

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.