

УДК 621.316.9

## КОМПОНОВКА И ТРАССИРОВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ: ОБЗОР

*Орлов П. Е., Медведев А. В., Шарафутдинов В. Р.*

*Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники;*

*Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полюс»,  
г. Томск*

При создании необслуживаемых радиоэлектронных систем большое внимание уделяется их надежности и электромагнитной совместимости (ЭМС). К сожалению, классические технические методы (экранирование, фильтрация, заземление) в нужной мере не обеспечивают ЭМС систем, ухудшая при этом их массогабаритные характеристики. Для решения данной проблемы необходима разработка нетрадиционных методов, основанных на системных эффектах и не приводящих к внесению новых элементов в конструкцию. Скрытым ресурсом здесь являются различные аспекты компоновки межсоединений.

Последнее время наблюдается тенденция отказа от межсоединений и перехода к расположению системы из активных и пассивных компонентов либо на одном кристалле (SoC), либо на отдельных кристаллах, но в одном корпусе (SiP). Эксперимент с системой, конструкция которой реализована как на печатной плате (активные и пассивные компоненты размещаются на отдельных кристаллах), так и в одном корпусе [1], показывает, что по сравнению с дизайном системы на плате площадь конструкции SiP за счет сокращения межсоединений уменьшена на 80 %, а количество слоев печатной платы – с шести до четырех. Отмечено и уменьшение электромагнитного излучения от изделия на 20 дБ/мкВ. Но SoC, как и SiP, имеют ограничения по количеству размещаемых активных и пассивных компонентов, поэтому необходимо искать пути рациональной компоновки и трассировки межсоединений.

Влияние нежелательной асимметрии и нерегулярности на цепях дифференциальной линии моделируется как отклонение от номинальных геометрических характеристик идеально симметричной и однородной дифференциальной линии, работа которой принята в качестве эталона [2]. С целью доказательства влияния вышеупомянутых геометрических нерегулярностей на ухудшение сигнала дифференциальной моды, распространяющегося вдоль дифференциальной линии, а также на формирование нежелательных синфазных токов и напряжений рассмотрены три структуры дифференциальных линий, проведен их анализ. В результате предложена схема интерпретации участвующих явлений и определены соответствующие геометрические параметры.

При рассмотрении влияния пространственного разнесения печатных проводников на помехозащищенность резервированных систем [3, 4] сравнивались различные геометрии печатных плат: система без резервирования, содержащая одну трассу на печатной плате; и три резервных системы, одна из которых состоит из трех параллельных трасс на одной печатной плате, вторая содержит три непараллельных трассы на одной плате, а третья – с тремя различно ориентированными печатными платами. Все резервированные платы имеют мажоритарное резервирование по принципу «2 из 3». Анализ влияния напряженности поля падающей плоской волны на вероятность битовой ошибки показал, что только при использовании трех различно ориентированных печатных плат достигается значительное уменьшение такой вероятности.

Исходя из вышесказанного, предложено модальное резервирование электрических соединений [5], отличающееся учетом электромагнитных связей между резервируемым (активным) и резервным (пассивным) проводниками резервируемой и резервной цепей. В результате уменьшены восприимчивость резервируемой цепи к внешней кондуктивной эмиссии и уровень кондуктивной эмиссии от резервируемой цепи. В случае выхода резервируемой цепи из строя в резервной цепи будет достигаться аналогичный результат.

Таким образом, приведенный краткий обзор показывает актуальность компоновки электрических соединений в обеспечении ЭМС. Стоит отметить, что лишь небольшое число научных исследований в этом направлении затрагивает данную тематику.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.*

### Литература

1. *International Technology Roadmap for Semiconductors, Assembly and Packaging*, 2011.
2. *Effects of Undesired Asymmetries and Nonuniformities in Differential Lines* / F. Grassi [et al.] // *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*. 2017. Vol. 59, No. 5. P. 1613 – 1624.

3. Degraeve A., Pissoort D. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under plane-wave illumination // Asia-Pacific Inter. Symp. on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Shenzhen, 2016. P. 211 – 213.

4. Degraeve A., Pissoort D. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under reverberation room conditions // IEEE Inter. Symp. on Electromagnetic Compatibility (EMC). Ottawa, 2016. P. 374 – 378.

5. New concept of critical infrastructure strengthening / T. R. Gazizov [et al.] // Proc. of the 13th Inter. Conf. of Numerical Analysis and Applied Mathematics. Rhodes, Greece, 2015. P. 1 – 3.

УДК 621.3.087.21

## АНАЛИЗАТОР ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОРПУСОМ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ S-ПАРАМЕТРОВ

Комнатнов М. Е.

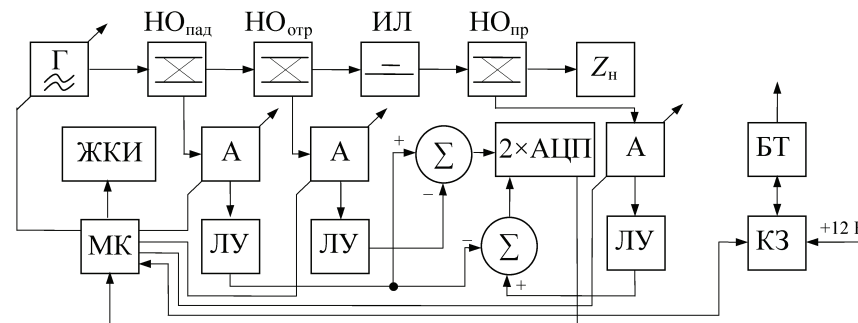
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Одним из конструкторских средств обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры при проектировании является экранирование пластиной [1] или корпусом [2]. Измерение эффективности экранирования (ЭЭ) проводят на основе различных нормативных документов при помощи комплекса измерительных средств, который содержит ряд специализированных приборов и устройств, включая приемную (датчик электромагнитных помех) и передающую антенны, генератор, усилитель мощности, измерительный приемник, беззховую камеру и т. д. Подобный комплекс достаточно дорог, требует немало времени подготовительного процесса с привлечением специалистов в области электромагнитной совместимости. К тому же его применение невозможно на рабочем месте инженера или в учебных лабораториях. Таким образом, дешевое автономное устройство, не требующее дополнительных измерительных средств, позволяющее выполнить предварительное измерение ЭЭ, может быть весьма полезно.

С этой целью разработан автономный анализатор эффективности экранирования корпусом на основе измеренных S-параметров.

Методика определения ЭЭ при помощи S-параметров для корпуса размером 300×300×120 мм [3] основана на преобразовании параметров матрицы S в матрицу Z, в соответствии с которой вычисляется эквивалентное сопротивление корпуса. Вычисление ЭЭ проводится по известным аналитическим формулам [4]. Программная реализация описанных выражений [3, 4] достаточно проста и может быть выполнена аппаратными средствами микроконтроллера.

В технической документации [5] на интегральную схему AD8302 описано простое устройство для измерения модуля и фазы коэффициентов передачи и отражения в диапазоне частот до 2,7 ГГц. Схема содержит в одном корпусе два логарифмических усилителя (ЛУ), сумматор и фазовый детектор, что является ее преимуществом. Недостатки же – относительно небольшие верхняя частота (2,7 ГГц) и динамический диапазон (не более 60 дБ). На основе данной схемы и предложенной методики разработано устройство (рисунок) для измерения ЭЭ.



Устройство портативного анализатора ЭЭ

Основой портативного анализатора ЭЭ является измерительная линия (ИЛ) с волновым сопротивлением 50 Ом, которая возбуждает корпус сигналом от генератора в диапазоне частот от 100 МГц до 8 ГГц. В качестве генератора (Г) выбран широкополосный синтезатор СВЧ-диапазона, выполненный на интегральной схеме ADF 5355. Ослабление амплитуды падающих, отраженных и проходящих волн от направленных ответвителей (НО) регулируется в диапазоне от 0 до 32 дБ при помощи регулируемого аттенуатора (А) НМС346MS8G аналоговым напряжением от цифро-аналогового преобразователя микроконтроллера (МК). Перестройка частоты генератора, регулировка ослабления аттенуаторами, вычисление значений ЭЭ на основе S-параметров, вывод частотной зависимости ЭЭ и отображение информации о текущем состоянии батареи (БТ) от контроллера заряда (КЗ) на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ) осуществляет МК ATmega 2560, который при желании может быть заменен на более производительный. Значения S-параметров вычисляются двумя сумматорами (Σ) на основе малошумящего операционного усилителя. Сигнал на сумматоры приходит от логарифмических усилителей AD8318 и оцифровывается двумя аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) AD7887.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.