

УДК 621.372.8

А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов

## Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость

Представлены результаты разработки ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем с максимальными габаритами  $30 \times 30 \times 5 \text{ мм}^3$  на электромагнитную совместимость в диапазоне частот до 5,2 ГГц. Рассмотрены варианты исполнения ТЕМ-камеры, отличающиеся формой согласующих коаксиально-полосковых переходов. Выполнены электродинамический анализ и параметрическая оптимизация переходов с целью уменьшения максимального значения частотной зависимости  $|S_{11}|$ . На основе полученных при моделировании частотных зависимостей  $|S_{11}|$  для дальнейшей разработки выбран вариант, обеспечивающий наилучшее согласование ( $|S_{11}|$  менее минус 30 дБ). Для проверки сходимости результатов вычислены частотные зависимости  $|S_{11}|$  с более детальным шагом пространственной дискретизации численными методами матрицы линии передачи и конечных элементов.

**Ключевые слова:** ТЕМ-камера, электромагнитная совместимость, интегральная схема, помехоустойчивость.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-52-56

Ввиду постоянного роста частот и увеличения степени интеграции интегральных схем (ИС) увеличивается их восприимчивость к внешним электромагнитным воздействиям [1]. Отказ ИС, входящих в состав радиоэлектронных средств (РЭС) и систем критического назначения в условиях внешних электромагнитных воздействий, является недопустимым, в связи с чем актуально испытание новых образцов отечественной микроэлектронной базы на электромагнитную совместимость (ЭМС).

Существует широкий ряд методов для оценки помехоустойчивости и измерения помехоэмиссии РЭС различного назначения, описанных в международных стандартах [2–5]. Учитывая современные тенденции развития технологии ИС [1], необходимо совершенствование существующих методов и устройств для проведения испытаний, которое позволит проводить исследование в более широких диапазонах частот и амплитуд воздействий.

В настоящее время активно ведутся исследования в данном направлении. Так, например, для испытаний на помехоустойчивость и помехоэмиссию ИС представлена конструкция экранированной полосковой линии [6]. Расчет геометрических параметров производился методом отображения пространств проектных параметров (Response surface sparse mapping), отличающимся использованием грубой (схемной) и точной (электродинамической) моделей для ускорения нахождения оптимальных параметров исследуемой структуры. Значение коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) разработанной полосковой линии не превышает уровня 1,25 ( $|S_{11}| \leq -20 \text{ дБ}$ ) в полосе частот до 4,4 ГГц. Между тем необходимо увеличение верхней граничной частоты измерительных устройств для испытаний в более широком диапазоне частот.

ТЕМ-камера представляет собой СВЧ-устройство, предназначенное для испытаний на помехоэмиссию [2] и помехоустойчивость [3] ИС. Конструкция камеры состоит из регулярной части волновода с расположенным внутри центральным про-

водником, которая соединяется с СВЧ-соединителями с помощью пирамидальных переходов (рис. 1).

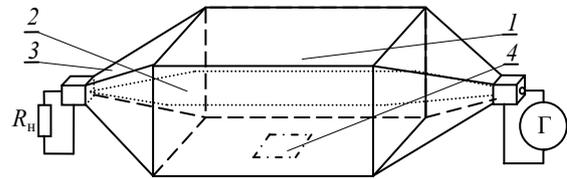


Рис. 1. Общий вид ТЕМ-камеры: 1 – экранированный корпус; 2 – центральный проводник; 3 – пирамидальные переходы; 4 – место под испытываемый объект

Для оценки помехоустойчивости испытываемый объект (ИО) помещают во внутренний объем камеры в её регулярной части, где поле однородно. При подаче на вход камеры сигнала от генератора с заданными характеристиками (длительность, амплитуда, коэффициент модуляции) за счет определенной формы камеры и согласованной нагрузки в регулярной части распространяется поперечная электромагнитная волна (ТЕМ-волна), которая воздействует на ИО и поглощается согласованной нагрузкой. Помехоэмиссия измеряется при аналогичном размещении ИО путем измерения наведенных на центральный проводник камеры токов от ИО при помощи измерительного приемника. Основным требованием для проведения испытания с помощью ТЕМ-камер является равномерность распространения электромагнитного поля (ЭМП) в объеме под ИО в рабочей полосе частот. Согласно стандарту [2], неравномерность распространения ЭМП не должна превышать  $\pm 3 \text{ дБ}$ . Данное требование обеспечивается за счёт минимизации отражений от неоднородностей конструкции и постоянства волнового сопротивления в каждом элементарном поперечном сечении камеры.

Цель работы – представить результаты разработки ТЕМ-камеры для испытаний в диапазоне частот до 5 ГГц отечественного микроконтроллера производства компании АО «ПКК Миландр» модели 1986BE91T.

### Расчет регулярной части ТЕМ-камеры

Разработка и расчёт конструкции ТЕМ-камеры проводились для ИО с размерами  $30 \times 30 \times 5 \text{ мм}^3$ . Согласно экспериментальным оценкам [7], высота ИО должна составлять не более  $1/3$  от расстояния между основанием камеры и центральным проводником. Данное условие является необходимым для уменьшения неравномерности распределения ЭМП, которое возникает при помещении ИО внутри камеры. Исходя из заданных габаритов, высота камеры в её регулярной части выбрана равной 30 мм.

Согласно стандартам [2, 3], испытуемая ИС устанавливается на четырехслойной печатной плате размерами  $100 \times 100 \text{ мм}^2$  со сплошным полигоном земли (металлизацией) на краях платы для обеспечения электрического контакта с корпусом ТЕМ-камеры. На обратной стороне испытательной платы располагается периферийное оборудование для обеспечения работы испытуемой ИС. Лицевая сторона разработанной печатной платы с испытуемым микроконтроллером 1986ВЕ91Т представлена на рис. 2.

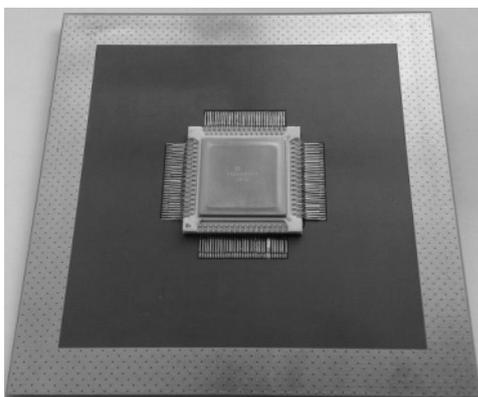


Рис. 2. Лицевая сторона испытательной платы с ИС 1986ВЕ91Т

С учётом требований к испытательной плате и обеспечения волнового сопротивления 50 Ом в системе TALGAT [8] вычислены геометрические размеры поперечного сечения регулярной части ТЕМ-камеры (рис. 3):  $a = 100 \text{ мм}$ ,  $w = 43 \text{ мм}$ ,  $t = 1 \text{ мм}$ ,  $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ .

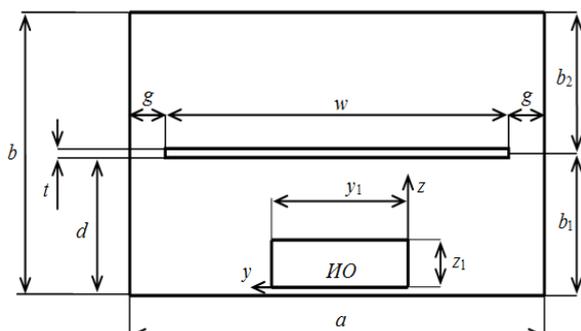


Рис. 3. Поперечное сечение регулярной части ТЕМ-камеры

На основе полученных геометрических размеров построена твердотельная модель регулярной

части камеры длиной  $L = 100 \text{ мм}$  и выполнено ее электродинамическое моделирование. Как видно из рис. 4, значение модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  не превышает  $-55 \text{ дБ}$  в требуемом диапазоне частот, что говорит о согласовании регулярной части камеры с трактом 50 Ом.

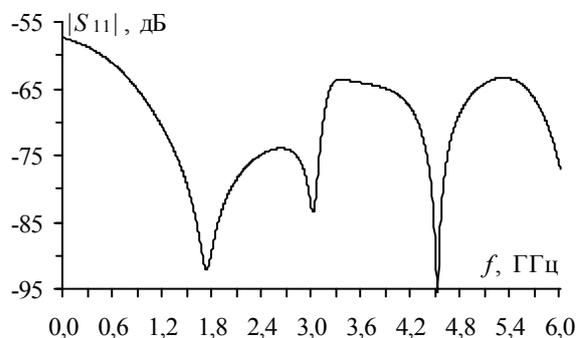


Рис. 4. Частотная зависимость  $|S_{11}|$  регулярной части ТЕМ-камеры

### Исследование форм перехода для согласования регулярной части

Для согласования регулярной части ТЕМ-камеры с волновым сопротивлением коаксиального соединителя рассмотрены формы коаксиально-полосковых переходов, отличные от пирамидальных, используемые в ТЕМ-камерах классической конструкции [9]. За основу каждого варианта камеры выбрана вышеописанная регулярная часть. Поиск альтернативных и конструктивно более простых способов согласования может значительно упростить процесс изготовления ТЕМ-камер и имеет научный и практический интерес.

Изначально рассмотрена конструкция ТЕМ-камеры классического исполнения. Геометрические размеры всех элементов конструкции камеры (рис. 5) выбраны, исходя из экспериментальных оценок и аналитических выражений, представленных в работах [9, 10].

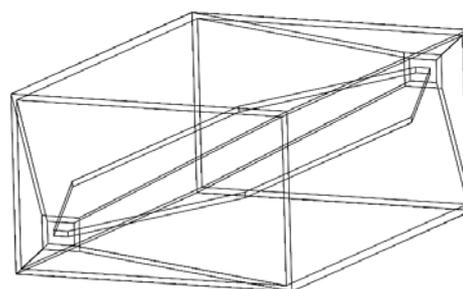


Рис. 5. Изометрический вид ТЕМ-камеры с пирамидальными переходами

Без использования дополнительных конструктивных изменений  $|S_{11}|$  ТЕМ-камеры с пирамидальными переходами составил менее минус 20 дБ в полосе частот до 4,75 ГГц. Резонансная частота камеры, после которой возбуждаются высшие типы волн, составила 5 ГГц. Из рис. 6 видно, что на частоте 5 ГГц наблюдается резонанс, связанный с длиной и шириной регулярной части корпуса камеры.

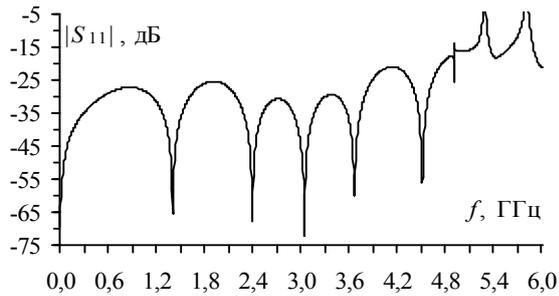


Рис. 6. Частотная зависимость  $|S_{11}|$  ТЕМ-камеры с пирамидальными переходами

ТЕМ-камера с корпусом прямоугольной формы является наиболее простой из рассмотренных конструкций. Размеры внутреннего объема корпуса, внутри которого располагается центральный проводник, составляют  $100 \times 100 \times 30$  мм<sup>3</sup> (рис. 7). Угол сужения ширины центрального проводника  $\alpha$  выбран с помощью метода доверительных областей [11]. В ходе оптимизации минимизировался коэффициент отражения  $|S_{11}|$  в диапазоне частот до 5 ГГц. По результатам оптимизации получено  $\alpha = 19,4^\circ$ . При этом до частоты 4,8 ГГц коэффициент отражения  $|S_{11}|$  не превышает уровня минус 28 дБ (рис. 8), что приемлемо для испытаний согласно стандартам [2, 3].

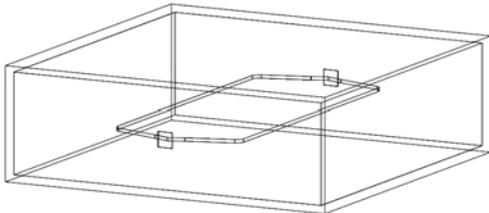


Рис. 7. Изометрический вид ТЕМ-камеры с прямоугольным корпусом

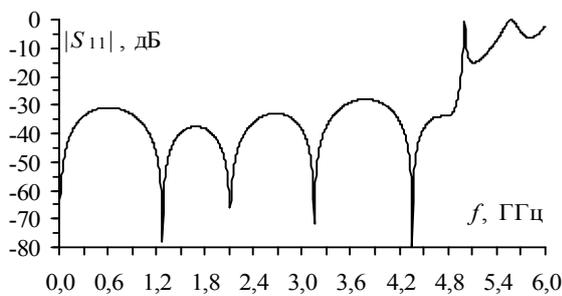


Рис. 8. Частотная зависимость  $|S_{11}|$  ТЕМ-камеры с прямоугольным корпусом

Для расширения полосы рабочих частот рассмотрена ТЕМ-камера с сужением ширины корпуса при его неизменной высоте (рис. 9) [12].

Уменьшение ширины корпуса выполнено под линейным углом  $\alpha$  с прямоугольным выступом на конце сужения, внутри которого выполнено круглое отверстие для коаксиально-полоскового перехода. Соединение проводящих поверхностей корпуса выполнено в виде фаски под углом  $57^\circ$  с шириной скоса 1 мм. Уменьшение ширины центрального проводника производится под углом  $\alpha_1$  на расстоянии  $L_1$  от продольной плоскости симметрии камеры и под углом  $\alpha_2$  до места соединения центрального провод-

ника с коаксиальным соединителем и с округлением углов радиусами  $R_1$  и  $R_2$  соответственно.

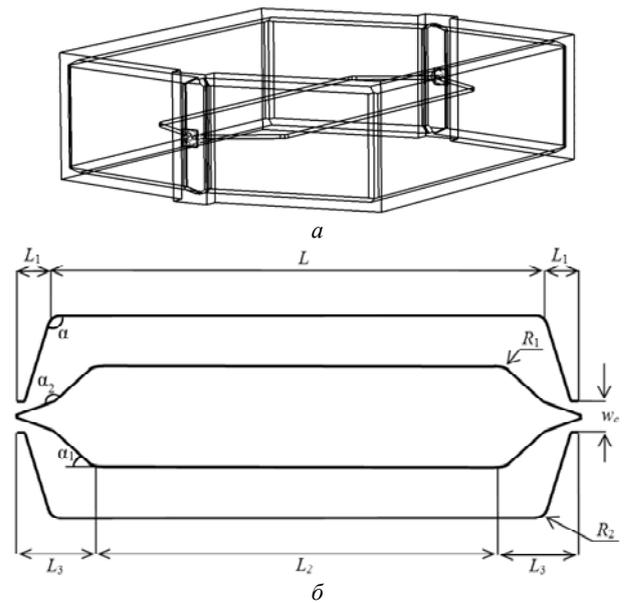


Рис. 9. Изометрический вид (а) и вид сверху (б) ТЕМ-камеры с сужающимися переходами с неизменной высотой

Параметрическая оптимизация данной модели выполнена аналогично оптимизации ТЕМ-камеры с прямоугольным корпусом. Получены следующие значения:  $\alpha = 11,9^\circ$ ,  $\alpha_1 = 31,8^\circ$ ,  $\alpha_2 = 136,7^\circ$ ,  $L_1 = 12,6$  мм,  $R_1 = 2,45$  мм,  $R_2 = 1$  мм. При этом  $|S_{11}|$  не превышает уровня минус 30 дБ в полосе частот до 5,2 ГГц (рис. 10).

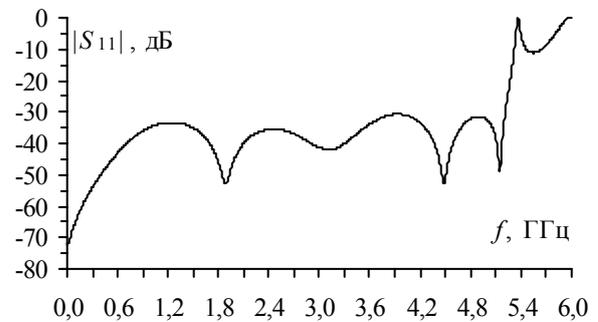


Рис. 10. Частотная зависимость  $|S_{11}|$  ТЕМ-камеры с сужающимися переходами при неизменной высоте

### Проверка результатов моделирования на сходимость

Выбран вариант исполнения ТЕМ-камеры с сужающимися переходами и неизменной высотой, поскольку он обеспечивает лучшее согласование с трактом 50 Ом.

Анализ выбранной модели проводился методом конечных элементов (МКЭ), который преимущественно применяется для анализа СВЧ-устройств со сложной геометрической структурой. Для подтверждения сходимости результатов анализа выполнен повторный электродинамический анализ с более детализированным шагом пространственной дискретизации (сетки) методами МКЭ и матрицы линии

передачи (МЛП). Настройка шага дискретизации производилась заданием числа подынтервалов на длину волны вблизи модели (первый индекс) и на границе анализируемого объема пространства (второй индекс). Представлены результаты электродинамического анализа, полученные с использованием МКЭ (рис. 11) и метода МЛП (рис. 12).

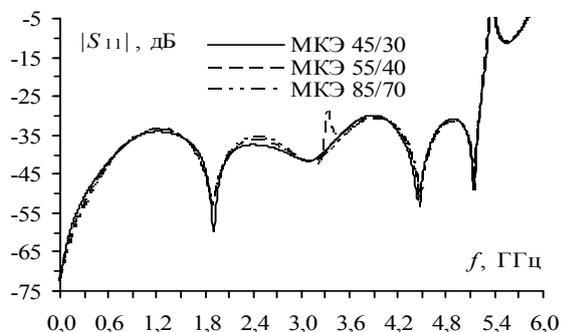


Рис. 11. Частотные зависимости  $|S_{11}|$  ТЕМ-камеры, полученные с использованием МКЭ при увеличении шага сетки

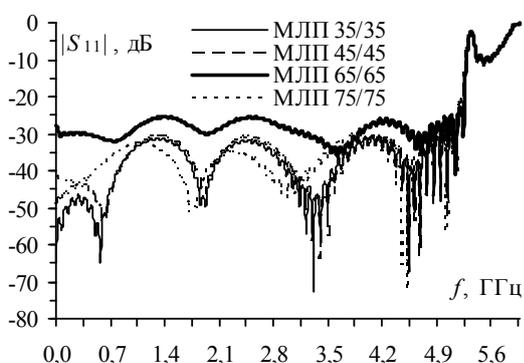


Рис. 12. Частотные зависимости  $|S_{11}|$  ТЕМ-камеры, полученные с использованием метода МЛП при увеличении шага сетки

Анализ результатов, полученных с помощью МКЭ, показал хорошую сходимость частотных зависимостей  $|S_{11}|$ . Результаты, полученные методом МЛП, показали худшую сходимость, однако детализация сетки позволила получить менее изрезанные частотные зависимости и избавиться от ложного резонанса на частоте 0,6 ГГц. Отличие значений, полученных методом МЛП с шагом сетки, равным  $\lambda / 65$ , объясняется неверным разбиением модели из-за введенной продольной плоскости симметрии, что часто используется для ускорения анализа симметричных структур. Между тем максимальные значения  $|S_{11}|$ , полученные с помощью МКЭ и метода МЛП, близки и не превышают минус 30 дБ (см. рис. 12).

### Заключение

В данной работе представлены результаты разработки ТЕМ-камеры для испытаний ИС на ЭМС в диапазоне частот до 5 ГГц. Рассмотрен ряд вариантов исполнения ТЕМ-камеры. Выполнены электродинамический анализ и параметрическая оптимизация модели ТЕМ-камеры с целью уменьшения неравномерности распространения ЭМП в зоне ИО. По результатам анализа частотных зависимостей

$|S_{11}|$  выбрана модель, обеспечивающая лучшее согласование ( $|S_{11}| < \text{минус } 30 \text{ дБ}$ ). Электродинамический анализ выбранной модели, выполненный с помощью разных численных методов с постепенным уменьшением шага дискретизации, показал сходимость результатов моделирования. В дальнейшем планируется изготовить ТЕМ-камеру на основе разработанной твердотельной модели и произвести её измерения.

Разработка испытательной платы с микроконтроллером выполнена в рамках проекта 8.9562.2017/8.9 Минобрнауки России, моделирование ТЕМ-камеры выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-38-00619.

### Литература

1. Комнатнов М.Е. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2014. – №4(34). – С. 67–78.
2. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 62132-2, First Edit., 2010. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6508> (дата обращения: 11.11.2017).
3. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. – Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2, First Edit., 2005. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6185> (дата обращения: 11.11.2017).
4. IEC 61000-4-21, Electromagnetic compatibility (EMC). – Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation Chamber Test Methods, 2011-01. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/4191> (дата обращения: 11.11.2017).
5. IEC 61967-3. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions. – Part 3: Measurement of radiated emissions. – Surface scan method, 2014-08. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6186> (дата обращения: 11.11.2017).
6. Mandic T. Optimization of IC-Stripline Performance by Response Surface Space-Mapping Technique / T. Mandic, R. Gillon, A. Baric // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2017. – Vol. 59, № 4. – P. 1232–1238.
7. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 1974. – Vol. 16, №4. – P. 189–195.
8. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.
9. Crawford M.L. Expanding the bandwidth of TEM cells for EMC measurements / M.L. Crawford, J.L. Workman, C.G. Thomas // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 1978. – Vol. 20, № 3. – P. 368–375.
10. Комнатнов М.Е. Оптимизация геометрических параметров ТЕМ-камеры / М.Е. Комнатнов, Т.Т. Газизов // Технологии ЭМС. – 2016. – № 4 (59). – С. 7–16.
11. Miao X. An adaptive retrospective trust region method for unconstrained optimization / X. Miao, Z. Liu // International Conference on Information Science and Engineering (ICISE). – Dec. 4–6, 2010. – P. 1–4.
12. Demakov A.V. Improved TEM-cell for EMC tests of integrated circuits / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // Proc.

of IEEE 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences; Novosibirsk, Akademgorodok, Russia, 18–24 Sep. 2017. – Novosibirsk, 2017. – P. 399–402.

#### Демаков Александр Витальевич

Инженер каф. телевидения и управления Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Вершинина ул., д. 47, г. Томск, Россия, 634045  
Тел.: +7-999-495-87-05  
Эл. почта: vandervals@inbox.ru

#### Комнатнов Максим Евгеньевич

Ст. науч. сотр., доцент каф. телевидения и управления Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Вершинина ул., д. 47, г. Томск, Россия, 634045  
Тел.: +7-952-888-38-96  
Эл. почта: maxmek@mail.ru

Demakov A.V., Komnatnov M.E.

#### Development of a TEM-cell for electromagnetic compatibility testing of integrated circuits

The results of the development of a TEM-cell for testing integrated circuits with maximum size  $30 \times 30 \times 5$  mm<sup>3</sup> on electromagnetic compatibility in the frequency range up to 5.2 GHz are presented. The versions of TEM-cell, differing in the form of the matching coaxial-stripline transitions are considered. Electrodynamic simulation and parametric optimization of transitions are performed in order to achieve agreement with the transmission line. The variant providing the best matching is chosen for the further development based on the frequency dependences of the magnitude of the reflection coefficient  $|S_{11}|$  ( $|S_{11}|$  less than -30 dB). Frequency dependencies of  $|S_{11}|$  of chosen variant are calculated with a more detailed step of mesh by transmission line and finite element methods to verify the convergence of the results.

**Keywords:** TEM-cell, electromagnetic compatibility, integrated circuits, noise immunity.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-52-56

#### References

1. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. On joint climatic and electromagnetic testing of radioelectronic equipment. *Doklady TUSUR*, 2014, vol. 34, no. 4, pp. 39–45 (In Russ.)

2. *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. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/6508> (accessed: 11 Nov. 2017).

3. *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. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/6185> (accessed: 11 Nov. 2017).

4. *IEC 61000-4-21, Electromagnetic compatibility (EMC). – Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation Chamber Test Methods, 2003-08*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/4191> (accessed: 11 Nov. 2017).

5. *IEC 61967-3. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions. – Part 3: Measurement of radiated emissions - Surface scan method, 2014-08*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/6186> (accessed: 11 Nov. 2017).

6. Mandic T., Gillon R., Baric A. Optimization of IC-Stripline Performance by Response Surface Space-Mapping Technique / *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 1232–1238.

7. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, 1974, vol. 16, no. 4, pp. 189–195.

8. Kuksenko S.P., Zabolotsky A.M., Melkozerov A.O., Gazizov T.R. New features of electromagnetic compatibility in TALGAT simulation software. *Doklady TUSUR*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 45–50. (In Russ.)

9. Crawford M.L., Workman J.L., Thomas C.G. Expanding the bandwidth of TEM cells for EMC measurements. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, 1978, vol. 20, no. 3, pp. 368–375.

10. Komnatnov M.E., Gazizov T.T. Optimization of geometrical parameters of TEM cell. *Technologii EMC*, 2016, vol. 59, no. 4, pp. 7–16 (In Russ.)

11. Miao X., Liu Z. An adaptive retrospective trust region method for unconstrained optimization. *International Conference on Information Science and Engineering (ICISE)*, 2010, pp. 1–4.

12. Demakov A.V., Komnatnov M.E. Improved TEM-cell for EMC tests of integrated circuits. *Proc. of IEEE 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences*, 2017, pp. 399–402.

#### Alexander V. Demakov

Engineer, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 47, Vershynin st., Tomsk, Russia, 634045  
Phone: +7-999-495-87-05  
Email: vandervals@inbox.ru

#### Maxim E. Komnatnov

PhD, Assistant Professor, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 47, Vershynina st., Tomsk, Russia, 634045  
Phone.: +7-952-888-38-96  
Email: maxmek@mail.ru