

мощи которых рассчитывались паразитные взаимовлияния, как отдельных компонентов, так и взаимовлияния между ними [3].

По проведенному обзору выявлены причины возникновения паразитных взаимовлияний в С–L–С ЕМI-фильтрах, а также приведены методы снижения данных взаимовлияний. Предложенные методы, позволяют снизить паразитные взаимовлияния в фильтре, не внося дополнительных финансовых затрат и увеличения габаритов фильтра, и хорошо применимы тогда, когда допустимы лишь минимальные структурные изменения ТС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417 X0172.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Murata Y., Takahashi K., Kanamoto T., Kubota M. Analysis of parasitic couplings in EMI filters and coupling reduction methods// IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – December 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 1880–1886.

2. Weber S.P. Predicting parasitics and inductive coupling in EMI-filters / S.P. Weber, E. Hoene, S. Guttowski, W. John, H. Reichl // in Proc. IEEE 21st Annu. Appl. Power Electron. Conf. Expo. – Mar. 2006. – Vol. 1. – P. 1157–1160.

3. Masuzawa T. Modeling method of stray magnetic couplings in an EMC filter for a SiC solar inverter / T. Masuzawa, E. Hoene, K. Lang // in Proc. 2014 Int. Power Electron. Conf. – 2014. – P. 2366–2371.

### ОБЗОР МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ПОТЕРЬ НА ИЗЛУЧЕНИЕ В ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ

*С.Х. Карри, студент каф. ТУ;*

*Р.С. Суровцев, доцент каф. ТУ, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР salim96@list.ru*

На сегодняшний день неотъемлемым этапом проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является обеспечение ее электромагнитной совместимости (ЭМС). Неучет требований ЭМС может привести к нарушению или даже выходу РЭА из строя. Поэтому на раннем этапе проектирования необходимо проводить тщательное компьютерное моделирование РЭА. Одной из важных задач ЭМС является защита РЭА от электромагнитных воздействий, в частности от сверхкоротких импульсов (СКИ) наносекундного диапазона, поскольку такие импульсы способны проникать внутрь РЭА минуя электромагнитные экраны и другие средства защиты. Недостатки традиционных устройств защиты не позволяют обеспечить должной защиты РЭА от СКИ. На практике требуется простота таких устройств, поэтому

предложен простой способ защиты РЭА от СКИ, основанный на использовании модальных искажений сигнала в меандровых линиях задержки на печатной плате [1]. Представленные результаты получены на основе метода моментов в рамках квазистатического подхода [2].

Для реальных межсоединений печатных плат свойственны потери и дисперсия. Основными являются потери в проводниках (могут быть вычислены на основе моделей из [3]), и диэлектрике (например, по модели А. Джорджевича [4]). Существует еще один вид потерь – потери на излучение, учет которых необходим при моделировании. Однако на данный момент нет однозначных подходов к оценке таких потерь. Между тем, учет таких потерь важен для более детального понимания искажения сигнала в меандровой линии. Поскольку виток меандровой линии представляет собой пару связанных линий, соединенных на одном конце, то к ним могут быть применены подходы, разработанные для микрополосковых линий на печатной плате. Несмотря на актуальность данных исследований систематизированного описания подходов к вычислению потерь авторам не известно. Поэтому цель данной работы – выполнить обзор методов и подходов к оценке потерь на излучения в полосковых линиях.

Наиболее близкой структурой к меандру является связанная микрополосковая линия, закороченная на одном конце. Так как излучение в таких линиях, в основном, вызвано неоднородностями, то известно описание метода вычисления потерь на излучение от неоднородностей микрополосковой структуры с использованием подхода на основе модели многополюсника [5]. В работе выполнено моделирование микрополосковой линии, при котором вычисляются токи в её отдельных участках, добавлением  $n$  портов. После вычисления результирующего магнитного поля вычисляются общие потери на излучение интегрированием вектора Пойнтинга каждого отдельного участка. В результате показано, что нельзя пренебрегать потерями на излучение на частотах в диапазоне 10–40 ГГц даже в хорошо согласованных линиях.

Метод линий передачи во временной области позволяет вычислять потери в проводниках и диэлектрике, но для учёта потерь на излучение во временной области её нужно дополнить с помощью метода интегральных уравнений из теории рассеяния [6]. Если рассматривать линию в качестве излучателя, то становится очевидно, что создаваемое электрическое поле связано с источником сигнала. Тогда используя напряжение падающей волны, найденное из теории линий передачи, можно получить выражение для расчёта потерь на излучение:

$$loss = \frac{u(t)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right)} \sqrt{a} \frac{e^{-at}}{\sqrt{t}}. \quad (1)$$

Для нахождения потерь на излучение в линиях передачи с изгибом, каждая из линий разделяется на  $n$  отрезков (рис. 4) длиной  $\Delta$  (при этом должно выполняться условие  $\Delta/a \geq 8$ , где  $a$  – угол изгиба), после чего, используя метод моментов, находится решение интегро-дифференциальных уравнений, полученных из уравнений Максвелла с учетом граничных условий [7].

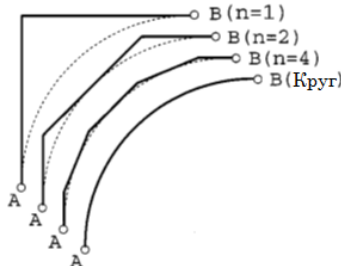


Рис. 4. Модели линий передачи с изгибом

Предполагается, что линия передачи является идеальным проводником. Это позволяет не учитывать потери на нагрев, которыми можно пренебречь. При этом потери на излучение, которые определяются, как отношение мощности потерь на излучение к мощности падающей волны находятся как:

$$\frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{(1-|\Gamma|^2)P_{rad}}{(P_{rad} + P_{in})}, \quad (2)$$

где  $\Gamma$  – коэффициент отражения,  $P_{rad}$  – мощность потерь на излучение,  $P_{in}$  – мощность падающей волны. Данный подход накладывает ряд ограничений и не учитывает некоторые характеристики линии, такие как характеристическое сопротивление, вклад её отдельных участков и т.д. Поэтому метод был дополнен с использованием диполя Герца и метода бегущей волны [8], после чего выражение (2) может быть преобразовано к виду:

$$loss_i = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2,$$

где  $loss_i$  – потери на излучение  $i$ -го участка линии,  $S_{11}$  и  $S_{21}$  –  $S$ -параметры линии.

В результате преобразования формулы потери на излучение всей линии можно вычислить интегрированием потерь от её отдельных

участков, что позволяет получить более точные результаты, по сравнению с выражением (2).

Таким образом, в работе представлено краткое описание основных особенностей ряда методов и подходов к оценке потерь на излучение в различных полосковых структурах. Следующим шагом является использование одного из подходов для оценки потерь в меандре и их влияния на разложение СКИ в нем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417 X0172.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Surovtsev R.S. Possibility of Protection Against UWB Pulses Based on a Turn of a Meander Microstrip Line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2017. – Vol. 59, No. 6, P. 1864–1871.
2. New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments / S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky et al. // *Advances in Intelligent Systems Research. Proc. of the 2015 Int. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2015)*. – Phuket, Thailand, August 23–24, 2015. – P. 293–301.
3. Мусабаев Р.Р. Алгоритм вычисления матрицы погонных сопротивлений многопроводной линии передачи // Матер. всерос. науч.-техн. конф. с международным участием студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2017». – Томск, 10–12 мая, 2017. – С. 68–71.
4. Djordjevich A.R. Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality / A.R. Djordjevich, R.M. Biljic, V.D. Likar-Smiljanic, T.K. Sarkar // *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*. – Nov. 2001. – Vol. 43, No. 4. – P. 662–666.
5. Sabban A. Characterization of radiation loss from microstrip discontinuities using a multiport network modeling approach / A. Sabban, C.G. Gupta // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* – 1991. – Vol. 39, No. 4. – P. 705–712.
6. Reineix A. Introduction of radiating losses in the time-domain transmission-line method / A. Reineix, B. Jecko // *Microwave and optical technology letters*. – 1994. – Vol. 7, No. 10. – P. 457–460.
7. Lee S. A study on the radiation loss from a bent transmission line / S. Lee, M. Hayakawa // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2001. – Vol. 43, No. 4. – P. 618–621.
8. Liu X. Prediction of radiation losses and emission from a bent wire by a network model / X. Liu, C. Christopoulos, D.W.P. Thomas // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2006. – Vol. 48, No. 3. – P. 476–484.