

Системный подход по внутрисхемной диагностике и проектированию печатных плат для локомотивов

Аннотация. В условиях микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры все большую актуальность приобретают вопросы проектирования коммутационных структур. Классическим решением для коммутационной структуры функциональных модулей электронной аппаратуры (ЭА) являются многослойные печатные платы - печатные платы, состоящие из нескольких слоев диэлектрика с проводящими рисунками между слоями и на внешних сторонах. Главной задачей при проектировании многослойных печатных плат является обеспечение надежной конструкции, а также высокое качество передаваемого сигнала. Актуальность исследований обусловлена тем, что на сегодняшний день все больше электронных устройств имеют немалое количество используемых элементов и жесткие ограничения по габаритам устройства, что приводит к необходимости использования многослойных печатных плат, в том числе и в ВЧ диапазоне.

При проектировании слоев печатной платы устанавливается последовательность расположения слоев печатных дорожек; принимается решение: какие из них должны быть сплошными слоями питания и земли; учитываются величина диэлектрической проницаемости подложки и расстояние между печатными слоями; рассчитываются требуемые размеры печатных дорожек и минимальная ширина промежутков между ними. Стоит отметить и влияние выбора технологии изготовления на конструкцию многослойной печатной платы.

Ключевые слова: печатные платы, внутрисхемное тестирование, полосовой фильтр.

DOI: doi.org/10.32523/2616-6836-2022-141-4-29-40

1. Введение

1.1 Мотивация

Финальный этап создания электронного продукта — серийное производство, именно оно в конечном итоге определяет качество устройства. Пользователь не сможет оценить идеальную программную и аппаратную платформу новой электроники, если на сборочном конвейере произойдет сбой, поэтому контроль функциональности и тестирование сборки — обязательные этапы массового производства.

В общем виде процесс подготовки и тестирования электронного изделия на производстве выглядит так:

- проектирование и создание стенда для прошивки и тестирования с использованием JTAG/ICST-тестирования;
- разработка системы тестов и параметров контроля качества и приемки на производстве;
- автоматизированная или ручная проверка функциональности.

1.2 Методики и технологии реализации тестирования устройств и их отдельных частей в процессе производства

Тестирование устройства и его отдельных частей в процессе производства можно

реализовать на базе следующих методик и технологий:

1. *Визуальный автоматизированный контроль (AOI, AXI)* — это предварительная проверка качества, которая используется на любом контрактном производстве, она проходит на разных стадиях монтажа печатных плат, в том числе с использованием рентгеновского излучения для проверки невидимых глазу или стандартным оптическим системам мест показан на рисунке 1.

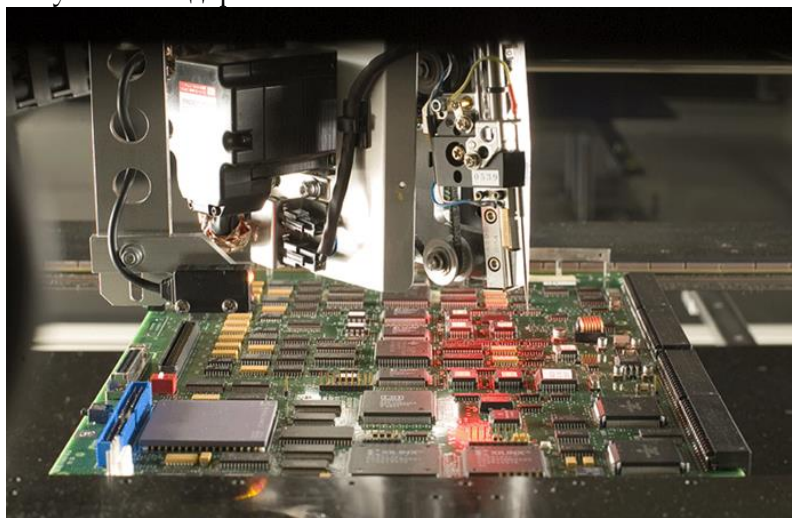


Рисунок 1. Печатная плата проходит визуальный автоматизированный контроль (АОИ). По результатам проверки отображаются данные по обнаруженным дефектам

2. *Внутрисхемное тестирование (ICT/FICT)* – проверка соединений и компонентов на печатной плате, анализ электрических параметров всей схемы либо отдельных ее участков.

Данный метод использует контакт пробников с узлами собранной платы, это может быть, как стационарное поле контактов («ложе гвоздей», англ. – bedofnails), так и «летающие щупы» (flyingprobe) или «летающие матрицы» представлен на рисунке 2. Часто требует использования сложного и дорогостоящего оборудования, технологической подготовки, изготовления специальной оснастки.

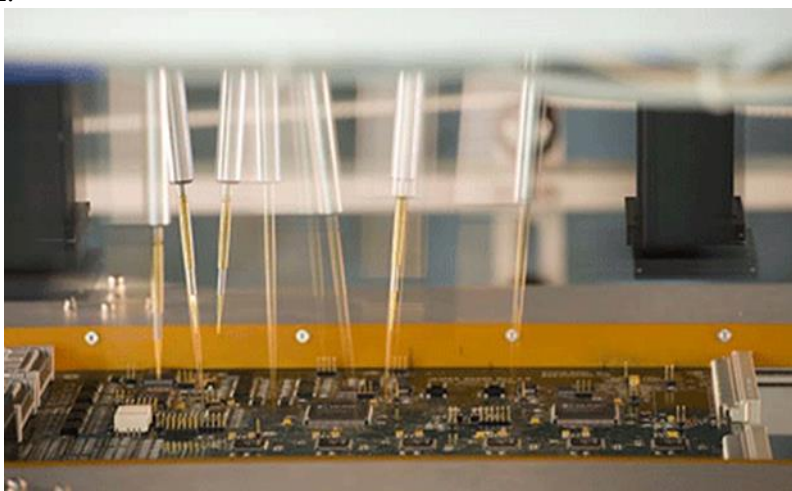


Рисунок 2. Тестирование печатной платы «летающими щупами» (flyingprobes)

3. *Периферийное/граничное сканирование (boundaryscan)* — тестирование с использованием JTAG, которое основано на использовании в микросхемах поддержки стандарта IEEE 1149.

4. *Функциональное тестирование (FCT)* — проверка собранных или частично собранных устройств на выполнение заданной функциональности и на соответствие параметрам, которые заложены в спецификации на прибор.

1.3 Оценка методик и технологий реализации тестирования устройств и их отдельных частей в процессе производства

Все перечисленные методики позволяют оценить качество элементов электроники в процессе производства, однако в некоторых случаях тестирование устройства проводится только на финальном этапе. Это так называемое тестирование после окончательной сборки (EOL) — проверка функциональности и соответствия спецификации. Оценивается не только качество, но также стабильность и надежность устройства. Такой анализ узлов электронных изделий проходит с использованием сложного стендового оборудования, которое имитирует систему, в составе которой работает тестируемое устройство. Если по результатам такой проверки процент брака превышает предварительную оценку, тогда корректируется технология производства и запускается очередная пробная партия устройств. И так в несколько итераций.

На практике лучшие результаты показывают те методики, которые используются в процессе производства, т.е. функциональное и внутрисхемное тестирование, т.к. они позволяют оперативно получить информацию и определить конкретные этапы, на которых появляются проблемы. Благодаря этому можно внести корректировки в производственный процесс еще до окончательной сборки устройства.

Внутрисхемный контроль даёт возможность оценить ряд важнейших параметров собранного печатного узла, в том числе локализовать дефекты, не обнаруживаемые при других видах контроля.

Проведение внутрисхемного контроля является крайне желательным перед этапами наладки и функционального контроля собранного печатного узла, поскольку позволяет исключить проблему поиска и устранения производственных дефектов, на что, по статистике, уходит до 90% времени наладчика. Сэкономленные таким образом ресурсы производитель имеет возможность направить на дополнительные операции по обеспечению максимально высокого качества выпускаемой продукции.

2. Методы

Внутрисхемный контроль означает проверку отдельных компонентов на плате, причем при тестировании компонента исключается влияние параллельных цепей. Внутрисхемный контроль подразделяется на аналоговый и цифровой. При аналоговом контроле обычно проверяются: наличие коротких замыканий и обрывов, номиналы дискретных компонентов, наличие и правильность установки микросхем. При цифровом внутрисхемном контроле проверяются цифровые микросхемы на соответствие таблице истинности.

Функциональный контроль проверяет работоспособность изделия в сборе, при этом выполняются следующие задачи:

- подача питающего напряжения с возможностью изменения его в автоматическом режиме от минимально до максимально допустимого для данного изделия;
- подача цифровых и аналоговых входных сигналов в широком диапазоне частот и напряжений;
- измерение параметров выходных сигналов;
- эмуляция нагрузок;
- обмен данными между тестером и тестируемым устройством;
- обработка результатов измерений и вывод их на монитор и принтер в удобном для пользователя виде;
- накопление и обработка статистической информации.

При функциональном контроле контакт с изделием осуществляется, как правило, через краевой соединитель.

Раннее обнаружение дефектов повышает эффективность производства печатных плат и

снижает накладные расходы. Для многих промежуточных стадий технологического процесса основным является оптический контроль.

Технология внутрисхемного тестирования (In-Circuit Testing, ICT), непосредственная предшественница JTAG, практически обладала монополией в тестировании электронных ПП с конца 1970-х гг. и с неизменным успехом применяется до настоящего времени, хотя и с определенными ограничениями. Доступ тестера ко внутренним цепям ПП осуществляется при помощи контактных игловок, прижимаемых адаптером тестера к поверхности ПП. На ранних этапах такие адаптеры назывались «ложе из гвоздей» (bedofnails), но сегодня это название совершенно устарело и не используется, уступив место термину «игольчатый адаптер». Поскольку в последней трети прошлого века корпуса DIP доминировали при производстве ИС, любой ее вывод был доступен для игловок адаптера с нижней (а зачастую и с верхней) стороны ПП, так что проблемы физического внутрисхемного доступа к цепям ПП практически не существовало.

С началом широкого распространения технологии поверхностного монтажа и миниатюризации ИС компоненты стали монтироваться на ПП без сквозных отверстий и с обеих сторон ПП. При этом сразу же возникла проблема размещения контактных площадок для игловок тестера ICT, а также проблема постоянного уменьшения их диаметра в условиях высокой плотности монтажа элементов с обеих сторон ПП. Вдобавок к этому, в многослойных ПП значительное число цепей схемы оставалось во внутренних слоях, так что вывод их на поверхность ПП для подключения к контактным площадкам для игловок значительно усложнял разводку платы. Все это обусловило сокращение доступа ко внутренним цепям схемы со стороны тестера ICT, что, однако, не привело к значительному сокращению применимости таких тестеров, а лишь несколько переставило акценты в областях их применения.

Компьютерное моделирование физических явлений, систем и устройств является наиболее удобным и эффективным способом организации лабораторной мастерской. По сравнению с реальными лабораторными стендами, виртуальные стенды имеют ряд существенных преимуществ:

1. отсутствие громоздкой контрольно-измерительной аппаратуры и макетов исследуемых схем;
2. малая погрешность измерений;
3. время, затрачиваемое на компьютерное моделирование, несравненно меньше времени, расходуемого на изготовление макета и выполнения его экспериментального исследования.

Значительная часть прикладных компьютерных пакетов специально разработана для решения задач проектирования электронных компонентов.

3. Результаты применения методик

Применение методов моделирования для разработки полосового фильтра Баттерворта 3-го порядка на пассивных элементах L, CCL-диапазона (от 1 ГГц до 2 ГГц).

3.1 Аналитический метод (расчеты)

Предположим, что нам нужно разработать полосовой фильтр с частотами $f_1 = 1240$ МГц и $f_2 = 1300$ МГц на уровне -3 дБ и с минимальной аттенюацией -30 дБ на частотах 1200 МГц и 1340 МГц. Также предположим, что импеданс источника и нагрузки фильтра одинаковые — 50 Ом каждый, и требуется АЧХ типа Баттерворта. Поскольку отношение $f_2/f_1 < 1,5$, т. е. меньше 1,5, нам требуется узкополосный полосовой фильтр. Первый шаг в процедуре разработки узкополосного полосового фильтра — это выполнить нормирование полосовых требований. Сначала определим геометрическую центральную частоту:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} = \sqrt{1240 \times 1300 \times 10^6} = 1270 \text{ МГц}$$

Где

f_0 – геометрическая центральная частота;

f_1 – нижняя частота среза;

f_2 – верхняя частота среза.

Далее вычислим две пары геометрически связанных частот режекции, используя следующие формулы:

$$f_a f_b = f_0^2; \quad (2)$$

$$f_a = 1200 \text{ МГц} \quad f_b = \frac{f_0^2}{f_a} = \frac{(1270 \times 10^6)^2}{1200 \times 10^6} = 1344 \text{ МГц} \quad (3)$$

$$f_b - f_a = 144 \text{ МГц} \quad (4)$$

$$f_b = 1340 \text{ МГц} \quad f_a = \frac{f_0^2}{f_b} = \frac{(1270 \times 10^6)^2}{1340 \times 10^6} = 1203 \text{ МГц} \quad (5)$$

$$f_a - f_b = 137 \text{ МГц} \quad (6)$$

где

f_0 – геометрическая центральная частота;

f_a – нижняя геометрически связанная частота режекции;

f_b – верхняя геометрически связанная частота режекции.

Ситуация несколько запутанная. В частности, для каждой пары частот режекции получены две новые пары, что является результатом геометрической связи параметров фильтра по отношению к частоте f_0 . Решением будет выбрать пару с меньшим разносом в 137 МГц, что представляет более строгое требование.

Коэффициент крутизны спада данного полосового фильтра определяется по формуле:

$$A_k = \frac{\text{полоса режекции}}{\text{полоса 3 дБ}} = \frac{137 \text{ МГц}}{60 \text{ МГц}} = 2,283 \quad (7)$$

где

A_k – коэффициент крутизны.

Теперь нужно выбрать кривую Баттерворта частотной характеристики фильтра, которая обеспечивает, по крайней мере, аттенюацию -20 дБ. Такой кривой будет кривая с $n = 3$. На следующем шаге надо создать нормированный низкочастотный фильтр 3-го порядка n -типа, используя параметры. Далее импедансы и частота полученного нормированного низкочастотного фильтра масштабируют, чтобы получить импеданс 50 Ом и частоту на уровне -3 дБ, равную требуемой полосе пропускания полосового фильтра ($\Delta f_{\text{пп}} = f_2 - f_1$), которая для данного примера составляет 60 МГц. Обратите внимание на прием для масштабирования частоты! Вычисления для масштабирования выглядят таким образом:

$$C_{1(\text{действ})} = \frac{C_{1(\text{табл})}}{2\pi(\Delta f_{\text{пп}})R_L} = \frac{0,618 \text{ Ф}}{2\pi(60 \times 10^6)50} = 32,8 \text{ пФ} \quad (8)$$

$$C_{3(\text{действ})} = \frac{C_{3(\text{табл})}}{2\pi(\Delta f_{\text{пп}})R_L} = \frac{1 \text{ Ф}}{2\pi(60 \times 10^6)50} = 106,5 \text{ пФ} \quad (9)$$

$$C_{5(\text{действ})} = \frac{C_{5(\text{табл})}}{2\pi(\Delta f_{\text{пп}})R_L} = \frac{0,618 \text{ Ф}}{2\pi(60 \times 10^6)50} = 32,8 \text{ пФ} \quad (10)$$

$$L_{2(\text{действ})} = \frac{L_{2(\text{табл})}R_L}{2\pi(\Delta f_{\text{пп}})} = \frac{1,618 \times 50}{2\pi \times 60 \times 10^6} = 216 \text{ нГн} \quad (11)$$

$$L_{4(\text{действ})} = \frac{L_{4(\text{табл})}R_L}{2\pi(\Delta f_{\text{пп}})} = \frac{1,618 \times 50}{2\pi \times 60 \times 10^6} = 216 \text{ нГн} \quad (12)$$

где

$C_{1(\text{действ})}, C_{3(\text{действ})}$ – действительные значения конденсторов;

$C_{1(\text{табл})}, C_{3(\text{табл})}$ – табличные значения конденсаторов;

$L_{2(\text{действ})}$ – действительное значение катушки индуктивности;

$L_{2(\text{табл})}$ – табличное значение катушки индуктивности;

$\Delta f_{\text{пп}}$ – требуемая полоса пропускания;

R_L – сопротивление.

Принципиальная схема фильтра с результатами масштабирования показана на рисунке 3, а.

А теперь идет самый важный этап разработки. Каждую ветвь низкочастотного фильтра нужно настроить в резонанс с центральной частотой f_0 , добавив к каждому индуктору последовательный конденсатор и к каждому конденсатору параллельный индуктор. Значения дополнительных компонентов определяют, используя уравнение резонансного LC-контура:

$$L_{(\text{пар } C_1)} = \frac{1}{(1\pi f_0)^2 C_{1(\text{действ})}} = \frac{1}{(1\pi \times 1270 \times 10^6)^2 \times 32,8 \times 10^{-12}} = 1,91 \text{ нГн} \quad (13)$$

$$L_{(\text{пар } C_5)} = \frac{1}{(1\pi f_0)^2 C_{5(\text{действ})}} = \frac{1}{(1\pi \times 1270 \times 10^6)^2 \times 32,8 \times 10^{-12}} = 1,91 \text{ нГн} \quad (14)$$

$$L_{(\text{пар } C_3)} = \frac{1}{(1\pi f_0)^2 C_{3(\text{действ})}} = \frac{1}{(1\pi \times 1270 \times 10^6)^2 \times 106,15 \times 10^{-12}} = 0,6 \text{ нГн} \quad (15)$$

$$C_{(\text{послед } L_2)} = \frac{1}{(1\pi f_0)^2 L_{2(\text{действ})}} = \frac{1}{(1\pi \times 1270 \times 10^6)^2 \times 216 \times 10^{-9}} = 0,291 \text{ нФ} \quad (16)$$

$$C_{(\text{послед } L_4)} = \frac{1}{(1\pi f_0)^2 L_{4(\text{действ})}} = \frac{1}{(1\pi \times 1270 \times 10^6)^2 \times 216 \times 10^{-9}} = \quad (17)$$

$$= 0,291 \text{ нФ}$$

где $L_{(\text{пар } C_1)}, L_{(\text{пар } C_3)}, L_{(\text{пар } C_5)}$ – значение катушки индуктивности, параллельно расположенных конденсатору;

$C_{(\text{послед } L_2)}, C_{(\text{послед } L_4)}$ – значение конденсатора, последовательно соединенного с катушкой индуктивности.

3.2 Схемотехнический метод

Конечная версия принципиальной схемы узкополосного полосового низкочастотного фильтра показана на рисунке 3, а.

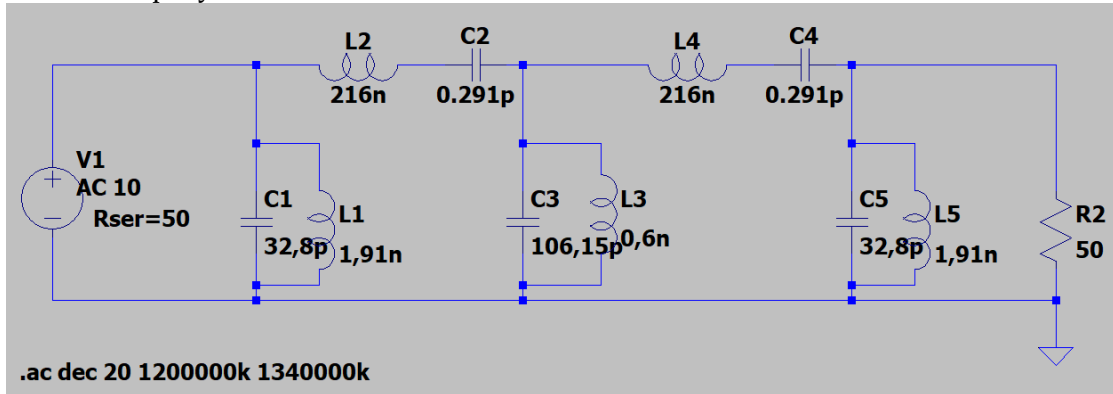


Рисунок 3, а - принципиальная схема узкополосного полосового низкочастотного фильтра

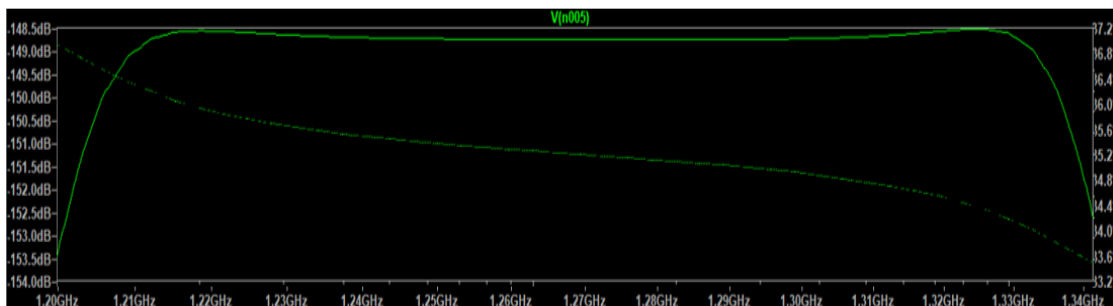
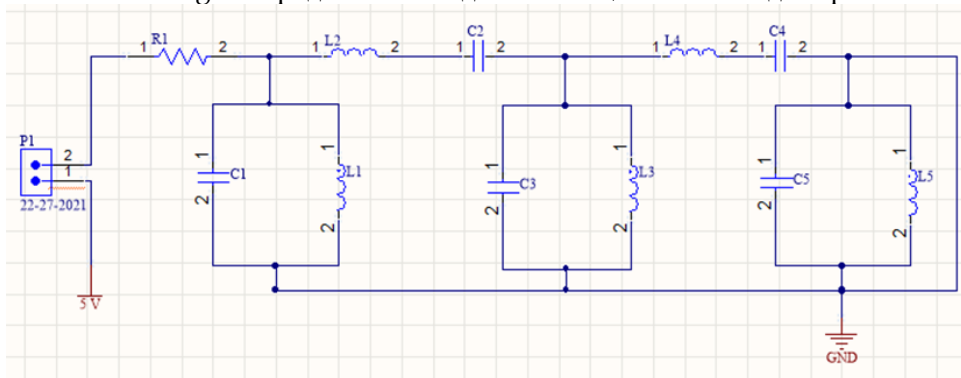


Рисунок 3, б - полосовой фильтр Баттерворта 5-го порядка на пассивных элементах L, CL-диапазона в программном обеспечении LTSpice 17

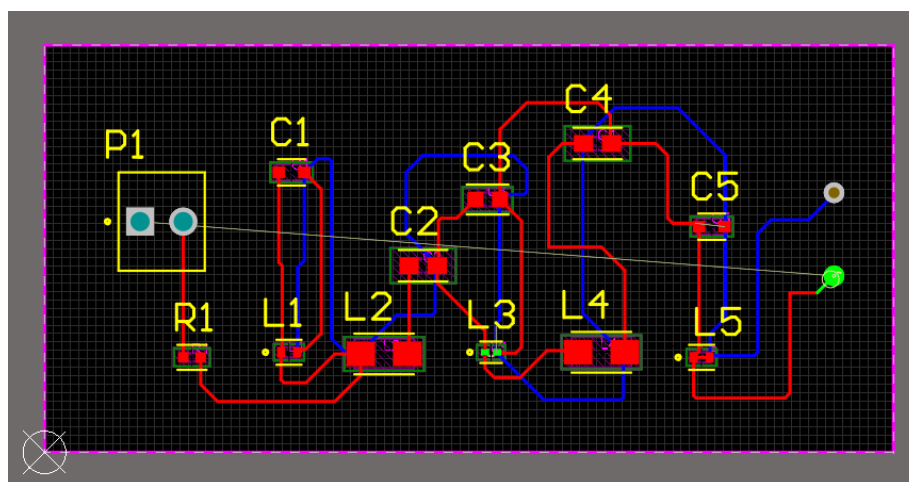
Рассчитав все компоненты для нашего полосового фильтра, а также получив его АЧХ, приступим к следующему методу моделирования.

3.3 Имитационный метод (система автоматизированного проектирования (САПР))

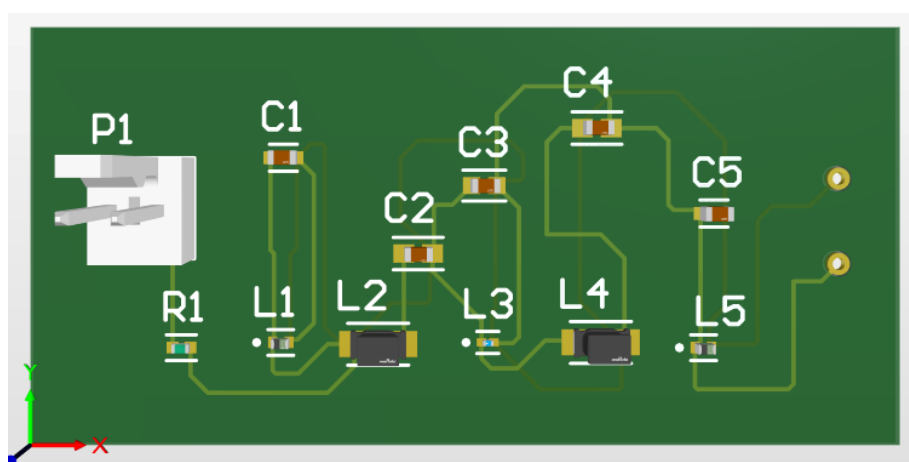
Программа AltiumDesigner предназначена для имитационного моделирования.



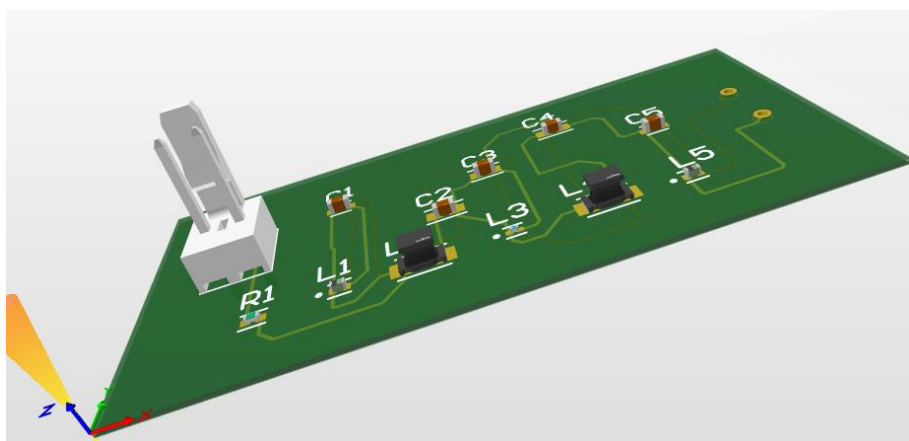
а) схемная реализация;



б) создание РСВ (печатная плата);



в) 3D-модель печатной платы;



г) 3D-модель печатной платы

Рисунок 4. Полосовой фильтр Баттерворта 5-го порядка на пассивных элементах L, C L-диапазона

4. Выводы

По результатам всех технологических операций получаем высококачественную многослойную печатную плату, в которой минимизированы негативные влияния шины питания, внешних наводок и сигнальных проводников друг на друга. Предлагаемая методика направлена на

решения проблем неоптимального использования ресурсов, которые в первую очередь сказываются на увеличении издержек предприятия, качестве рабочего процесса и выпускаемого продукта. Она полностью удовлетворяет требованиям концепции "Бережливого производства" и позволяет минимизировать потери на каждом этапе производственного процесса, тем самым существенно улучшив экономические показатели предприятия. Залогом успешности современного производства является постоянное сокращение издержек, улучшение качества продукции и непрерывное совершенствование процессов.

По результатам анализа методов проектирования многослойных печатных плат можно констатировать, что:

- при анализе требуемых параметров определяются важные числовые характеристики, без которых можно сильно проиграть не только в качестве и габаритных размерах, но и в себестоимости печатной платы;
- проводя трассировку проводников, проанализировав перед этим влияние проводников между собой, можно повысить качество характеристик передачи сигнала;
- использование классических вариантов укладки слоев дает возможность получать шаблон при проектировании многослойных печатных плат для различных устройств со схожими требованиями.

В итоге можно отметить, что предлагаемая методика приводит к получению на выходе высококачественных многослойных печатных плат с низкой себестоимостью.

Список литературы

1. Мазепова О. И., Мещанов В. П., Прохорова Н. И., Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р./Под ред. А. Л. Фельдштейна. Справочник по элементам полосковой техники – М.: Связь, 1917. – с. 1-30
2. Голубев В. И., Ковалев И. С., Кузнецов Е. Г. Конструирование и расчет полосковых устройств. – М.: Сов. радио, 1974. – с. 20-47
3. Малорацкий А. Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. – М.: Советское радио, 1972. – с. 1-15
4. Полосковые платы и узлы. Проектирование и изготовление /Под ред. Е.П. Котова и В.Д. Каплуна. – М.: Советское радио, 1979. – с. 1-5
5. Баскаков, С. И. Радио/технические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 2000. – с. 462
6. Хоровиц Пауль, Хилл Уинфилд. Искусство схемотехники Том 1. – М.: Мир, 1993. – с. 1 - 120.
7. Хоровиц Пауль, Хилл Уинфилд. Искусство схемотехники Том 2. – М.: Мир, 1993. – с. 1 – 125.
8. Хоровиц Пауль, Хилл Уинфилд. Искусство схемотехники Том 3. – М.: Мир, 1993. – с.
9. Электроника. Теория и практика – 4-е изд.: Пер. с англ. / Саймон Монк, Пауль Шерц. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – с. 250-270, 387-425.
10. Куцко Т. Ю. Расчет полосовых фильтров. – М.: Энергия, 1986
11. Г. Л. Маттей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс, Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, М, Связь, 1971 г. – с. 26-49.
12. Л. Г. Малорацкий, Л. Р. Явич, Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях, М, Сов. радио, 1972 г.
13. Проектирование радиоприемных устройств. Под ред. А. П. Сиверса, М, Сов. радио, 1970 г. – с. 178-193.
14. Гришенцев А.Ю. Электрические фильтры. Моделирование. Применение для защиты двухпроводных линий /учебное пособие. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – с. 39-41.
15. Расчет электронных схем. Примеры и задачи: учеб. Пособие для вузов по спец. электрон. технике. / Г.И. Изьюров, Г.В.Королев и др.- М.: Высшая школа, 2007. – с. 355.

16. В. Х. Осадченко, Я. Ю. Волкова, Ю. А. Кандрин. Фильтры высоких и низких частот. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – с. 62-71.
17. Основы теории цепей: Учеб. для вузов /Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил, С.В.Страхов. –5-е изд., перераб. –М.: Энергоатомиздат, 1989. – с. 528
18. Каплянский А. Е. и др. Электрические основы электротехники. Изд. 2-е. Учеб. пособие для электротехнических и энергетических специальностей вузов. -М.: Высш. шк., 1972. – с. 448.
19. Комаров В. В., Бушанский С. К. СВЧ-фильтры на объемных концентрических резонаторах // Радиотехника. 2018. № 8. - с. 140–143.
20. Шаров Г. А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. М.: Горячая Линия – Телеком, 2016. – с. 640.
21. Проектирование печатных плат в САПР Altium Designer: сборник лабораторных работ / М. Я. Мактас, И. М. Бекмухаметов (в 2 ч. ч. 1). – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – с. 429.
22. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. – СПб: БХВ-Петербург, 2010. – с. 127.

Н.Х. Назиркулов, Н.А. Бурамбаева

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Локомотивтерге арналған схемаішілік диагностика және баспалық платаларды жобалау бойынша жүйелік тәсіл

Аңдатпа. Радиоэлектрондық аппаратураны микроминиатюризациялау жағдайында коммутациялық құрылымдарды жобалау мәселелері өзекті бола түсуде. Электрондық аппаратураның (ЭА) функционалдық модульдерінің коммутациялық құрылымына арналған классикалық шешім көп қабатты баспалық платалар – қабаттар арасында және сыртқы жағында өткізгіш сызбалары бар диэлектриктің бірнеше қабаттарынан тұратын баспалық платалар болып табылады. Көп қабатты баспалық платалар жобалаудағы басты міндет – сенімді дизайнды қамтамасыз ету, сондай-ақ берілетін сигналдың жоғары сапасы. Зерттеулердің өзектілігі бүгінгі күні көптеген электронды құрылыстарда қолданылатын элементтердің едәуір саны және құрылымының өлшемдеріне қатаң шектеулер бар, бұл көп қабатты баспалық платалар, соның ішінде жж диапазонында пайдалану қажеттілігіне әкеледі.

Баспа платасының қабаттарын жобалау кезінде баспа жолдарының қабаттарының орналасу реттілігі белгіленеді; шешім қабылданады: олардың қайсысы үздіксіз қуат және жер қабаттары болуы керек; субстраттың диэлектрик өткізгіштігінің мөлшері және баспа қабаттары арасындағы қашықтық ескеріледі; баспа жолдарының қажетті өлшемдері және олардың арасындағы саңылаулардың ең аз ені есептеледі. Өндіріс технологиясын таңдаудың көп қабатты баспалық платалар дизайнына әсерін атап өткен жөн.

Түйін сөздер: баспалық платалар, схема ішіндегі тестілеу, жолақты сүзгі.

N. Nazirkulov, N. Burambaeva

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

A systematic approach to in-circuit diagnostics and design of printed circuit boards for locomotives

Abstract. In the conditions of microminiaturization of electronic equipment, the issues of design of switching structures are becoming increasingly relevant. The classic solution for the switching structure of functional modules of electronic equipment (EE) are multilayer printed circuit boards - printed circuit boards consisting of several layers of dielectric with conductive patterns between the layers and on the

outer sides. The main task in the design of multilayer printed circuit boards is to ensure a reliable design, as well as high quality of the transmitted signal. The relevance of research is due to the fact that today more and more electronic devices have a considerable number of elements used and strict restrictions on the dimensions of the device, which leads to the need to use multilayer printed circuit boards, including in the RF range.

When designing the layers of the printed circuit board, the sequence of the arrangement of the layers of the printed tracks is established; a decision is made: which of them should be solid layers of power and earth; the value of the dielectric constant of the substrate and the distance between the printed layers are taken into account; the required dimensions of the printed tracks and the minimum width of the gaps between them are calculated. It is worth noting the influence of the choice of manufacturing technology on the design of a multilayer printed circuit board.

Keywords: printed circuit boards, in-circuit testing, bandpass filter.

References

1. Mazepova O. I., Meshchanov V. P., Prokhorova N. I., Feldstein A. L., Yavich L. P./Edited by A. L. Feldstein. Handbook on the elements of strip technology – M.: Svyaz, 1917. – p. 1-30.
2. Golubev V. I., Kovalev I. S., Kuznetsov E. G. Design and calculation of strip devices. – M.: Sov. radio, 1974. – p. 20-47.
3. Maloradsky A. G., Yavich L.R. Design and calculation of microwave elements on strip lines. – Moscow: Sovetskoe radio, 1972. – p. 1-15.
4. Strip boards and nodes. Designing and manufacturing / Ed. by E.P. Kotov and V.D. Kaplun. – M.: Sovetskoe Radio, 1979. – p. 1-5.
5. Baskakov, S. I. Radio/technical circuits and signals. - M.: Higher School, 2000. – p. 462.
6. Horowitz Paul, Hill Winfield. The Art of circuit Engineering Volume 1. – Moscow: Mir, 1993. – p. 1 - 120.
7. Horowitz Paul, Hill Winfield. The Art of circuit Engineering Volume 2. – Moscow: Mir, 1993. – p. 1 – 125.
8. Horowitz Paul, Hill Winfield. The Art of circuit engineering Volume 3. – Moscow: Mir, 1993. – p. 216-220.
9. Electronics. Theory and practice – 4th ed.: Translated from English / Simon Monk, Paul Scherz. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2018. – p. 250-270, 387-425.
10. Kutsko T. Yu. Calculation of bandpass filters. – M.: Energy, 1986
11. G. L. Mattei, L. Yang, E. M. T. Jones, Microwave filters, matching circuits and communication circuits, M, Svyaz, 1971 – p. 26-49.
12. L. G. Maloratsky, L. R. Yavich, Design and calculation of microwave elements on strip lines, M, Sov. radio, 1972.
13. Design of radio receiving devices. Edited by A. P. Sievers, M, Soviet Radio, 1970 – p. 178-193.
14. Grishentsev A.Yu. Electric filters. Modeling. Application for the protection of two-wire lines / tutorial. - St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2009. – p. 39-41.
15. Calculation of electronic circuits. Examples and tasks: studies. Manual for universities on spec. electron. technology. / G.I. Izzyurov, G.V. Korolev et al. - M.: Higher School, 2007. – p. 355.
16. V. H. Osadchenko, Ya. Yu. Volkova, Yu. A. Kandrina. Filters of high and low frequencies. - Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-ta, 2015. – p. 62-71.
17. Fundamentals of the theory of circuits: Studies for universities /G.V.Zeveke, P.A.Ionkin, A.V.Netushil, S.V.Strakhov. -5th ed., reprint –M.: Energoatomizdat, 1989. – p. 528
18. Kaplyansky A. E. et al. Electrical fundamentals of electrical engineering. 2nd ed. Textbook for electrotechnical and energy specialties of universities. - M.: Higher School, 1972. – p. 448.

19. Komarov V. V., Bushansky S. K. Microwave filters on volumetric concentric resonators // Radio Engineering. 2018. No. 8. - p. 140-143.
20. Sharov G. A. Waveguide devices of centimeter and millimeter waves. M.: Hotline – Telecom, 2016. – p. 640.
21. Design of printed circuit boards in CAD Altium Designer: collection of laboratory works / M. Ya. Maktas, I. M. Bekmukhametov (in 2 h. h. 1). – Ulyanovsk: UISTU, 2014. – p. 429.
22. LTspice: computer modeling of electronic circuits. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2010. – p. 127.

Сведения об авторах:

Назиркулов Н.Х. – магистрант 1 курса кафедры радиотехника, электроника и телекоммуникации, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Бурамбаева Н.А. – заведующая кафедрой радиотехники, электроники и телекоммуникации, кандидат технических наук, профессор кафедры радиотехника, электроника и телекоммуникации, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Назиркулов Н. Х. – радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының 1 курс магистранты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті., Қажымұқан көшесі, 13, Астана, Қазақстан.

Бурамбаева Н.А. – Радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының меңгерушісі, техника ғылымдарының кандидаты, радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының профессоры, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті., Қажымұқан көшесі, 13, Астана, Қазақстан.

N. Nodirbek – 1st year master's student of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan str., 13, Astana, Kazakhstan.

N. Burambaeva – Head of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan str., 13, Astana, Kazakhstan.