РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА



ШКОЛА
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

ТЕЗИСЫ
трудов конференции

Школа молодых ученых

Федеральная территория «Сириус»
Университет «Сириус»
21–29 сентября 2026 г.

УДК 621.372.22

Математическое моделирование межсоединений интегральных схем посредством аналитических моделей

Черникова Е. Б.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40
chiernikova96@mail.ru

Разработаны аналитические математические модели в замкнутой форме, позволяющие выполнять анализ целостности сигналов и уровней перекрестных наводок в межсоединениях высокоскоростных интегральных схем с уменьшенными вычислительными затратами.
Ключевые слова: интегральные схемы; аналитические модели; перекрестные помехи; линии передачи.

Mathematical modeling of interconnections of integrated circuits using analytical models

Chernikova E. B.
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia
chiernikova96@mail.ru

Analytical mathematical models in closed form have been developed, enabling the analysis of signal integrity and crosstalk levels in interconnects of high-speed integrated circuits with reduced computational costs.
Keywords: integrated circuits; analytical models; crosstalk; transmission lines.

Рост быстродействия и плотности интеграции современных ИС делает межсоединения критическим фактором, влияющим на производительность системы и электромагнитную совместимость [1]. Так, перекрестные помехи вызывают искажения сигналов, задержки и снижение надежности устройств, что делает актуальной разработку аналитических моделей для моделирования межсоединений, позволяющих сократить временные затраты на ранних этапах проектирования.

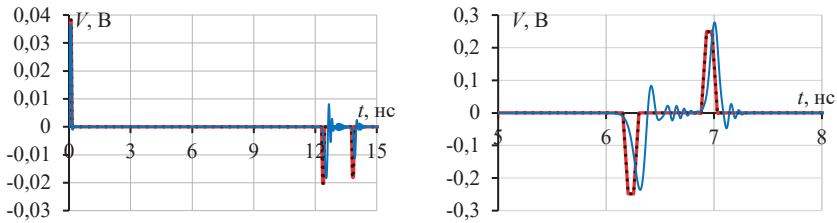
Разработка аналитических моделей основана на методе разложения мод во временной области, который заключается в представлении системы связанных линий передачи в виде набора *n* одиночных линий передачи [2]. Данный подход позволяет преобразовать связанные телеграфные уравнения в систему несвязных уравнений для модальных напряжений и токов с использованием матриц преобразований.

В работе предложен алгоритм вычисления временных откликов, основанный на их представлении в произвольной точке вдоль линии через векторы начальных падающих мод и матрицы коэффициентов отражения. В отличие от традиционных подходов, использующих преобразование Фурье или численные методы во временной области (например FDTD), предложенный метод обеспечивает получение аналитических решений в замкнутой форме. Это позволяет декомпозировать

результирующий сигнал на отдельные составляющие и количественно оценить вклад каждой из них в формирование суммарной амплитуды перекрестной помехи.

На основе предложенного алгоритма разработаны аналитические модели для межсоединений, состоящих из 2-, 3-, 4-проводных линий передачи. Модели учитывают асимметрию оконечных нагрузок, которая может возникнуть в результате технологического разброса параметров, неоднородности элементов схемы, различий импедансов подключаемых устройств, а также особенностей топологии.

Для верификации предложенных моделей выполнено сопоставление результатов аналитических расчетов с данными, полученными с использованием численных методов, в частности метода моментов (МоМ) и метода конечного интегрирования (МКИ). Проведенный анализ временных откликов при воздействии входного импульса с длительностью фронта 50 пс показал высокую степень сходимости результатов (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Формы напряжения ближней (*а*) и дальней (*б*) перекрестных наводок в 2-проводной линии передачи, полученные с помощью аналитики (––), МоМ (- -) и МКИ (––)

Разработанные аналитические модели позволяют проводить анализ целостности сигналов и уровней перекрестных наводок в межсоединениях ИС быстрее по сравнению с численным моделированием, что позволяет сократить временные и вычислительные затраты на предварительных этапах проектирования. Это создает предпосылки для интеграции данных моделей в современные САПР СВЧ МИС и ГИС, обеспечивая возможность итерационной оптимизации топологии с учетом требований электромагнитной совместимости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00419) в ТУСУРе.

Литература

1. Ramdani M. The electromagnetic compatibility of integrated circuits — Past, present, and future // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009. Vol. 51. № 1. P. 78–100.
2. Park S. W., Xiao F., Kami Y. Analytical approach for crosstalk characterization of multiconductor transmission lines using mode decomposition technique in the time domain // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, 2010. Vol. 52. P. 436–446.