

Предисловие

Идея настоящего справочника созревала несколько лет. Занимаясь вопросами конструирования аппаратуры и печатных узлов, в частности, я накапливал коллекцию аналитических формул для расчета электрофизических параметров, разбросанных по различным литературным источникам – книгам и журнальным статьям. Когда аппаратура была относительно низкочастотной, актуальность детальных расчетов конструкций и монтажных соединений была не очевидна. Аппаратура в большинстве случаев работала должным образом без оценки электрофизических параметров и требовала относительно несложной доработки после экспериментальной проверки прототипа. По мере повышения быстродействия цифровой аппаратуры стало понятно, что без предварительной оценки электрических емкостей и индуктивностей, вызванных элементами конструкции и монтажными соединениями, можно принять ошибочные решения, которые в конечном итоге приведут к значительным временным и материальным потерям. Особую роль сыграли требования к многослойным печатным платам с контролируемым волновым сопротивлением, доля которых в мировой промышленности непрерывно растет. Подобные платы требуют точного расчета волнового сопротивления микрополосковых или полосковых линий передачи как функции геометрии и свойств материалов линии. Таким образом, жизненная необходимость заставила взяться за подготовку настоящего справочника.

В процессе работы над рукописью стало ясно, что в отечественной литературе существуют только два справочника – один посвящен расчету электрической емкости с акцентом на электротехнические высоковольтные приложения [12], другой – расчету индуктивностей [13], изданных соответственно более 40 и 35 лет назад. Они давно стали библиографической редкостью и практически недоступны инженерам. Более актуальная информация разбросана по многочисленным статьям, руководствам по проектированию, в том числе в англоязычной литературе. Это тоже ограничивает доступ специалистов к информации. На основе анализа многочисленных источников в настоящем справочнике сгруппированы аналитические выражения, которые, по моему мнению, актуальны для разработчиков и конструкторов электронной аппаратуры. Вопросы расчета емкости и индуктивности компонентов (сопротивлений, индукторов, трансформаторов и т. п.) в справочнике не рассматриваются.

В результате работы над справочником выполнены многочисленные расчеты по аналитическим формулам, среди которых отобраны наиболее компактные, обеспечивающие погрешность, приемлемую для инженерных

приложений. Проблема заключается в том, что даже программные средства не гарантируют отсутствие погрешности – она заложена в исходных данных, особенно в параметрах материалов (магнитной и диэлектрической проницаемости). Только зная конкретный материал, находящийся на складе предприятия-изготовителя, можно с достаточной точностью учесть эти параметры. Очевидно, что такая ситуация желательна, но практически неосуществима. Поэтому следует согласиться с наличием определенных погрешностей в результатах расчетов.

По каждой формуле в справочнике проведены вычисления в диапазоне параметров, характерном для конструкций и монтажа электронной аппаратуры. Их результаты представлены в виде таблиц и графиков. В таблицах результаты даны с двумя или тремя знаками после запятой, поскольку для практики большая точность не имеет смысла. Графики более наглядно показывают характер изменения функции, что помогает более глубокому пониманию физической сути формулы. К сожалению, некоторые вычисления весьма громоздки, требуют расчета нескольких промежуточных коэффициентов, что не всегда удобно. В этом случае, если теоретически возможно, предложены более компактные выражения в виде полиномиальной, степенной или логарифмической аппроксимации, которые позволяют достаточно просто получить искомую функцию при помощи одного выражения, минуя вычисления сложных функций или многочисленных коэффициентов. Результаты каждого расчета завершаются краткими комментариями, в которых проводятся соответствия между характером функции и физической сутью явления.

Справочник состоит из шести глав и заключения.

В главе 1 рассматривается роль электрической емкости, индуктивности и волнового сопротивления в электронной аппаратуре и поясняется необходимость их расчета, сравниваются численные методы и аналитические подходы к оценкам электрофизических параметров. Приводятся аналитические выражения, связывающие все три группы параметров. Это позволяет рассчитать один параметр через любой другой. Значительное внимание в главе уделено влиянию технологических факторов на результаты вычислений, которые подтверждают значительную зависимость расчетов от свойств материалов и особенностей технологии. Этот анализ проводился на примере печатных плат.

Глава 2 посвящена применению специальных функций, которые встречаются в некоторых расчетных соотношениях. Часто применение таких функций усложняют расчеты, что отторгает инженера от их проведения. В главе приведены вспомогательные таблицы и графики, а также аппроксимации соответствующих функций, которые существенно упрощают применение специальных функций и повышают точность вычислений.

Расчет электростатической емкости приведен в главе 3. Электрическая емкость – важнейший электрофизический параметр, зная который можно определить индуктивность и волновое сопротивление линии передачи. Приведенные свойства электростатических систем позволяют распространить результаты вычислений на более широкий круг задач. В главе приведены

материалы для расчета емкости уединенных тел, между параллельными пластинами, проводами круглого и прямоугольного сечения, между проводниками конечных размеров.

В главе 4 приведены формулы для расчета индуктивностей. Рассматриваются одиночные провода круглого и прямоугольного сечения, парциальные индуктивности систем параллельных проводников, а также взаимные индуктивности между линиями передачи различной конфигурации. Даны материалы для расчета индуктивности контуров различной топологии, а также линий передачи и контуров с магнитными экранами.

Расчет волнового сопротивления линий передачи дан в главе 5. В ней рассмотрены линии передачи в печатном монтаже, в проводном монтаже при различных комбинациях проводов и опорных плоскостей, а также коаксиальные и плоские кабели.

В заключительной главе 6 приведены соотношения для оценки емкости и индуктивности отдельных элементов конструкции и монтажа электронной аппаратуры, которые часто встречаются при ее разработке.

Настоящее руководство в первую очередь предназначено для практикующих инженеров-конструкторов, желающих сделать свой труд более эффективным, а принятые решения обосновать расчетами.

Выражаю признательность рецензентам за предложения по улучшению содержания книги. Замечания и предложения от внимательных и заинтересованных читателей, направленные в адрес издательства, будут с благодарностью приняты.

*Л.Н. Кечиев,
д.т.н., профессор,
лауреат премии Правительства РФ*