

УДК 621.371.32

М.Е. Комнатнов, С.А. Тернов

Полосковая линия для оценки устойчивости радиоэлектронных средств к воздействию электромагнитного излучения в диапазоне частот до 3 ГГц

Разработана полосковая линия с волновым сопротивлением 50 Ом, предназначенная для испытания радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость в диапазоне частот до 3 ГГц. Предложена методика с алгоритмом оптимизации, включающая использование аналитического и численных (квазистатического и электродинамического) методов анализа геометрических параметров полосковой линии. Представлена зависимость ширины опорного проводника от ширины активного проводника полосковой линии. Используя предложенную методику, максимальное значение частотной зависимости $|S_{11}|$ минимизировано до -20 дБ в диапазоне частот до 3 ГГц при высоте испытываемого объекта до 20 мм. Представлены результаты измерения частотных зависимостей $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ полосковой линии, согласующиеся с результатами вычисления, в диапазоне частот до 3 ГГц.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, полосковая линия, моделирование, оптимизация

Введение

Совершенствование различных конструкций для проведения испытаний на помехоустойчивость радиоэлектронных средств (РЭС) остаётся одной из актуальных задач в области электромагнитной совместимости (ЭМС). Для воздействия однородного поля высокой амплитуды на испытываемый объект (ИО) в коротковолновом диапазоне (1–30 МГц) необходимы значительные габариты безэховой камеры (БЭК) и излучающей системы, что не всегда целесообразно при исследованиях и испытаниях небольших РЭС. Оценка устойчивости ИО к воздействию электромагнитного поля (ЭМП) может быть получена с применением более компактного и дешевого варианта конструкции устройства [1]. Устройство представляет собой несимметричную полосковую линию и состоит из двух металлических пластин, между которыми распространяется электромагнитная волна, возбуждаемая сигналом от генератора. В дальнейшем устройство, названное «stripline» (полосковая линия (ПЛ)), было модифицировано и включено в международный стандарт ISO 11452-5:2002 для испытаний на устойчивость к ЭМП небольших компонентов и кабельной продукции в автомобильной промышленности [2]. Межгосударственный стандарт ГОСТ ИСО 11452-5-2007 [3] аналогичен вышеописанному и внесён в действующие стандарты на территории РФ ГОСТ 32140-2013 [4] и ГОСТ 32141-2013 [5]. Стандарт предполагает испытания компонентов транспортных средств на устойчивость к узкополосному излучению электромагнитной энергии, в диапазоне частот от 20 МГц до 400 МГц и высотой ИО до 50 мм [3]. Измерения с использованием ПЛ применяются для решения разных практических задач, а её совершенствование остаётся актуальным в связи с неуклонным ростом рабочих частот и помеховых сигналов, а также миниатюризацией и интеграцией компонентной базы. Так, например, для оценки воздействия ЭМП на небольшие (до 15 мм) ИО (электронная компонентная база, соединители и пр.) разработана конструкция миниатюрной ПЛ с модулем коэффициента отражения $|S_{11}|$, не превышающим минус 10 дБ в диапазоне частот до 1 ГГц [6]. Для измерения эффективности экранирования материалов и прокладок предложена конструкция ПЛ с высотой ИО до 40 мм и $|S_{11}|$, не превышающим минус 5 дБ в диапазоне частот до 18 ГГц [7]. Для оценки устойчивости ноутбука к электрическому полю напряжённостью 2,7 кВ/м создана конструкция с двойным углом клинообразного расширения с рабочим диапазоном частот до 3 ГГц [8]. Введенный недавно документ ИЕС 61967-8 по измерению помехоэмиссии ЭМП интегральных схем (ИС) в диапазоне частот от 150 кГц до 3 ГГц предполагает использование устройств на основе ПЛ, с $|S_{11}| \leq -20$ дБ [9]. Для оценки помехоэмиссии

ЭМП от ИС сотового телефона, создана ПЛ с высотой ИО 2 мм и $|S_{11}| < -20$ дБ, в диапазоне частот до 3 ГГц [10]. Таким образом, в настоящее время конструкция ПЛ широко используется для измерения уровня помехоэмиссии и помехоустойчивости ЭМП различных РЭС и кабельной продукции, а также ЭЭ материалов. Между тем отсутствуют ПЛ, обладающие высоким рабочим диапазоном частот, что делает совершенствование ПЛ актуальным.

Цель работы – разработка конструкции ПЛ для измерения устойчивости радиоэлектронных средств высотой до 20 мм, к узкополосному электромагнитному излучению в диапазоне частот до 3 ГГц.

Методика, предложенная в [11, 12] для оптимизации геометрических параметров устройств на основе линий передачи, по критерию минимизации максимального значения частотной зависимости $|S_{11}|$, включает использование аналитического подхода и численных методов и позволяет учесть неточности, возникающие при создании реальных конструкций из металла. Данная методика была структурирована и применена при разработке ПЛ (рис. 1).



Рис. 1. Методика синтеза параметров ПЛ

Аналитический расчет

Выполнен аналитический расчёт по нескольким методикам [13–16]. Согласно ГОСТ ИСО 11452-5:2007 [3], выражение (1) для расчёта ПЛ основывается на расчете волнового сопротивления несимметричной ПЛ с нулевой толщиной ($t = 0$) активного проводника [13, 14]. Волновое сопротивление ПЛ согласно [3] вычисляется в зависимости от нормированного ($w/h > 1$) геометрического параметра (рис. 2) как

$$Z_B = \frac{120\pi}{\frac{w}{h} + 2,42 - 0,44 \cdot \frac{h}{w} + \left(1 - \frac{h}{w}\right)^6}, \quad (1)$$

где w – ширина активного проводника (мм); h – высота активного проводника над опорным проводником (мм).

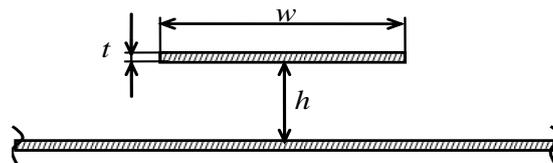


Рис. 2. Поперечное сечение несимметричной ПЛ

Также из [15] известны выражения (2)-(3), позволяющие вычислить волновое сопротивление с наименьшей погрешностью и учётом толщины t активного проводника. Выражения (2)-(3) получены путем введения нормированного отношения t/h в выражения с нулевой толщиной активного проводника [16]. Выражение (2) справедливо при $1 < w/h \leq 20$ и $t/h \leq 0,2$.

$$Z_B = \frac{120\pi}{\frac{w}{h} + \frac{We}{h} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{w}{h} + \frac{We}{h} + 1,444\right)}, \quad (2)$$

где We/h – эффективная ширина активного проводника, которая может быть найдена как

$$\frac{We}{h} = \frac{1,25}{\pi} \cdot \frac{t}{h} \cdot \left(1 + \ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right)\right), \quad (3)$$

где t – толщина активного проводника (мм).

На рис. 3 приведены зависимости волнового сопротивления Z_B от w/h согласно (1), (2) [3, 15], а также вычисленные по методике, представленной в [16]. Видно, что параметр w/h ПЛ находится в диапазоне от 4,875 до 4,95, при $Z_B = 50$ Ом. Вычисления выполнены при $h = 60$ мм и $t = 1$ мм для [15]. Значение h выбрано согласно [17] из условия $h \geq 3x$, где x – высота ИО.

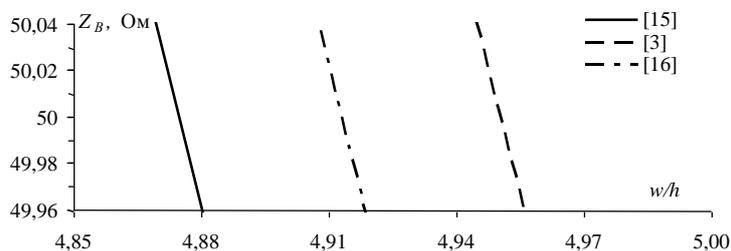


Рис. 3. Зависимости волнового сопротивления Z_B от w/h , полученные по формулам из [3, 15, 16]

Квазистатический анализ

Поскольку известно, что аналитический расчет Z_B является приближенным, выполнен квазистатический анализ ПЛ в программе TALGAT [18]. Исходными данными являлись аналитически полученные значения: $w/h = 4,95$ ($w = 297$ мм) по (1) и $w/h = 4,875$ ($w = 292,5$ мм) по (2). Получено $Z_B = 49,49$ Ом, т.е. $-1,03\%$ и $Z_B = 50,03$ Ом, т.е. $+0,05\%$ по отношению к 50 Ом, соответственно. Таким образом, Z_B ПЛ, вычисленное по (2) [15], имеет наименьшую погрешность ($0,05\%$) по отношению к значению ($1,03\%$) вычисленному по выражению (1) [3]. Возрастание погрешности может быть вызвано неучетом толщины ($t = 1$ мм) металла. Выполнена корректировка w в программе TALGAT под волновое сопротивление 50 Ом, которая дала $w = 292,72$ мм. Однако, параметры w/h получены при условии опорного проводника (в виде плоскости), что для реальной конструкции устройства ПЛ некорректно. Модель была изменена заменой плоскости опорным проводником с конечной шириной W (рис. 4). Получена зависимость ширины опорного проводника (W) от ширины активного проводника (w) (рис. 5) [19].

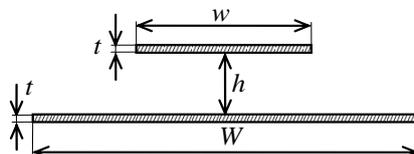


Рис. 4. Поперечное сечение несимметричной ПЛ с конечными размерами опорного проводника

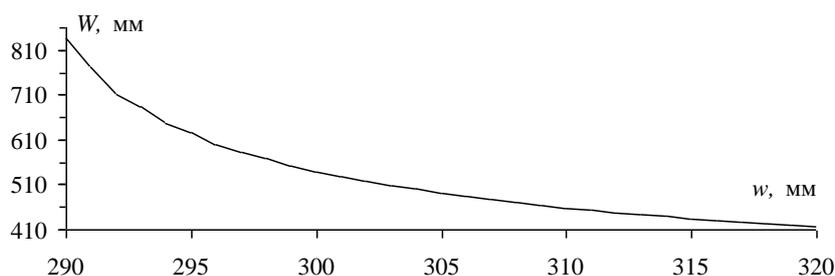


Рис. 5. Зависимость ширины опорного проводника (W) от ширины активного проводника (w), при $t = 1$ мм, $h = 60$ мм, $Z_B = 50$ Ом

Из рис. 5 видно, что при уменьшении w на 2 мм, до 290,72 мм, W возрастает до 770,72 мм, тогда как при увеличении w на 2 мм, до 294,72 мм, W уменьшается до 626,72 мм. Таким образом, при незначительном на 1,38% (4 мм) изменении w , значительно изменяется на 22,97% (144 мм) W .

Также вышеописанным образом был выполнен анализ геометрических параметров ПЛ из [3] для высоты ИО 50 мм. Получены погрешности для волновых сопротивлений: $+0,25\%$ по (1); $-0,55\%$ по (2); квазистатический анализ $-0,52\%$ для бесконечного и $+0,06\%$ для конечного размера опорного проводника. Сужение опорного проводника на 10 мм (до 1490 мм) приводит к снижению погрешности до $+0,001\%$.

Электродинамический анализ и оптимизация параметров

Согласно зависимости из рис. 5, для электродинамического анализа выбраны восемь вариантов геометрических параметров поперечного сечения ПЛ (табл. 1).

Таблица 1

Геометрические параметры поперечного сечения ПЛ, для $Z_B = 50$ Ом, при $h = 60$ мм, $t = 1$ мм

N	1	2	3	4	5	6	7	8
w_N , мм	288,72	289,72	290,72	292,72	294,72	302,72	312,72	322,8
W_N , мм	938,72	835,72	770,72	683,72	626,72	508,72	443,5	408,6

Сначала была построена модель СВЧ соединителя (в качестве диэлектрика полагался тефлон $\epsilon_r = 2,1$). Методом конечных элементов (МКЭ) выполнено вычисление максимального значения $|S_{11}|$ соединителя, которое не превышало минус 40 дБ, в диапазоне частот до 3 ГГц. Далее построены модели ПЛ (рис. 6) на основе значений геометрических параметров (длины регулярной части $l_r = 1500$ мм, длины нерегулярной части активного проводника $l_u = 290$ мм и длины опорного проводника $l_{gr} = 2500$ мм; соединительных участков ПЛ: ширины $w_c = 15$ мм; длины $l_c = 9$ мм; высоты $h_c = 4$ мм) и поперечных сечений ПЛ из табл. 1. В качестве материала выбран алюминий ($\sigma = 37 \times 10^6$ См/м, $\mu_r = 1,000022$).

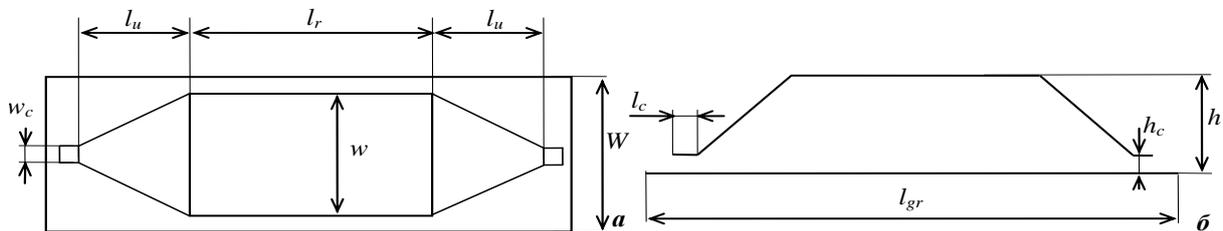


Рис. 6. Виды ПЛ сверху (а) и сбоку (б)

Окончательно конструкция ПЛ, состоящая из опорного 1 и активного 2 проводников, приняла вид, представленный на рис. 7. Активный проводник соединяется с центральным проводником СВЧ соединителя через сквозное отверстие в опорном проводнике ПЛ, тем самым, образуя коаксиально-полосковый переход (рис. 8).

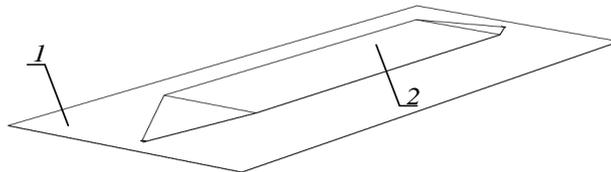


Рис. 7. Модель ПЛ для электродинамического анализа

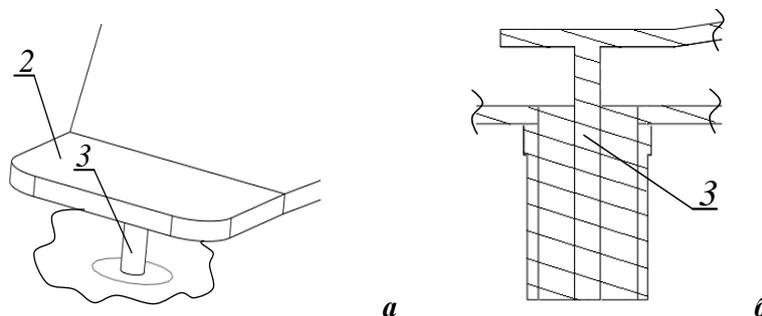


Рис. 8. Внешний вид (а) и продольное сечение (б) соединения активного проводника ПЛ с центральным проводником СВЧ соединителя

Вычислены частотные зависимости $|S_{11}|$ (рис. 9) и $|S_{21}|$ (рис. 10) для ПЛ с геометрическими параметрами из табл. 1, в диапазоне частот до 3 ГГц. При изменении ширины $w = 292,72$ мм активного проводника на ± 2 мм ($N = 3$, $N = 5$ из табл. 1), максимальное значение $|S_{11}|$ изменяется на ± 1 дБ. Наи-

большее отклонение максимального значения $|S_{11}|$ наблюдается для $N = 1$ и $N = 8$ из табл. 1, на частоте 25 МГц и составляет ± 3 дБ (рис. 9).

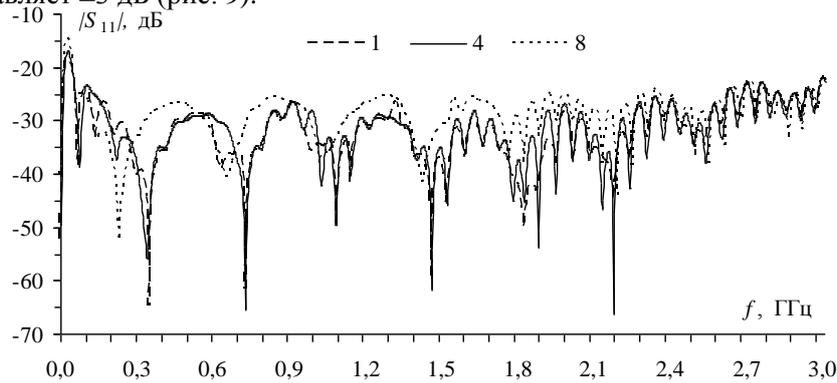


Рис. 9. Частотные зависимости $|S_{11}|$, для $N = 1, 4, 8$ из табл. 1

Также из рис. 9 видно, что для $N=1$ частотная зависимость $|S_{11}|$ не превышает минус 18 дБ, а для $N = 4$ – минус 17 дБ в диапазоне частот до 3 ГГц. При этом максимальное значение $|S_{11}|$ для $N = 8$ не превышает минус 14 дБ, в диапазоне частот до 3 ГГц.

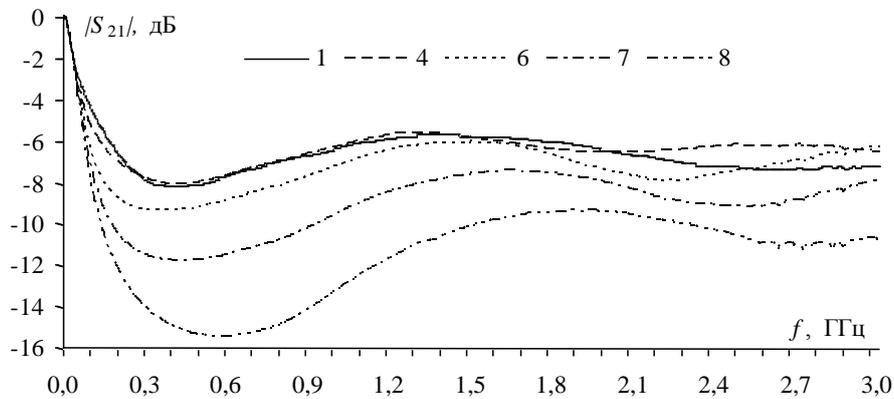


Рис. 10. Частотные зависимости $|S_{21}|$, при $N = 1, 4, 6, 7, 8$ из табл. 1

Из рис. 10 видно, что затухание ЭМП при $N=1, 4$ минимально и не превышает 8 дБ. Для $N=8$ затухание максимально и составляет 15,5 дБ.

Выполнена оптимизация геометрических параметров ПЛ по алгоритму, представленному на рис. 11, с использованием метода доверительных областей (Trust framework) (—) [20], широко используемого в задачах электродинамики [21] и генетического алгоритма (Genetic Algorithm) (GA) (---) [22] в программе CST MWS. Минимизировалось максимальное значение частотной зависимости $|S_{11}|$ для $N = 2$ из табл. 1, при $Z_B = 50$ Ом, в диапазоне частот до 3 ГГц.

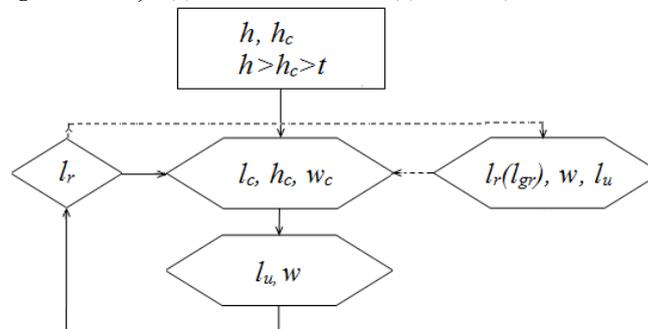


Рис. 11. Алгоритм оптимизации размеров ПЛ

Оптимизация выполнялась следующим образом: на основе геометрических параметров построена модель ПЛ в CST MWS, для этого задавались значения h и h_c при условии $h > h_c > t$. Далее

находилось оптимальное соотношение между параметрами l_c , h_c и w_c в начале и конце активного проводника. Далее находилось оптимальное соотношение между длиной расширения и шириной активного проводника (l_u и w_c), где длина расширения определяла угол между опорным проводником и сужением активного проводника. После этого находилось оптимальное значение длины активного проводника l_r . Таким образом, с помощью данного алгоритма получены оптимальные геометрические размеры и соотношения для ПЛ с волновым сопротивлением 50 Ом, в рабочей полосе частот до 3 ГГц, при высоте ИО 20 мм. Полученные размеры: $w = 258,1$ мм, $w_{gr} = 698,3$ мм, $w_c = 13,2$ мм, $l_r = 1665,1$ мм, $l_u = 362,9$ мм, $l_{gr} = 2580,1$ мм, $l_c = 9,1$ мм, $h = 61$ мм, $h_c = 3,2$ мм, $t = 1$ мм, $t_{gr} = 1$ мм. Из полученных размеров следует, что существенно (на 34,7 мм) снизилась ширина активного проводника (до 258,1 мм), тогда как ширина опорного проводника увеличилась незначительно (на 14,58 мм).

По полученным оптимальным размерам электродинамической модели построена твердотельная модель из листового материала в программе SolidWorks. В качестве материала в моделях выбран алюминий ($\rho = 2,7$ г/см³, $\sigma = 37 \times 10^6$ См/м). При построении твердотельной модели учитывались характеристики реальных слесарных инструментов и увеличение кромок металла в результате его сжатия или растяжения [12]. Выполнено электродинамическое моделирование твердотельной модели, используя метод конечных элементов (МКЭ). Получены частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ в диапазоне частот до 3 ГГц. Максимальное значение $|S_{11}|$, не превышает минус 20 дБ (рис. 13), а частотная зависимость $|S_{21}|$ с ростом частоты убывает от 0 дБ до -8,6 дБ. Выполнена резка, гибка и сборка ПЛ по чертежам, сделанным на основе твердотельной модели. Измерения S -параметров проводились в БЭК (рис. 12), при помощи измерителя модуля коэффициента передачи и отражения P2M-40, в диапазоне частот от 10 МГц до 3 ГГц (рис. 13, рис. 14).

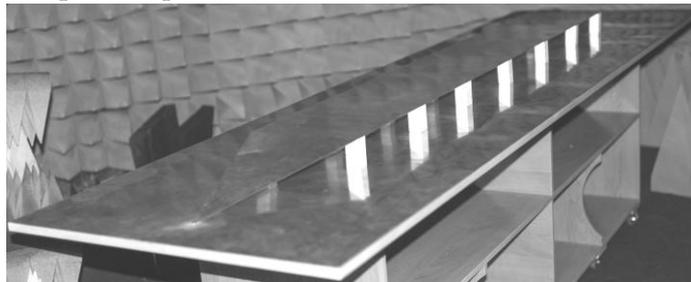


Рис. 12. Разработанная конструкция ПЛ

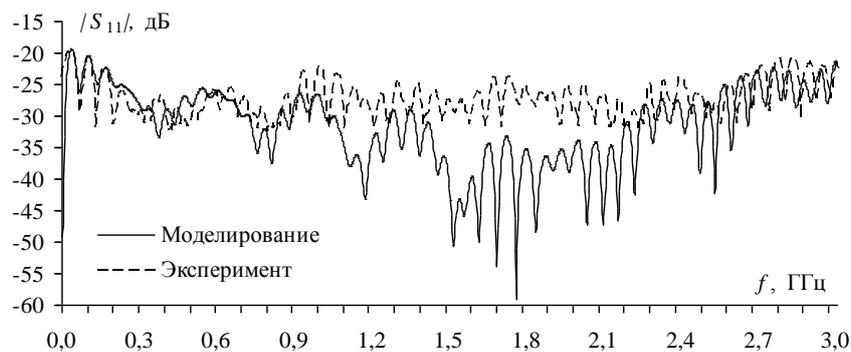


Рис. 13. Частотные зависимости $|S_{11}|$ полученные из электродинамического анализа и эксперимента

Из рис. 13 видно, что в диапазонах частот до 1 ГГц и от 2,2 ГГц до 3 ГГц результаты моделирования и эксперимента согласуются, отклонение не превышает ± 3 дБ. В диапазоне частот от 1 ГГц до 2,2 ГГц значения частотной зависимости $|S_{11}|$ для эксперимента практически не снижаются и остаются на прежнем уровне от -34 дБ до -22 дБ, тогда как при моделировании прослеживается волнообразный характер поведения частотной зависимости, при этом максимальное значение частотной зависимости $|S_{11}|$ не превышает -25 дБ.

Из результатов электродинамического анализа и эксперимента (рис 14) для разработанной конструкции ПЛ, видно, что в диапазоне частот до 3 ГГц $|S_{21}|$ не превышает минус 8,6 дБ. При этом результаты эксперимента имеют лучшие значения, по сравнению с результатами вычисления.

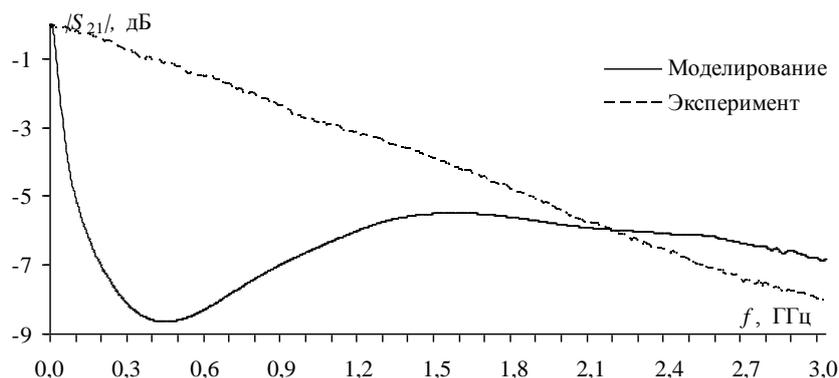


Рис. 14. Частотные зависимости $|S_{21}|$ полученные из электродинамического анализа и эксперимента

Заключение

Предложена методика оптимизации геометрических параметров ПЛ. Использование предложенной методики позволило вычислить и экспериментально подтвердить полученные оптимальные геометрические параметры ПЛ в диапазоне частот до 3 ГГц с максимальным значением $|S_{11}|$, не превышающим минус 20 дБ для ИО высотой 20 мм. Также показано, что первоначальный приближенный расчёт необходимо производить с учётом толщины активного проводника. Разработанная ПЛ может быть полезна для испытания РЭС на ЭМС, а также применима для исследования силовых шин электропитания космического аппарата.

Работа выполнена в рамках проекта 8.9562.2017/8.9 Минобрнауки России.

Список литературы

1. Roseberry В.Е. A parallel-strip line for testing RF susceptibility. / В.Е. Roseberry, R.B. Schulz // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 1965. – Vol. 7, Iss. 2. – P. 142–150.
2. ISO 11452-5:2002. Road vehicles – Component test methods for electrical disturbances from narrow-band radiated electromagnetic energy. Part 5: Stripline., 13 p.
3. ГОСТ ИСО 11452-5:2007. Методы испытаний компонентов на устойчивость к воздействию узкополосного излучения электромагнитной энергии – Часть 5: Полосковая линия передачи.
4. ГОСТ 32140-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Машины строительные с внутренними источниками электропитания. Требования и методы испытаний.
5. ГОСТ 32141-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Машины для сельского и лесного хозяйства. Методы испытаний и критерии приемки.
6. Valek M. Design of stripline for EMC testing / M. Valek, T. Korinek, T. Bostik // 14th Conf. on Microw. Tech. (COMITE 2008). – Apr. 23–24, 2008. – Prague, Czech Republic. – P. 1–4.
7. Catrysse J. A new stripline measuring setup for the characterization of conductive gaskets up to 18 GHz / J. Catrysse, V. Filip, D. Pissort, C. Brull // 2010 IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). – July 25–30, 2010. – Fort Lauderdale, Florida. – P. 165–170.
8. Murata Y. Susceptibility of Notebook computers to HPM, 2014 / T. Hoshina, Y. Hatori // 2014 IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). – Aug. 4–8, 2014. – Raleigh, USA. – P. 549–553.
9. ISO 61967-8:2011. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions – Part 8: Measurement of radiated emissions – IC stripline method.
10. Kim J., Park H.-H. A Novel IC-Stripline Design for Near-Field Shielding Measurement of On-Board Metallic Cans / J. Kim, H.-H. Park // 2017 IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). – Dec. 16, 2016. – P. 710–716.
11. Komnatnov M. Optimization of the TEM-cell for a new type of climatic chamber / M. Komnatnov, T. Gazizov, A. Melkozerov // Proc. of IEEE Int. Conf. on Numerical Electromagn. Modeling and Optimiz. for RF, Microw., and Terahertz Applic. – Aug. 11–14, 2015. – Ottawa, Canada. – P. 1–4.
12. Комнатнов М.Е. Оптимизация геометрических параметров TEM-камеры / М.Е. Комнатнов, Т.Т. Газизов. – Технологии ЭМС. – 2016. – № 4(59). – С. 7–16.

13. Wheeler A. Transmission-line properties of parallel wide strips by a conformal-mapping approximation / A. Wheeler // *IEEE Trans. on microwave theory and techniques*. – 1964. – Vol. 12, Iss. 3. – P. 280–289.
14. Wheeler A. Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet / A. Wheeler // *IEEE Trans. on microwave theory and techniques*. – 1965. – Vol. 13, Iss. 2. – P. 172–185.
15. Bahl I.J. Simple and accurate formulas for a microstrip with finite strip thickness / I.J. Bahl, R. Garg // *Proc. IEEE*. – 1977. – Vol. 65, Iss. 11. – P. 1611–1612.
16. Hammerstad E.O. Equations for microstrip circuit design / E.O. Hammerstad // in *Proc. European Microwave Conf.*, Sep. 1–4, 1975. – Hamburg, Germany. – P. 268–272.
17. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells // *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* – 1974. – Vol. 16, № 4. – P. 189–195.
18. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Га-зизов // *Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники*. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.
19. Тернов С.А. Исследование влияния ширины активного и опорного проводников на коэффициент передачи и отражения устройства полосковой линии для испытания на электромагнитную совместимость / С.А. Тернов, А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов // *Всероссийская научно-техническая конференция Современные проблемы радиоэлектроники. Россия, Красноярск 4–5 мая 2017 г.* С. 380–383.
20. Yuan Y.-X. A review of trust region algorithms for optimization / Y.-X. Yuan // *Proc. of the 4th Int. Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 99)*. – July 5–9, 1999. – Edinburgh, Scotland – P. 1–11.
21. Bakr M.H. A hybrid aggressive space-mapping algorithm for EM optimization / M.H. Bakr, J.W. Bandler, N. Georgieva, K. Madsen // *IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn.* – 1999. – Vol. 47, Iss. 12. – P. 2440–2449.
22. Guo P. The enhanced genetic algorithms for the optimization design / P. Guo // *Int. Conf. on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI)*. – Oct. 16–18, 2010. – Yantai, China – P. 2990–2994.

Статья получена 10.05.2017.

Авторы

Комнатнов Максим Евгеньевич, к.т.н., каф. ТУ, ТУСУР, с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС», тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: maxmek@mail.ru. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), проспект Ленина, 40, 634050, Томск, Российская Федерация

Тернов Станислав Анатольевич, магистрант каф. ТУ, ТУСУР, инженер НИЛ «БЭМС РЭС», тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: stanislav.1995@mail.ru. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), проспект Ленина, 40, 634050, Томск, Российская Федерация

Komnatnov M.E., Ternov S.A.

The Stripline for assessment of radioelectronic equipment immunity to electromagnetic radiation impact in the frequency range up to 3 GHz

Abstracts. The 50 Ohm stripline for EMC test of radioelectronic equipment in the frequency range up to 3 GHz is developed. Technique with optimization algorithm using the analytical and numerical (quasi-static and electromagnetic) methods for calculation of stripline geometry parameters is offered. The dependence of the width of the reference conductor on the width of the active conductor of the stripline is presented. As using the technique the maximum value of the frequency dependence of $|S_{11}|$ is minimized done to –20 dB in the frequency range up to 3 GHz with the height of the object under test up to 20 mm. Measurement results of stripline frequency dependence of $|S_{11}|$ and $|S_{21}|$ are presented. The results consistent with calculation results in the frequency range up to 3 GHz.

Key words: electromagnetic compatibility, stripline, simulation, optimization.

References

1. Roseberry B.E., Schulz R.B. A parallel-strip line for testing RF susceptibility. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* – 1965. – vol. 7, iss. 2. – pp. 142–150. doi: 10.1109/TEMC.1965.4307395.

2. ISO 11452-5:2002, Road vehicles – Component test methods for electrical disturbances from narrow-band radiated electromagnetic energy. Part 5: Stripline. 13 p.
3. State Standard 11452-5:2007. Methods of testing components for resistance to narrow-band electromagnetic radiation – Part 5: Stripline 20 p. (In Russian).
4. State Standard 32140-2013, Electromagnetic compatibility of technical equipment. Construction machines with internal electrical power supply. Requirements and test methods. 40 p. (In Russian).
5. State Standard 32141-2013, Electromagnetic compatibility of technical equipment. Agricultural and forestry machinery. Test methods and acceptance criteria. 40 p. (in Russian).
6. Valek M., Korinek T., Bostik T. Design of stripline for EMC testing. *14th Conf. on Microw. Tech. (COMITE 2008)*. – Apr. 23–24, 2008. – Prague, Czech Republic. – pp. 1–4. doi: 10.1109/COMITE.2008.4569925.
7. Catrysse J., Filip V., Pissort D., Brull C. A new stripline measuring setup for the characterization of conductive gaskets up to 18 GHz. *2010 IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC)*. – July 25–30, 2010. – Fort Lauderdale, Florida. – pp. 165–170. doi: 10.1109/IEMC.2010.5711265.
8. Murata Y., Hoshina T., Hatori Y. Susceptibility of Notebook computers to HPM. *2014 IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC)*. – Aug. 4–8, 2014. – Raleigh, USA. – pp. 549–553. doi: 10.1109/IEMC.2014.6899032.
9. ISO 61967-8:2011, Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions – Part 8: Measurement of radiated emissions – IC stripline method. 34 p.
10. Kim J., Park H.-H. A Novel IC-Stripline Design for Near-Field Shielding Measurement of On-Board Metallic Cans. *2017 IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC)*. – Dec. 16, 2016. – pp. 710–716. doi: 10.1109/TEM.2016.2633965.
11. Komnatnov M. Gazizov T., Melkozerov A. Optimization of the TEM-cell for a new type of climatic chamber. *Proc. of IEEE Int. Conf. on Numerical Electromagn. Modeling and Optimiz. for RF, Microw., and Terahertz Applic.* – Aug. 11–14, 2015. – Ottawa, Canada. – pp. 1–4.
12. Komnatnov M.E., Gazizov T.T. Optimizatsiia geometricheskikh parametrov TEM-kamery [Optimization of geometrical parameters of TEM cell]. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovместimosti [Technologies of electromagnetic compatibility]*. –2016. – №4 (59). – pp. 7–16. (In Russian).
13. Wheeler A. Transmission-line properties of parallel wide strips by a conformal-mapping approximation. *IEEE Trans. on microwave theory and techniques*. – 1964. – Vol. 12, Iss. 3. – pp. 280–289. doi: 10.1109/TMTT.1964.1125810.
14. Wheeler A. Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet. *IEEE Trans. on microwave theory and techniques*. – 1965. – Vol. 13, Iss. 2. – pp. 172–185. doi: 10.1109/TMTT.1965.1125962.
15. Bahl I.J., Garg R. Simple and accurate formulas for a microstrip with finite strip thickness. *Proc. IEEE*. – 1977. – Vol. 65, Iss. 11. – pp. 1611–1612. doi: 10.1109/PROC.1977.10783.
16. Hammerstad E.O. Equations for microstrip circuit design. *Proc. European Microwave Conf., Sep. 1–4, 1975*. – Hamburg, Germany. –pp. 268–272. doi: 10.1109/EUMA.1975.332206.
17. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* – 1974. – Vol. 16, №4. – pp. 189–195. doi: 10.1109/TEM.1974.303364.
18. Kuksenko S.P., Zobolotskiy A.M., Melkozerov A.O., Gazizov T.R. Novie vozmozhnosti sistemi modelirovaniia elektromagnitnoy sovместimosti TALGAT [New capabilities of the EMC TALGAT system] *Doklady TUSUR [Reports of TUSUR]*. – 2015. – № 2(36). – pp. 45–50. (In Russian).
19. Ternov S.A., Demakov A.V., Komnatnov M.E. Issledovaniye vliyaniya shiriny aktivnogo i opornogo provodnikov na koeffitsiyent peredachi i otrazheniya ustroystva poloskovoy linii dlya ispytaniya na elektromagnitnyuyu sovместimost' [Investigation of the influence of the width of the active and supporting conductors on the transmission and reflection coefficient of the stripline device for the electromagnetic compatibility test]. *Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya Sovremennyye problemy radioelektroniki. [All-Russian Scientific and Technical Conference Modern Problems of Radio Electronics] Russia, Krasnoyarsk 4–5, May 2017*. pp. 380–383. (In Russian).
20. Yuan Y.-X. A review of trust region algorithms for optimization. *Proc. of the 4th Int. Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 99)*. – July 5–9, 1999. – Edinburgh, Scotland – pp. 1–11. doi:10.1.1.45.9964.

21. Bakr M.H., Bandler J.W., Georgieva N., Madsen K. A hybrid aggressive space-mapping algorithm for EM optimization. *IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn.* – 1999. – Vol. 47, Iss. 12. – pp. 2440–2449. doi: 10.1109/22.808991.
22. Guo P. The enhanced genetic algorithms for the optimization design. *Int. Conf. on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI)*. – Oct. 16–18, 2010. – Yantai, China – pp. 2990–2994. doi:10.1109/BMEI.2010.5639829.

Authors

Komnatnov Maxim Evgen'evich, PhD, assistant professor of television and control (TU) chair, senior scientist researcher of scientific research laboratory «Security and electromagnetic compatibility of radioelectronic equipment» (SRL «SEMC REE») TUSUR, tel: (3822) 41-34-39, e-mail: maxmek@mail.ru. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Prospect Lenina, 40, 634050 Tomsk, Russian Federation

Ternov Stanislav Anatol'evich, candidate for a master's degree of TU chair, engineer of SRL «SEMC REE», TUSUR, tel: (3822) 41-34-39, e-mail: stanislav.1995@mail.ru. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Prospect Lenina, 40, 634050 Tomsk, Russian Federation