

Мои коллегам инженерам
с благодарностью за их труд
и с признательностью за оценку
моих работ

Предисловие

Это неформальное руководство написано в период длительной самоизоляции весной 2020 года, которая проходила во время пандемии, вызванной коронавирусом COVID-19. Это время оказалось для меня плодотворным, что позволило привести в порядок рабочие материалы, пересмотреть некоторые научно-технические положения и написать настоящее руководство. Почему я пришел к идее подготовить данную рукопись? До этого уже были выпущены в свет три книги по проектированию печатных плат (2007 [16], 2016 [17] и 2017 [18] гг.), которые достаточно глубоко рассматривали все основные вопросы проектирования высокочастотных плат – от физических основ распространения электромагнитных (ЭМ) волн в линиях передачи до проектирования систем распределения питания. Казалось бы, все вопросы освещены и в ближайшие годы нет необходимости еще одного издания подобного типа. Но проведение семинаров, на которых присутствовали практикующие инженеры-конструкторы электронной аппаратуры, показало, что требуется некоторое компактное руководство, где в сжатом виде приведены наиболее важные правила проектирования плат. Это позволит конструкторам, испытывающим дефицит времени, оперативно принимать решения, которые не приведут к грубым ошибкам и могут быть уточнены при обращении к более глубоким монографиям по проектированию печатных плат (ПП).

Еще один побудительный мотив лежал в основе написания данного руководства – это взаимодействие инженера-проектировщика и системы автоматизированного проектирования (САПР). Практически все печатные платы разрабатываются с помощью САПР. Практика применения САПР создает впечатление, что все вопросы будут автоматически решены без глубокого анализа полученных результатов. Однако мировой опыт применения даже наиболее продвинутых САПР ПП говорит о том, что посттопологический анализ необходим в части целостности сигнала и целостности питания. По мере повышения быстродействия актуальность такого анализа очевидна. Поэтому правила проектирования позволяют конструктору провести такой экспресс-анализ, найти проблемные места и обсудить возможные решения с разработчиком в одном терминологическом базисе. При необходимости более глубокого разбора проблемной

ситуации следует обратиться к монографиям, в которых можно найти более детальное рассмотрение соответствующих вопросов.

Настоящее руководство построено следующим образом: в начале раздела кратко излагается суть рассматриваемого вопроса, а в конце приводится правило проектирования, адресованное разработчику и/или конструктору. Поскольку основной акцент сделан на конструировании печатных плат, то методы и правила прежде всего ориентированы на конструкторов печатных плат.

В руководстве 12 разделов и заключение, расположены в той последовательности, которая, по мнению автора, приближается к реальному процессу принятия решения на определенных стадиях разработки печатной платы.

В разделе 1 рассматриваются базовые требования к высокочастотным платам. Повышение частоты изменило философию проектирования плат, заставило обратить внимание на ранее не учитываемые параметры, которые мы называем «паразитные». Если в низкочастотных платах о них только упоминали, но существенного эффекта они не оказывали, то для высокочастотных плат паразитные параметры во многом будут иметь определяющее влияние на целостность сигнала, целостность питания и электромагнитную совместимость (ЦС/ЦП/ЭМС). В этом разделе показано это развитие методологии проектирования, приведены основные организационно-технологические факторы, влияющие на качество разработки и основные требования к платам, перечень стандартов, необходимых для проектирования, а также некоторые термины и определения, необходимые для четкого понимания текста руководства.

Раздел 2 рассматривает схему принципиальную электрическую как исходную информацию для конструирования платы. В нем конструктор найдет подходы для рассмотрения схемы не только как условного рисунка, показывающего соединение компонентов, а как информации об источниках и приемниках сигналов в виде токов и напряжений, а также линий передачи, по которым ЭМ энергия распространяется от источников к приемникам. В разделе уточняются понятия «заземление» и «опорная плоскость».

В разделе 3 кратко изложен процесс изготовления многослойных печатных плат (МПП) и подчеркнуты факторы, влияющие на последующие конструкторские решения. В разделах 4 и 5 приведены сведения о материалах для МПП. Конструктор не всегда задумывается над свойствами ламината, который он применяет, хотя от них зависят многие электрофизические свойства платы. Эта связь показана в разделе. Конечно, на выбор материалов влияет много факторов – от экономических до доступности материалов, но, тем

не менее, конструктор должен понимать особенности и последствия применения материала той или иной марки.

Раздел 6 затрагивает шаги топологического проектирования – размещение компонентов и трассировка. Они, как правило, выполняются с помощью САПР, но во многих случаях надо иметь определенные формальные сведения, которые помогают понять возможности и ограничения при выполнении этапа топологического проектирования.

В разделе 7 рассмотрены электрофизические параметры печатного монтажа. Материалы этого раздела помогают конструктору разобраться с сопротивлениями, индуктивностями и емкостями в печатном монтаже, их влиянием на качество сигнала и систему питания и заземления. Объединение этих физических параметров происходит в рассмотрении модели линий передачи и ее волновом сопротивлении – узловом параметре при конструировании плат. Больше половины мирового производства печатных плат – это платы с контролируемым волновым сопротивлением, и доля подобных плат непрерывно растет.

Разделы 8 и 9 посвящены рассмотрению помех в печатном монтаже. В разделе 8 описаны помехи отражения, возникающие в несогласованных электрически длинных линиях, и представлены правила их устранения. В данной ситуации необходимы совместные усилия разработчиков и конструкторов; правила проектирования для тех и других приведены в разделе. В разделе 9 рассмотрены перекрестные помехи в монтаже, которые ограничивают быстродействие и существенно влияют на топологические размеры монтажа. Правила снижения, а в некоторых случаях устранения этих помех приведены в данном разделе. По мере роста быстродействия проблемы с помехами в печатном монтаже обостряются, и без их решения нельзя говорить о создании работоспособного печатного узла.

Раздел 10 посвящен важнейшему вопросу проектирования ПП – системе распределения питания (СРП). Если эта система спроектирована неправильно, то и целостность сигнала, и целостность питания нарушатся, а работа платы на высоких частотах будет невозможна. Внимание конструкторов акцентировано на наличии планарного конденсатора в стеке МПП и применении развязывающих конденсаторов. Здесь опять требуются совместные усилия разработчиков и конструкторов, что и отмечено в приведенных правилах проектирования.

В разделе 11 излагаются правила проектирования стека МПП, который позволяет одновременно удовлетворить требования к линиям передачи и СРП. Это одни из ответственных этапов конструирования платы.

В разделе 12 приводятся правила конструирования дифференциальных пар, во многих случаях являющиеся единственным решением для создания сверхвысокочастотных интерфейсов, работающих с гигабитным быстродействием. При этом имеются тонкие моменты, которые должны быть обязательно учтены при конструировании дифференциальных пар, иначе дифференциальная пара сама превратится в источник помех.

Раздел 13 – заключение, в котором подчеркивается необходимость непрерывного критического рассмотрения применяемых правил проектирования, что вызвано постоянным повышением быстродействия электронной аппаратуры.

Автор старался обойтись минимальным математическим аппаратом, приведя в пособии только основные формулы, необходимые для понимания излагаемого материала и проведения оперативных расчетов. Наиболее важные из них взяты в рамку. Считаю, что эти соотношения конструктор должен обязательно знать, поскольку они являются основой многих фундаментальных решений.

Завершая предисловие, можно сформулировать основополагающее правило:

быстродействие постоянно растет, а вероятность случайного удачного решения падает; но чем больше знаний, тем ближе конструктор к удачному решению.

Настоящее руководство в первую очередь предназначено для практикующих инженеров-конструкторов, занимающихся разработкой печатных плат повышенного быстродействия, желающих сделать свой труд более эффективным, добиться положительных результатов с минимальными временными затратами наиболее рентабельными методами.

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*