60 МГц. Максимальный уровень эмиссии $U = 16,2$ дБмкВ наблюдается вблизи частоты тактирования ИС 72 МГц. При этом на остальных частотах эмиссии сопоставимы по уровню с шумом ИП (рис. 7).

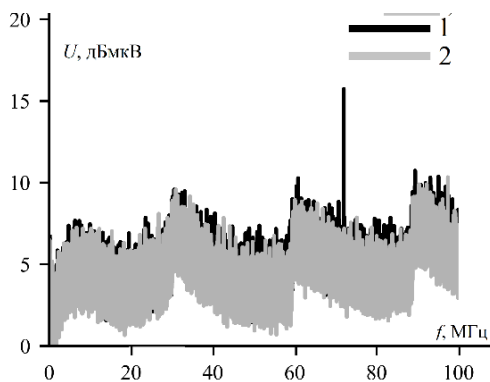


Рис. 7. Частотные зависимости напряжения эмиссии на входе ТЕМ-камеры, полученные при функционировании (1) и при выключенной (2) ИС

С помощью скалярного анализатора цепей измерены частотные зависимости модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ от входа МЛП и коэффициента передачи $|S_{21}|$ между ТЕМ-камерой и МЛП (рис. 8). Из полученных зависимостей наблюдается рассогласование МЛП с измерительным трактом 50 Ом на частотах 0,8–2,5 ГГц с максимальным значением $|S_{11}| = -5$ дБ вблизи 2,1 ГГц, при этом значения $|S_{21}|$ не превышают уровня -18 дБ до 5,2 ГГц. В области частот выше 5,2 ГГц наблюдается рост числа резонансов на зависимостях $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$, вызванных возбуждением в ТЕМ-камере высших типов волн.

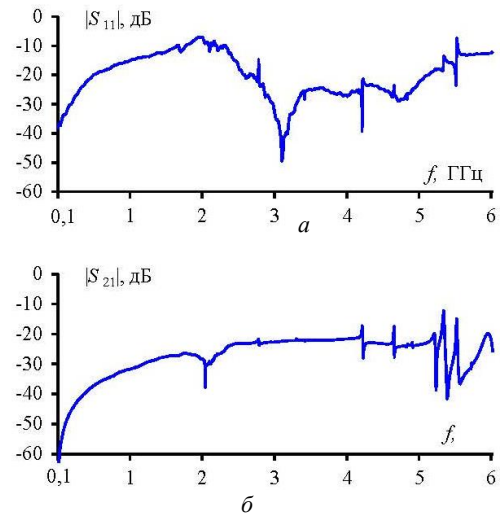


Рис. 8. Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) МЛП

Далее выполнены аналогичные измерения S -параметров КЛП в ТЕМ-камере (рис. 9). Из полученных результатов наблюдается согласование КЛП с измерительным трактом на частотах до 5,2 ГГц при $|S_{11}|$ не более -13 дБ и $|S_{21}|$ не более -25 дБ. На частотах выше 5,2 ГГц также наблюдается рост числа резонансов зависимостей $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ из-за возбуждения высших типов волн.

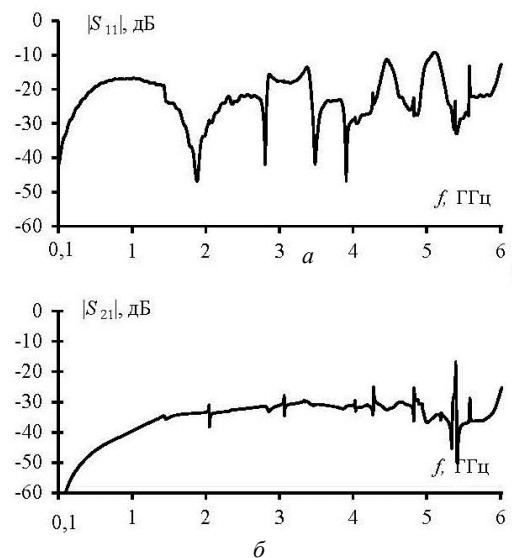


Рис. 9. Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) КЛП

Заключение

Выполнен анализ требований к измерительным ПП на основе действующих стандартов испытаний ИС в ТЕМ-камере. Представлены результаты измерений эмиссии ИС и S-параметров МЛП и КЛП, выполненных с помощью разработанных ПП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162).

Литература

1. Deng S. Mode suppressed TEM cell design for high frequency IC measurements / S. Deng, D. Pommerenke, T. Hubing, J. Drewniak, D. Beetner, D. Shin, S. Kim, H. Kwak // IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – 2007. – P. 1–6.

2. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2, First Edition, 2005.

3. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 62132-2, First Edition, 2010.

4. Пат. 2727075 РФ, ТЕМ-камера для оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов. – 2019140183; Заяв. 09.12.2019; Опубл. 17.07.20.

5. Демаков А.В. Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 52–56.

6. Demakov A.V. Improved TEM-cell for EMC tests of integrated circuits / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // International multi-conference on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 2017. – P. 399–402.

Попов Павел Андреевич

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: ronot88@gmail.com

Третьяков Тимур Игоревич

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: henos19039@gmail.com

Демаков Александр Витальевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа

ORCID: 0000-0002-5672-5911

Эл. почта: vandervals@inbox.ru