

5. Пат. US9537306 США, МПК H02H9/04. ESD protection system utilizing gate-floating scheme and control circuit thereof / J. Tseng (TW), C. Huang (TW) №14/620382; заявл. 12.02.2015; выдан 03.01.2017.

6. Пат. US9537306 США, МПК H02H9/04. ESD protection system utilizing gate-floating scheme and control circuit thereof / J. Tseng (TW), C. Huang (TW) №14/620382; заявл. 12.02.2015; выдан 03.01.2017.

7. Пат. US9613952 США, МПК H01L27/02. Semiconductor ESD protection device / H. Chen (TW), W. Chan (TW), S. Wu (TW) №14/341925; заявл. 25.07.2014; выдан 04.04.2017.

8. Пат. US 9734382 США, МПК G06K9/00. Fingerprint sensor having ESD protection / C. Wang (TW), T. Chiang (TW), C. Yang (TW) № 14/935137; заявл. 06.11.2015; выдан 15.08.2017.

УДК 621.3

ОБЗОР АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВРЕМЕННОГО ОТКЛИКА В ПОЛОСКОВЫХ УСТРОЙСТВАХ ЗАЩИТЫ

З.М. Кенжегулова, аспирант каф. ТУ

Научный руководитель Р.С. Суворцев, доцент каф. ТУ

г. Томск, ТУСУР, zarina.kenzhegulova@mail.ru

Выполнен обзор аналитических моделей для вычисления временно-го отклика в связанных линиях. Показаны актуальность применения аналитических моделей и их разнообразие.

Ключевые слова: сверхкороткий импульс, связанная линия, перекрестная наводка.

В настоящее время в области проектирования вычислительной и микропроцессорной техники наблюдается неуклонный рост частот используемых сигналов и уменьшение их рабочих напряжений. Это ведет к росту восприимчивости радиоэлектронных средств (РЭС) к электромагнитным воздействиям (ЭМВ) разной природы. Их влияние может привести к ухудшению или полному отказу работы устройства. Одними из наиболее опасных воздействий являются сверхкороткие импульсы (СКИ) [1]. Их высокая энергия также опасна тем, что может влиять и на аппаратную часть устройств, вплоть до физического разрушения [2]. Одним из подходов для защиты от СКИ является применение полосковых устройств на основе технологии модального разложения: модальные фильтры и меандровые линии [3, 4].

С точки зрения защиты РЭС от СКИ важно умение анализировать временной отклик на концах устройства [5]. Как правило, вычисление отклика выполняется численными методами, однако затраты на это могут оказаться высоки даже для простых конфигураций [6]. Между

тем для предварительных оценок в ряде частных случаев применимы простые аналитические модели, поскольку полосковые устройства могут быть представлены набором пар связанной линии. Разнообразие известных аналитических моделей для вычисления отклика в связанных линиях предоставляет возможность выбора простых, понятных и наиболее эффективных моделей. Между тем автору неизвестны работы с результатами систематизированного обзора таких моделей. Поэтому цель данной работы – выполнить такой обзор.

Сначала необходимо отметить фундаментальные работы в области анализа перекрестных помех в связанных линиях, послужившие основой для дальнейших исследований в этой области. Например, в не теряющей актуальности работе [7] представлены результаты анализа временного отклика многопроводной линии передачи (МПЛП) без учета потерь, причем не ограничиваясь допущением лишь слабой связи между проводниками, а также введены такие понятия, как схема согласованного окончания и эквивалентная схема МПЛП. В не менее важной работе [8] детально освещены аспекты анализа перекрестных помех в связанных линиях, а также представлен и разобран ряд методов расчета отклика линии на основе известных теоретико-схемотехнических параметров. Работа [9] уникальна тем, что в ней описывается и сравнивается несколько методов вычисления отклика линий, основанных на использовании известных параметров теории цепей.

Особого внимания заслуживают работы исследователей в области новых и эффективных аналитических моделей для МПЛП. В работе [10] рассмотрено аналитическое вычисление формы и амплитуды перекрестных наводок в МПЛП без потерь, для чего применяется метод модального анализа связанных линий во временной области. Метод основан на векторном анализе и заключается в том, что напряжения и токи на концах проводника записываются как сумма напряжений каждой моды, выраженных через коэффициенты матрицы отражения мод и компоненты воздействия, с учетом коэффициентов матрицы преобразования мод. В работе [11] представлены модели для вычисления временного отклика частного случая: двух параллельных связанных линий. Телеграфные уравнения применены для записи уравнения для параллельных линий, их решение получено в частотной области на основе метода преобразования мод, а затем выполнен переход во временную область с помощью преобразования Лапласа. А в работе [12] получены простые выражения для аналитического определения формы и амплитуды перекрестных наводок в паре связанных линий без потерь. Простота данных выражений определяется тем, что

они не требуют трудоемкого вычисления матриц L , C , R , G параметров связанных линий.

В интересной работе [13] представлен аналитический метод для расчета временного отклика при возбуждении связанной линии плоской волной. Аналитическое решение представляется в виде бесконечного геометрического ряда во временной области, который вычислен с помощью частотного ВЛТ-уравнения при дискретном изменении времени. Наконец, примечателен нестандартный подход к вычислению перекрестных наводок на пассивных проводниках: записывается система линейных дифференциальных уравнений, а затем вычисляются собственные значения и собственные векторы этой системы [14, 15]. В первой работе выполнен анализ простой связанной линии, а во второй – МПЛП, покрытой тонким слоем диэлектрика.

Как видно из результатов обзора, разработке моделей, методов и подходов для анализа связанных линий, в том числе МПЛП, посвящено довольно много работ, основное внимание в которых уделяется искажениям сигналов из-за перекрестных наводок. Приведенный краткий обзор показывает актуальность применения аналитических моделей для вычисления отклика, в особенности для частных случаев. Данный обзор позволит оценить возможность применения уже существующих и разработки новых аналитических моделей для вычисления временного отклика в защитных полосковых устройствах.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурина Л.А. Электромагнитные помехи и методы защиты от них: учеб. пособие. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2006. – С. 3.
2. Хоанг Л.Ч. Аналитический обзор по исследованиям влияния преднамеренного электромагнитного воздействия на беспроводные сети // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Т. 5, № 1. – С. 114–125.
3. Заболоцкий, А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – № 3. – С. 79–83.
4. 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. Zablotzky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 1864–1871.
5. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2013. – 150 с.
6. Куксенко С.П. 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.

7. Amemiya H. Time-domain analysis of multiple parallel transmission lines // RCA Review. – 1967. – P. 241–276.
8. Djordjevic A.R. Time-domain response of multiconductor transmission lines / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar, R.F. Harrington // IEEE Proceedings. – 1987. – Vol. 75, No. 6. – P. 743–764.
9. Paul C.R. Literal solutions for time-domain crosstalk on lossless transmission lines // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1992. – Vol. 34, Iss. 4. – P. 433–444.
10. Park S.W. Analytical approach for crosstalk characterization of multiconductor transmission lines using mode decomposition technique in the time domain / S.W. Park, F. Xiao, Y. Kami // IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility. – 2010. – Vol. 52. – P. 436–446.
11. Xiao F. Analytical solution for two parallel traces on PCB in the time domain with application to hairpin delay lines / F. Xiao, K. Murano, Y. Kami // IEICE Transactions on Communications. – Jun. 2009. – P. 1953–1959.
12. Chai, C. Simple time-domain expressions for prediction of crosstalk on coupled microstrip lines / C. C. Chai, B. K. Chung, H. T. Chuah // Progress in Electromagnetics Research. – 2003. – Vol. 39. – P. 147–175.
13. Gu-Yan N. Time-domain analytic solutions of two-wire transmission line excited by a plane-wave field / N. Gu-Yan, Y. Li, Y. Nai-Chang // Chin. Phys. Soc. and IOP Publishing Ltd. – 2008. – Vol. 7. – P. 3629–3634.
14. Soleimani N. Crosstalk analysis at near-end and far-end of the coupled transmission lines based on eigenvector decomposition / Mohammad G.H. Aljani, Mohammad H. Neshati // International Journal of Electronics and Communications. – 2012. – Vol. 12. – P. 1–8.
15. Soleimani N. Analysis and Calculation of Crosstalk in Multi Conductor Transmission Lines (MTL) Coated by a Thin Dielectric Insulator [MSc thesis]. Ferdowsi University of Mashhad; September 2016.

УДК 519.612

НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д.В. Клюкин, магистрант каф. ТУ

Научный руководитель С.П. Куксенко, доцент каф. ТУ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, yuhoo11@mail.ru

Представлены результаты реализации новых функциональных возможностей программного модуля электростатического анализа методом конечных элементов. Выполнено тестирование нового функционала.

Ключевые слова: электростатический анализ, метод конечных элементов, напряженность электрического поля, распределение потенциала.