

## Методика диагностирования печатных плат аппаратуры связи методом термического и электрического анализа

А. С. Колотов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. Н. Копысов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. В. Хворенков, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В современном мире системы связи играют ключевую роль в обеспечении эффективной коммуникации и информационной безопасности. Надежность и исправность печатных плат аппаратуры связи напрямую влияют на стабильность работы всей системы в целом. В связи с этим особое значение приобретает разработка эффективных методов диагностики, позволяющих своевременно выявлять неисправности и предотвращать их развитие. Потребность в обеспечении надежной и безопасной работы сложных систем и комплексов связи с каждым годом только увеличивается. Разработка и совершенствование методик анализа печатных плат является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить надежность, производительность и конкурентоспособность электронных устройств. В данной статье разработаны и описаны методики электрического и термического анализа. Разработана компьютерная модель платы приемовозбудителя с двойным преобразованием частоты с учетом тепловых и электрических параметров. Обоснована возможность и необходимость использования компьютерного моделирования на посттопологическом уровне. При помощи компьютерной модели выполнен тепловой и электрический анализ по постоянному току. Моделирование целостности питания платы выполнено в системе автоматизированного проектирования Altium Designer с использованием расширений PDN Analyzer от CST и Power Analyzer от Keysight. Построены карты распределения плотности тока, падения напряжения и возвратных путей. Выявлены проблемные участки, требующие корректировки топологии. Для моделирования термических режимов использовалась система автоматизированного проектирования Altair Pollex, позволяющая проводить исследования стационарных и нестационарных процессов. Проведено практическое сравнение опытного образца платы приемовозбудителя и компьютерной модели. Показано, что полученные термограммы теплового анализа модели платы, выполненные с учетом полной металлизации структуры слоев, могут привести к погрешности в определении температуры электрорадиоэлементов до 5 %. Это дает возможность правильно принять решение по обеспечению работоспособности изделия.*

**Ключевые слова:** аппаратура связи, печатные платы, Altium Designer, PDN, электрический анализ по постоянному току, Altair Pollex, термический анализ, целостность питания, электромагнитная совместимость.

### Введение

Повышение быстродействия аналоговых и цифровых микросхем, тенденция к миниатюризации компонентов, рост плотности монтажа способствуют еще большему возникновению проблем в работе печатных плат (ПП). Эти проблемы могут возникать в обеспечении эффективности теплообмена, целостности сигналов (ЦС), целостности питания (ЦП) или проявляться в сфере электромагнитной совместимости (ЭМС) [1–3]. Согласно опросу компании Mentor Graphics более 60 % инженеров сталкиваются с проблемами ЦП и ЦС регулярно. Опросы от Altium и PCBWay показывают, что каждый второй проект нуждается в переработке хотя бы одного аспекта: ЦП, ЦС или ЭМС после прототипирования.

Основная причина большинства проблем – отсутствие раннего моделирования и симуляции. Важно осознавать, чем раньше они будут

найдены и устранены на этапе проектирования платы, тем меньше окажутся затраты на этапе физического производства изделия. Особенно это касается сложных многослойных плат с высокой плотностью компоновки. В связи с этим особое значение приобретает разработка эффективных методов диагностирования ПП. Вопросами обеспечения целостности питания [4–7], обеспечения тепловых режимов при конструировании радиоэлектронных средств рассматривались рядом авторов [8–11]. Современный подход к исследованию тепловых и электрических процессов основывается на методах компьютерного моделирования с использованием различных специализированных пакетов программ. В работе [12] приводится алгоритм исследования электронного модуля на воздействие тепловых нагрузок в системе COMSOL Multiphysics. В работе [13] разработана и описана методика обеспечения тепловых режимов

радиоэлектронных устройств с мощными свето-диодами в САПР Solid Works. Данная методика подходит для решения весьма узкого круга задач. В [14] методика основана на численных методах с применением набора инструментов Solid Works Simulation. Используются упрощения: тепловые характеристики задаются только для чувствительных к перегреву элементов. В [15] описана методика печатных плат на металлическом основании, работающих в условии отсутствия конвекции. Основана на численных методах с применением САПР ANSYS. Расчетное ядро перечисленных выше работ основано на методе конечных элементов, основным недостатком которого является трудоемкость подготовки модели к выполнению расчета. Кроме того, во всех работах отсутствует учет теплового процесса в медных печатных проводниках при оценке теплового режима. В [16] рассматривается алгоритм моделирования ЦП. Анализ системы цепей питания выполнен для одной линии. Такая процедура упрощения, может не в полной мере отражать действующих значений распределения напряжения и токов для всего дерева питания ПП. Анализ опубликованных работ показывает, что разработка и совершенствование методик анализа печатных плат является актуальной научно-технической задачей. В статье приведена методика диагностирования ПП аппаратуры связи методом термического и электрического анализа ЦП.

**Цель** исследования – увеличение работоспособности ПП аппаратуры связи на этапе прототипирования за счет выполнения термического и электрического анализа.

### Задачи и методы исследования

Для достижения цели исследования были решены следующие задачи:

1. Разработать методику комплексного термического и электрического анализа на этапе прототипирования.
2. Выполнить моделирование и анализ поведения ПП в различных режимах эксплуатации.
3. Провести сравнение компьютерной модели и опытного образца ПП для оценки точности результатов моделирования

В процессе выполнения работы использованы общенаучные методы теоретического исследования (анализ, синтез, статистические методы), теория автоматизированного проектирования, методы компьютерного моделирования и экспериментального исследования зависимостей параметров.

### Внедрение методики в цикл сквозного проектирования

На рисунке 1 изображен цикл сквозного проектирования (ЦСП) ПП. Данный процесс справедлив при разработке абсолютно любой ПП. ЦСП – это набор действий, выполняемых последовательно, начинающийся с идеи о разработке до момента серийного производства изделия. На практике этот цикл представляется условным. На каждом этапе происходит проверка и при необходимости – возврат на предыдущий этап (необязательно на предшествующий).

Основные этапы ЦСП представлены в таблице 1.

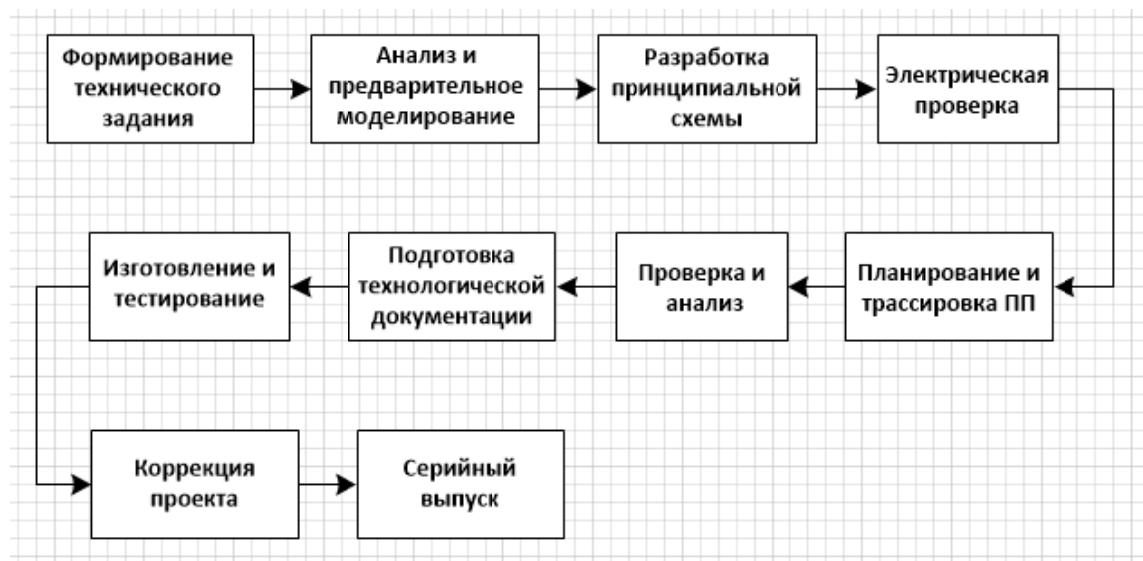


Рис. 1. Цикл сквозного проектирования печатной платы

Fig. 1. The circuit board end-to-end design cycle

Таблица 1. Цикл сквозного проектирования печатной платы

Table 1. The cycle end-to-end design PCB

Наименование этапа	Действия – шаги, характеризующие этап
Формирование технического задания	Определение функционального назначения устройства. Составление технического задания (ТЗ). Спецификация электрических компонентов и интерфейсных соединений
Анализ и предварительное моделирование	Исследование аналогичных решений и стандартов. Предварительный расчёт электрической схемы. Оценка ЭМС, тепловых режимов и прочностных нагрузок
Разработка принципиальной схемы	Выбор элементов электронной схемы и их характеристик. Построение электрической схемы в CAD-программе
Электрическая проверка	Проверка схемы на логические ошибки: незамкнутые цепи, дублирующиеся номера выводов и др.
Планирование и трассировка печатной платы	Уточнение габаритов. Размещение компонентов на плате. Маршрутизация цепей трассировки
Проверка и анализ	Проверка правил трассировки: импеданс, ограничения ширины дорожек и переходных отверстий и др. Анализ ЦС, ЦП, ЭМС: распространение высокочастотных сигналов, отражение волн, перекрёстные помехи, оптимизация расположения критичных цепей питания и сигнальных линий и др. Выявление областей высоких температур и перегрева
Подготовка технологической документации	Генерация Gerber-файлов, файла сверловки, списка деталей (ВОМ). Расчёт размеров монтажных площадок и допусков изготовления. Уточнение материалов подложки и покрытий. (например, FR-4, керамические основы и др.)
Изготовление и тестирование опытного образца	Заказ ПП образцов изделия у производителя. Сборка опытных образцов. Функциональное тестирование устройства. Испытания на устойчивость к внешним воздействиям (температура, влажность, вибрация)
Коррекция проекта	Устранение выявленных ошибок и недостатков. Повторное прохождение предыдущих этапов проектирования (при необходимости)
Серийный выпуск	Передача разработанной топологии и техдокументации производителю для запуска серийного производства. Контроль качества готовых изделий

На основе проведенного анализа была предложена методика диагностирования печатных плат аппаратуры связи методом термического и электрического анализа, в основу которой положен принцип посттопологического анализа ПП. В отличие от рассмотренных методик, где электрические и тепловые расчёты выполняются раздельно, предложен способ их объединения: результаты электрического анализа (плотность тока, падение напряжения, плотность возвратных токов) используются как входные параметры для термического моделирования.

Целью предложенной методики является комплексная оценка работоспособности печатной платы, которая подразумевает проверку распределений напряжений и токов в цепях питания, а также выявление зон локального перегрева и соответствия теплового режима нормативным требованиям. Объектом исследования

могут выступать жесткие и гибкожесткие ПП. У предложенной методики есть ограничение на количество проводящих (сигнальных и силовых) слоев ПП, которое не может быть больше 32. Методика диагностирования ПП основана на численном методе анализа, который требует применения специальных программ. Были выбраны следующие САПР: Altium Designer и Altair PollEx. Altium Designer является полнофункциональной САПР для проектирования ПП и считается одной из лидеров на российском рынке средств проектирования электроники. Обладает высокой точностью проектирования, совместимостью и поддержкой с различными форматами обмена. Поддерживаются функции автоматизации: инструменты автоматического размещения компонентов и трассировки проводников на основе системы правил проектирования PCB Rules. Обладает встроенными средствами моделирования электрического анализа

ЦП, обеспечивающих проверку и оптимизацию проектов ПП. Altair PollEx является специализированным инструментом анализа и проверки ПП. Узконаправленность продукта делает его алгоритмы анализа более оптимизированным, обеспечивая баланс между скоростью расчета и точностью результатов. Совместимость с Altium Designer делает процеду-

ру переноса CAD-модели ПП элементарной. Обладает встроенными средствами моделирования тепловых процессов.

Порядок действий регламентирован блок-схемами алгоритмов анализа, представленными на рисунках 2, 3, которые являются взаимодополняющими. Разработанные алгоритмы являются оригинальными.

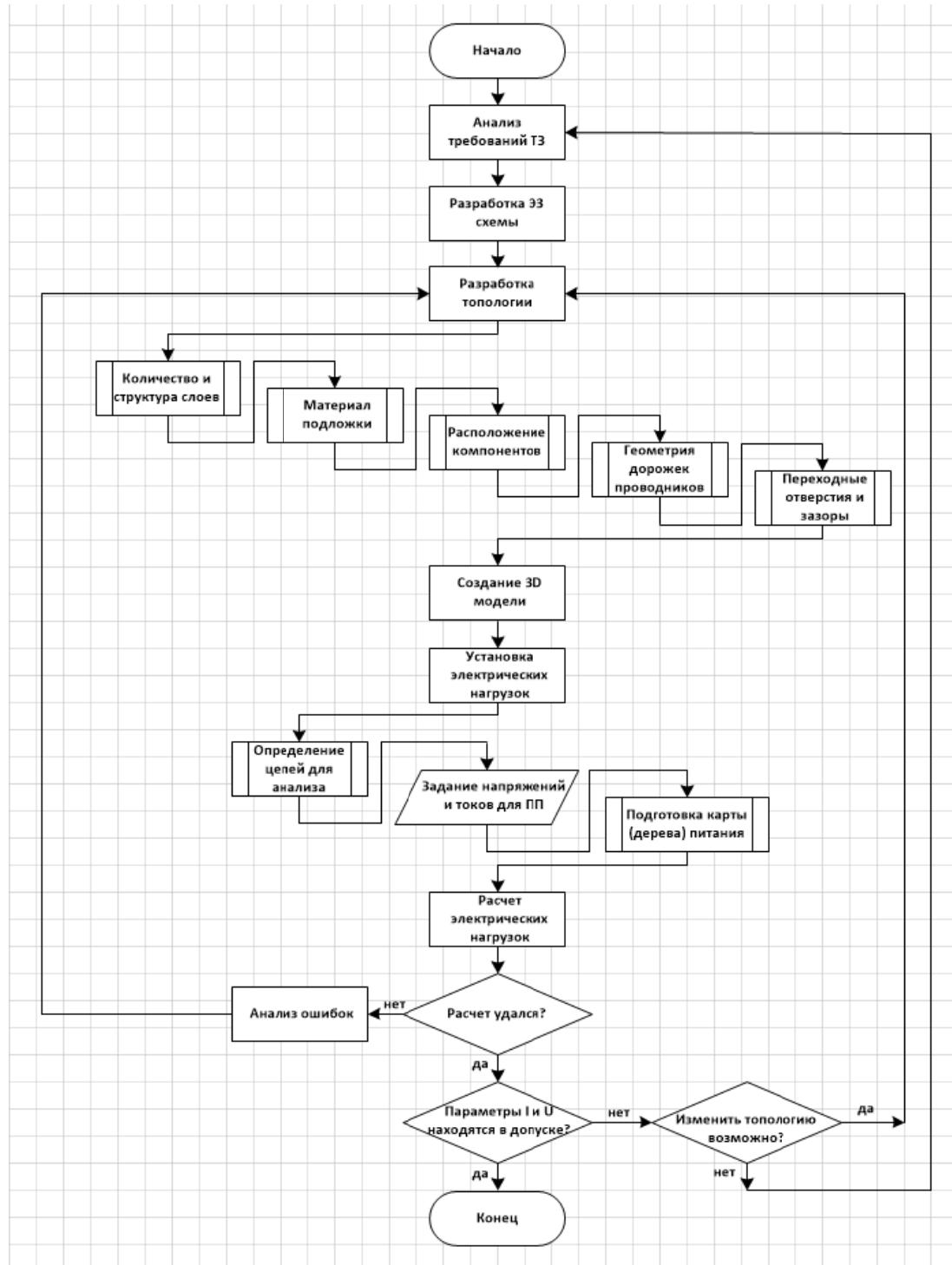


Рис. 2. Блок-схема алгоритма электрического анализа

Fig. 2. The block-diagram of the algorithm of electrical analysis

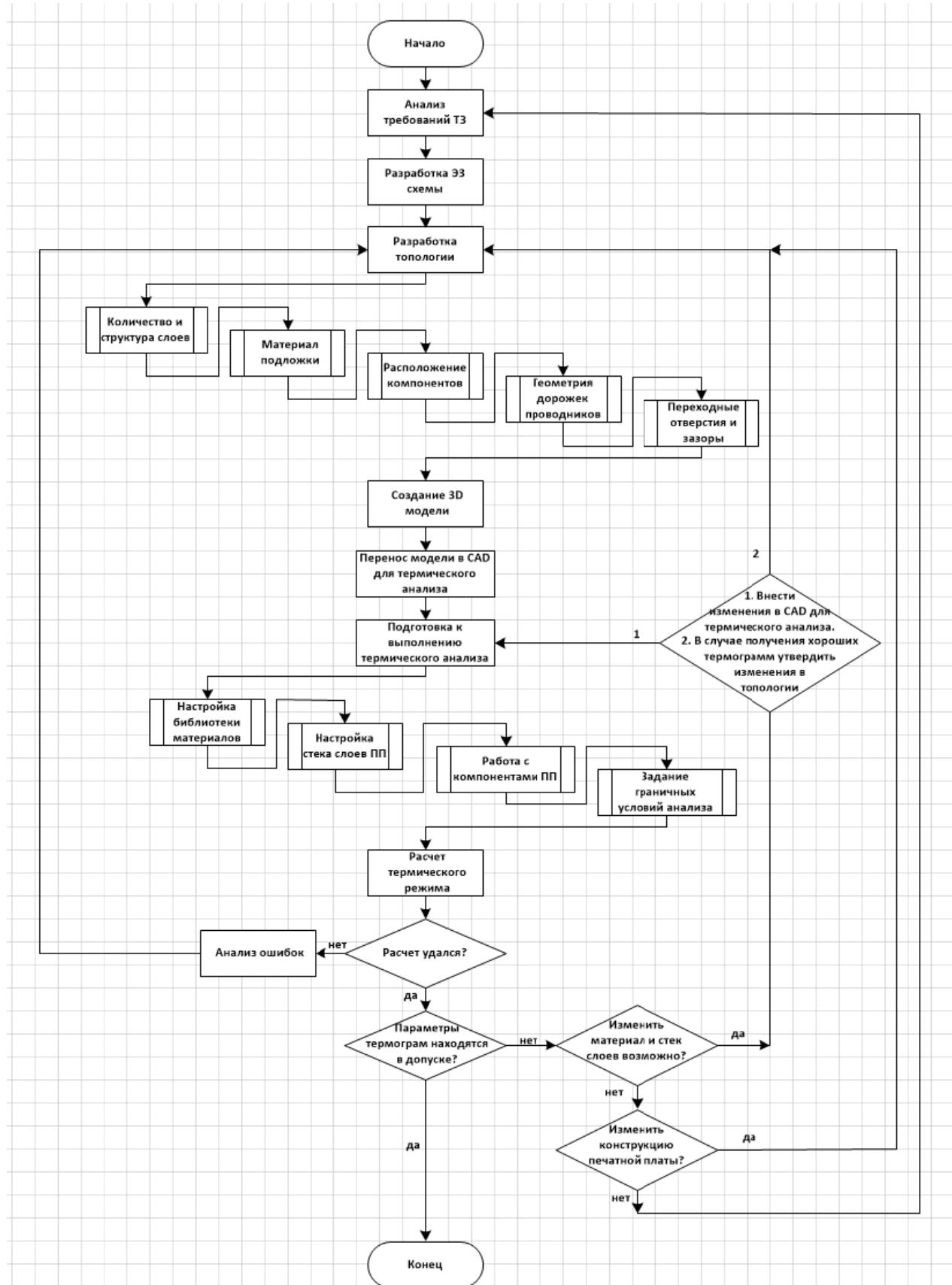


Рис. 3. Блок-схема алгоритма термического анализа

Fig. 3. The block-diagram of the algorithm of thermal analysis

На рисунке 2 представлен алгоритм электрического анализа. Этот анализ применяется к проводящим областям платы, обеспечивающим питание по постоянному току. Анализ выполняется в САПР Altium Designer с использованием двух пакетных расширений PDN Analyzer от CST и Power Analyzer от Keysight. С помощью данной методики можно выполнить анализ цепи питания, произвести оценку стабильности напряжения, оценить качество системы заземления и идентифицировать области с высокими возвратными токами, что может привести к помехам и нежелательному поведению. Обычно предполагается, что цепи питания и возвратных токов обладают нулевым сопротивлением, что не верно. При использовании относительно высоких токов даже небольшое сопротивление в цепях питания и возвратных токах может привести к значительному паразитному потреблению мощности и падению напряжения [17]. Результатом такого анализа является конструкция платы, обеспечивающая ЦП по постоянному току.

После того как создана топология и 3D-модель ПП, можно переходить к установке электрических нагрузок. На данном этапе важно найти и задать напряжения и токи для всей ПП. Процедура упрощения или локального исследования параметров приведет к неточным значениям распределения напряжения и токов для всего дерева питания ПП. Основными параметрами, по которым производится оценка и переход к выполнению термического анализа, являются: плотность тока, падение напряжения, плотность возвратных токов. Исследование плотности тока позволяет минимизировать риски возникновения джоулева нагрева в ПП. Высокие значения показателей плотности тока приводят к локальным перегревам, деградации меди как основного материала проводника, а также снижают срок службы пайки. Показатели падения напряжения являются индикатором электрических потерь, которые всегда переходят в тепловыделение. Вызывают логические сбои и нестабильность питания, перегрузку чувствительных узлов. Исследование плотности возвратных токов позволяет выявить локальные концентрации нагрева в плоскостях питания – земля, возможно разрушение диэлектрика при больших локальных нагрузках. Кроме теплового эффекта это еще и источник проблем по ЭМС.

К наиболее значимым параметрам, которые можно рассчитать в процессе выполнения анализа, стоит отнести плотность тока и падение напряжения.

Чтобы рассчитать упрощенно плотность тока в дорожке ПП, нужно учитывать следующие параметры:

- площадь поперечного сечения дорожки;
- ток, протекающий через нее;
- свойства материала.

Площадь поперечного сечения дорожки зависит от ее ширины и толщины:

$$S = Wt, \quad (1)$$

где  $S$  – поперечного сечения дорожки,  $\text{м}^2$ ;  $W$  – ширина дорожки,  $\text{м}$ ;  $t$  – толщина дорожки,  $\text{м}$ .

Плотность тока можно вычислить следующим образом:

$$J = \frac{I}{S}, \quad (2)$$

где  $J$  – плотность тока,  $\text{А}/\text{м}^2$ ;  $I$  – ток, который протекает через проводник,  $\text{А}$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ .

Согласно ГОСТ 53429–2009 допустимая токовая нагрузка на элементы проводящего рисунка для фольгированной меди составляют от 100 до  $250 \text{ А}/\text{мм}^2$  ( $100 \cdot 10^6 \dots 250 \cdot 10^6 \text{ А}/\text{м}^2$ ). Для гальванической меди – от 60 до  $100 \text{ А}/\text{мм}^2$  ( $60 \cdot 10^6 \dots 100 \cdot 10^6 \text{ А}/\text{м}^2$ ).

К дополнительным факторам учета относятся следующие параметры.

*Температурный коэффициент проводимости меди.* Плотность тока может влиять на нагрев дорожки (явление джоулева нагрева), так как сопротивление материала зависит от температуры.

Сопротивление меди можно рассчитать по формуле

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление меди,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ;  $L$  – длина проводника,  $\text{м}$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ .

Когда ток протекает через медь, она нагревается, и ее сопротивление увеличивается. Это происходит по следующей формуле для изменения сопротивления с учетом температурного коэффициента:

$$R_T = R_0 \left( 1 + \alpha (T - T_0) \right), \quad (4)$$

где  $R_T$  – сопротивление при температуре  $T$ ,  $\text{Ом}$ ;  $R_0$  – сопротивление при начальной температуре  $T_0$ ,  $\text{Ом}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления меди,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $T$  – температура, до которой нагревается медь.

*Длина дорожки.* Если нужно учитывать потерю напряжения и мощности вдоль всей дорожки.

*Распределение тока.* В реальных случаях плотность тока является неравномерной величиной по всей площади поперечного сечения, так как проводник имеет неровности и неоднородности в материале.

Таким образом, при слишком высоких плотностях тока происходит перегрев, что приводит к увеличению сопротивления меди, повреждению дорожек из-за перегрева, повышению других механических дефектов.

Для расчета падения напряжения воспользуемся следующей формулой:

$$\Delta V = IR, \quad (5)$$

где  $\Delta V$  – падение напряжения, В.

Подставив (1) в (3), а затем в (5), получим

$$\Delta V = IR = I\rho \frac{L}{S} = I\rho \frac{L}{Wt}. \quad (6)$$

Формула (6) описывает все факторы, влияющие на величину падения напряжения.

Решение о переходе на следующий шаг, а именно выполнение процедуры термического анализа, остается за лицом, принимающим решение (ЛПР).

На рисунке 3 представлен алгоритм термического анализа. Данный тип анализа применяется для оценки теплового режима электронных компонентов и печатной платы в целом. Анализ выполняется в САПР Altair Poll Ex. С помощью данной методики можно определить распределение температуры по плате, оценить эффективность теплоотвода и выявить зоны перегрева, способные привести к снижению надежности и отказам в работе ПП. На этапе переноса модели ПП из Altium Designer в Altair PollEx важно в процессе экспорта выполнить большую параметризацию модели ПП, которая задается в настройках файлов ODB++. Данное действие направлено на минимизацию погрешностей результатов моделирования и компенсирования работы алгоритмов САПР. После выполнения переноса модели выполняется процедура подготовки к выполнению термического анализа. В расчетах принимаются во внимание тепловые сопротивления материалов, мощность рассеивания элементов и условия теплообмена с окружающей средой. При высоких тепловых нагрузках даже незначительные недостатки в конструкции теплоотвода могут привести к существенному повышению температуры, что негативно скажется на работе ПП. Результатом

такого анализа является обоснованная конструктивная и технологическая доработка платы, направленная на предотвращение тепловых проблем и повышение надежности работы устройства. Основными параметрами, по которым производится оценка и завершение выполнения термического анализа, являются: максимальная температура компонентов (рекомендуется выдерживать запас в 10...20 °C от паспортных данных), зоны с большим температурным градиентом (допустимый градиент 2...3 °C/мм,  $\text{grad}T > 5$  °C/мм считается нежелательным). Регулярный перегрев ПП вызывает старение диэлектрика, приводит к усталости меди и переходных отверстий, деградации паяных соединений.

Среди наиболее значимых параметров, которые можно рассчитать в процессе анализа, стоит отметить максимальную температуру компонентов, температурное распределение по поверхности платы.

Максимальная температура компонентов ПП рассчитывается по формуле

$$T_{\max} = T_{\text{окр}} + PR_0, \quad (7)$$

где  $T_{\max}$  – максимальная температура компонента, °C;  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды, °C;  $P$  – мощность тепловыделения компонента, Вт;  $R_0$  – суммарное тепловое сопротивление «компонент – плата – окружение», °C/Вт.

Температурное распределение для стационарного режима не зависит от времени. Используется уравнение Пуассона

$$\nabla(k\nabla T) + q = 0, \quad (8)$$

где  $\nabla$  – оператор дивергенции (векторный поток тепла);  $k$  – теплопроводность материала, Вт/м К;  $\nabla T$  – градиент температуры;  $q$  – удельная мощность тепловых источников, Вт/м<sup>3</sup>.

Температурное распределение для нестационарного режима меняется с течением времени как

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + q, \quad (9)$$

где  $\frac{\partial T}{\partial t}$  – производная температуры по времени, °C/с;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – удельная теплоемкость, Дж/кг К.

### Исходные данные

В качестве объекта проектирования и исследования рассматривается ПП приемовозбудителя, обеспечивающая прием и передачу сигнала

в диапазоне частот 30...520 МГц с выходной мощностью 5 Вт, в качестве готового изделия блока приемопередатчика к портативной радиостанции и в качестве субблока в исполнении стационарной и автомобильных радиостанций.

(применен принцип унификации изделия). На рисунке 4 представлена структурная схема приемовозбудителя [18, 19]. Приемник и передатчик выполнены по схеме супергетеродина с двойным преобразованием частоты [20–22].

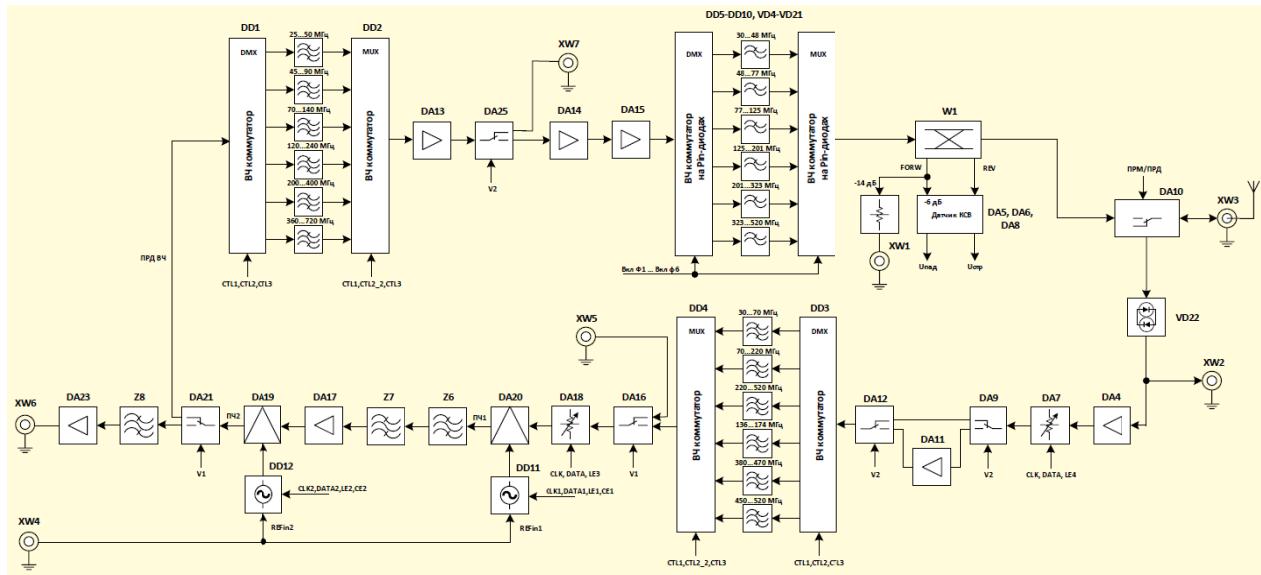


Рис. 4. Структурная схема приемовозбудителя с двойным преобразованием частоты

Fig. 4. The block diagram of a receiver exciter with double frequency conversion

Входной сигнал с антенного разъема XW3 проходит через коммутатор DA10, разделяющий передающую и приемную части и ограничительный диод VD22, малошумящий усилитель (МШУ) DA4, далее идет узел входного преселектора (образован аттенюатором DA7, МШУ DA11, высокочастотными (ВЧ) ключами DA9, DA12, блоком переключаемых полосовых фильтров (ПФ) с ВЧ-ключами DD3–DD4). Преселектор обеспечивает предварительное усиление слабых сигналов и подавление побочных (зеркальных) каналов приема в широком диапазоне частот. Преселектор предназначен для повышения отношения сигнал/шум за счет подавления внеполосных помех, что способствует достижению требуемой чувствительности приемника.

Затем через ВЧ-ключ DA16 сигнал поступает на первый тракт промежуточной частоты (ПЧ1), который образован аттенюатором DA18, смесителем DA20, гетеродином DD11, блоком фильтров Z6–Z7 и МШУ ПЧ1DA17. Тракт ПЧ1 предназначен для переноса спектра сигнала на более высокую частоту. Также тракт ПЧ1 обеспечивает избирательность по второму зеркальному каналу и в определенной степени подавление сигналов соседнего канала.

Далее идет второй тракт ПЧ2, который образован смесителем DA19, гетеродином DD12, ПФ

Z8 и МШУ ПЧ2 DA23, поступая на вход XW6 платы цифровой обработки сигналов (ЦОС). Тракт ПЧ2 обеспечивает избирательность по соседнему каналу. Также в тракте ПЧ2 происходит усиление сигнала до уровня, удовлетворяющего нормальной работе демодулятора.

Верху структурной схемы изображен передающий тракт. Он состоит из двух каскадов фильтров, один из которых применяется до усилителей мощности и образован ВЧ-ключами DD1-DD2. Размещение ПФ перед усилителями мощности (УМ) позволяет подавить значительную часть шумов и помех до их усиления, обеспечивая более чистое усиление полезного сигнала.

Далее ВЧ-сигнал поступает на вход усилителя мощности, состоящий из трех каскадов усиления DA13–DA15, что позволяет достичь большего коэффициента усиления и развязать каскады по питанию. Второй каскад фильтров построен на ФНЧ и образован ВЧ-ключами DD5–DD10 и PIN-диодами VD4–VD21. Размещение фильтров после УМ способствует подавлению гармоник, снижая спектральные искажения. До поступления на антенный разъем XW3 выходной сигнал проходит через направленный ответвитель W1, в котором часть мощности передаваемого выходного сигнала снимается и используется в системе линеаризации работы передатчика [23, 24].

Печатная плата (ПП) является ортотропной деталью и состоит из нескольких слоев (диэлектрики и медная фольга). Стек слоев ПП представлен на рисунке 5.

Внешний вид ПП приемовозбудителя представлен на рисунке 6. Для работы платы требуется напряжения трех уровней: 3,3, 8 и 28 В.

Layer Stack					
Layer Stack					
No.	Name	Type	Thickness (mm)	Conductor Material	Dielectric Material
1	TOP_LAYER	Signal	0.03500	COPPER	AIR
	Dielectric Layer	Dielectric	0.20300	FR4	
2	MID-LAYER_1	Signal	0.01800	COPPER	FR4
	Dielectric Layer	Dielectric	0.60500	FR4	
3	MID-LAYER_2	Signal	0.01800	COPPER	FR4
	Dielectric Layer	Dielectric	0.20300	FR4	
4	BOTTOM_LAYER	Signal	0.03500	COPPER	AIR

Рис. 5. Стек слоев печатной платы до внесения изменений

Fig. 5. The layer stack of the printed circuit board layers before making changes

### Исследование печатного узла по методике электрического анализа

В настоящей работе исследование ПП приемовозбудителя по методике электрического анализа проводилось с помощью системы автоматизированного проектирования Altium Designer и двух пакетных расширений – PDN Analyzer от CST и Power Analyzer от Keysight.

Когда сформирован стек слоев, выполнена трассировка ПП, можно приступить к настройке симуляции для анализа, задав при этом номинальные уровни напряжения/тока и допуски для каждой цепи печатной платы согласно блок-схеме алгоритма на рисунке 2. В таблице 2 перечислены все элементы, подвергаемые анализу с указанием рабочего напряжения и потребляемого тока (для источников указано входное напряжение и расчетный ток). Для составления полной карты питания ПП рекомендуется определить тип элемента. Это может быть либо источник, либо нагрузка. В случае регуляторов напряжения они могут одновременно являться нагрузкой и служить источниками для других нагрузочных элементов.

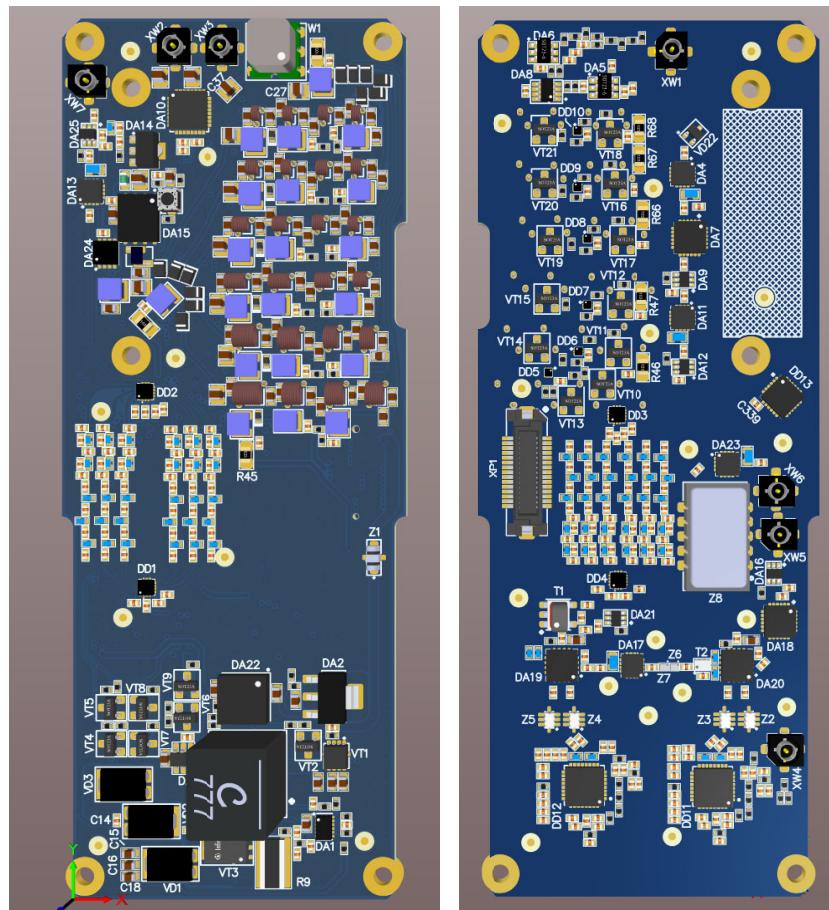


Рис. 6. 3D-модель печатной платы: вид слева – top side, справа – bottom side

Fig. 6. The 3D model of the printed circuit board: view on the left - top side, on the right - bottom side

Таблица 2. Перечень элементов для электрического анализа

Table 2. List of elements for electrical analysis

Источник – нагрузка	Линия	Поз. обозначения	Наименование	Потребление	
				<i>U</i> , В	<i>I</i> , мА
H	3,3V	DD13	MCP23S18T расширитель портов	3,3	1
H	3,3V1	DA10	PE42820 ключ	3,3	1
H		DD11	ADF4351BCPZ синтезатор	3,3	80
H		DD12	ADF4351BCPZ синтезатор	3,3	80
H		DA16	PE42359 ключ	3,3	1
H		DA18	PE43711B-Z аттенюатор	3,3	1
H		DA19	LTC5510IUF смеситель	3,3	94
H		DA17	TQP3M9018 усилитель	3,3	100
H		DA20	LTC5510IUF смеситель	3,3	94
H		DA21	PE42359 ключ	3,3	1
				<b>Сумма</b>	<b>452</b>
H	3,3V_PRM	DA4	TQP3M9018 усилитель	3,3	100
H		DA7	PE43711B-Z аттенюатор	3,3	1
H		DA9	PE42359 ключ	3,3	1
H		DA11	TQP3M9018 усилитель	3,3	100
H		DA12	PE42359 ключ	3,3	1
H		DD3	RFSW6062 ключ	3,3	1,5
H		DD4	RFSW6062 ключ	3,3	1,5
H		DA23	TQP3M9018 усилитель	3,3	100
				<b>Сумма</b>	<b>306</b>
H	3,3V_PRD	DA3	LT1985-5 напряжение смещения	3,3	
H		DA5	AD8361ART РЧ-детектор	3,3	3
H		DA6	AD8361ART РЧ-детектор	3,3	3
H		DA8	OPA2810 ОУ	3,3	
H		DA13	TQP3M9018 усилитель	3,3	100
H		DA25	PE42359 ключ	3,3	1
H		DA24	TC72-3.3 датчик температуры	3,3	4
H		DD1	RFSW6062 ключ	3,3	1,5
H		DD2	RFSW6062 ключ	3,3	1,5
H		DD5–DD10	NC7WZ14FHX ЛИ	3,3	1
				<b>Сумма</b>	<b>114</b>
И/Н	Upit	DA22	LTM8083, DC/DC	8,0	330
И/Н		DA1	LM5156, DC/DC	8,0	1500
И/Н		DA2	LM317AEMP/NOPB	8,0	300
H	8V	DA14	PHA-13HLN+ усилитель	8,0	300
H	28V	DA15	NPA1006усилитель	28	570

\* – ток для источника указан расчетный.

Предложенная для анализа ПП работает в двух основных режимах – прием (ПРМ) и передача (ПРД) сигнала.

На рисунке 7 представлены общие карты питания.

На рисунке 8 представлены локальная карта питания для цепи Upit в режиме ПРД.

Так, например, в режиме ПРД напряжение питания (цепь Upit) подается на разъем XP1 ПП, проходит через электромагнитный фильтр Z1 и попадает на три преобразователя питания (один линейный и два импульсных). В данном случае источники питания (ИП) являются нагрузкой для линии Upit.

Сами по себе ИП не могут потреблять значительного тока, поэтому ток складывается из источников нагрузок для этих преобразователей. Напряжение по линии питания Upit находится в пределах 6,5...8,0 В. Для моделирования использовалось значение 8,0 В. Микросхема DA2 преобразовывает 8 В в 3,3 В, DA22 преобразовывает 8 В в 8 В и DA1 – 8 В в 28 В. Причем сама микросхема DA1 запитана через проходной элемент в виде транзисторного ключа VT1 (цепь NetC1\_2), а преобразованное напряжение снимается в точке соединения дросселя L1 и стока транзистора VT3 (цепь NetC10\_1).

Режим ПРМ будем считать стационарным. В готовом изделии станция в режиме ПРМ может находиться десятки минут. Режим ПРД можно охарактеризовать как нестационарный, поскольку часть выходных усилителей работает

в импульсном режиме и включаются не более чем на 30 сек.

На рисунке 9 представлено распределение напряжения и плотности тока в режиме ПРМ для линии 3,3 В.

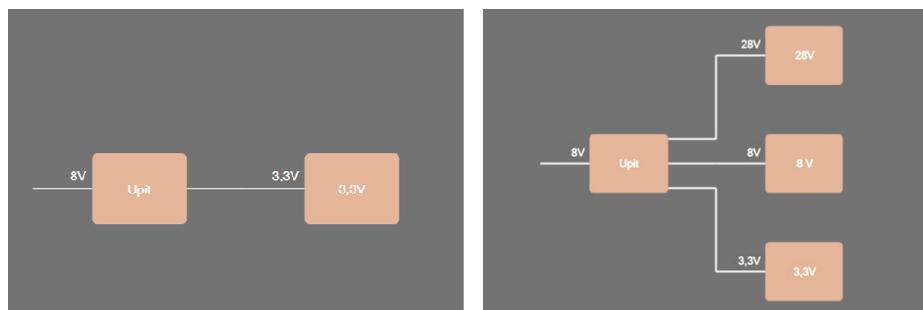


Рис. 7. Карта (дерево) питания: вид слева – режим ПРМ, справа – ПРД

Fig. 7. The power supply map (tree): view on the left - PRM mode, on the right - PRD

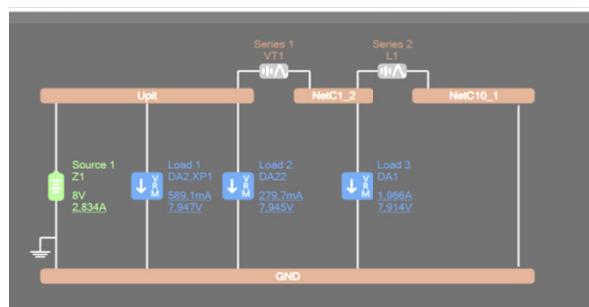


Рис. 8. Локальная карта питания цепи Upit в режиме ПРД

Fig. 8. The local power supply card of the Upit circuit in the PRD mode

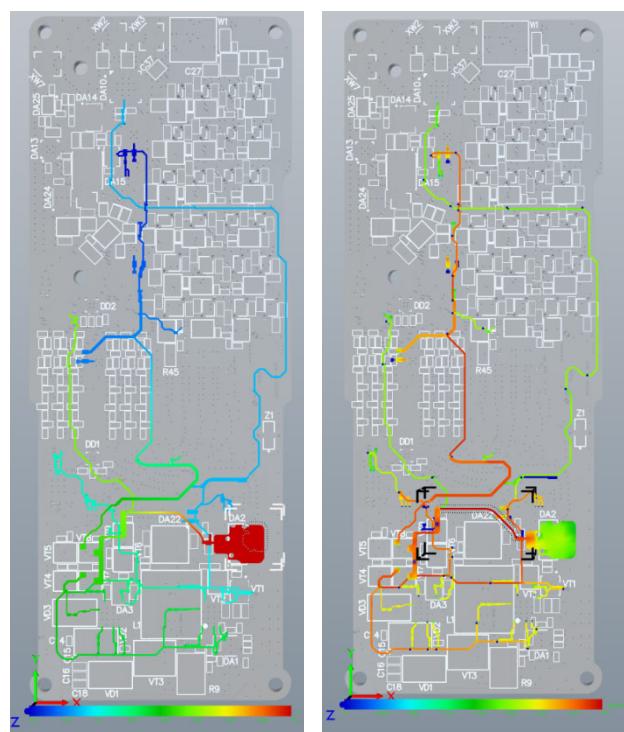


Рис. 9. Распределение напряжения (слева) и плотности тока (справа)

Fig. 9. The distribution of voltage (left) and current density (right)

График распределения напряжения показывает, что падение напряжения на ПП приемо-воздушителя в цепи 3,3 В составляет 0,13 В. Допуски по отклонению напряжений питания стоит смотреть в техническом паспорте на микросхему, на основе чего формируется представление о максимально возможном  $\Delta V$ . Практическая рекомендация авторов – обеспечить  $\Delta V \leq 5\%$  от номинала питания для любых линий и  $\Delta V \leq 2\%$  для критических шин (микросхемы CPU, FPGA). Область, выделенная красным цветом, соответствует начальной точке распространения 3,3 В на плате,  $U = 3,3$  В. Чем дальше от начальной точки, тем больше становится  $\Delta V$ .  $\Delta V$  достигает максимального значения в слое BOT на участках питания микросхем DA4 и DA7. График распределения плотности тока указывает, что ПП имеет две области с повышенной плотностью: к ним относится начальный участок зоны питания 3,3 В линии до транзисторных ключей и участок линии 3,3 V1 на входе транзисторного ключа, образованного VT4 и VT7.

Области с повышенной плотностью тока отмечены на рисунке 10 и находятся в средних слоях ПП (MIDLAYER1 и MIDLAYER2). Максимальная плотность тока для данного участка цепи составляет 141 А/мм<sup>2</sup>, что не превышает требований. Согласно ГОСТ 53429–2009 допустимая токовая нагрузка на элементы проводящего рисунка для фольгированной меди составляет от 100 до 250 А/мм<sup>2</sup>. Однако данные значения справедливы для силовой техники, где протекают большие электрические токи и мощности. При разработке портативных носимых устройств не рекомендуется превышать значение 80...100 А/мм<sup>2</sup>.

С помощью PDNAlyzer проанализируем ПП на предмет возникновения петлевого заземления или другие проблемы с шумом. На ри-

сунке 11 показано распределение напряжения и плотности тока в плоскости заземления ПП для режима ПРД.

Если взглянуть на шкалу напряжений в нижней части, можно увидеть, что разность напряжений в пределах плоскости заземления составляет 2,8 мВ, а плотность возвратных токов не превышает 39,9 А/мм<sup>2</sup>. Это достаточно низкие показатели, которые не вызовут возникновения петлевого заземления или существенных проблем с шумом. Токи равномерно распределены по плоскости заземления, отсутствуют ярко выраженные зоны. При разработке портативных носимых устройств  $J_b$  не должна превышать значений 60...80 А/мм<sup>2</sup>.

В таблице 3 представлены результаты анализа, выполненного в программных средах PDN Analyzer от CST и Power Analyzer от Keysight.

Данные, полученные в двух разных программных средах, коррелируют между собой. В процессе анализа удалось выяснить, что топология ПП требует доработки, в частности, избыточная плотность для цепей линий, запитанных от 3,3 В, как для режима ПРМ, так и для режима ПРД. Изменение толщины средних слоев ПП (MID LAYER1 и MID LAYER2) с 0,018 до 0,035 мм позволяет снизить плотность тока в 2 раза. Данное действие приведет к тому, что все критерии оценки будут выполнены. В противном случае, если оставить все как есть, в реальном объекте можно столкнуться с тем, что дорожка ПП будет являться источником тепла (явление джоулева нагрева). Для проводника печатной платы (например, медной дорожки) джоулев нагрев рассчитывается по формуле

$$Q = I^2 R t, \quad (10)$$

где  $Q$  – количество выделенного тепла, Дж;  $t$  – время протекания тока, сек.

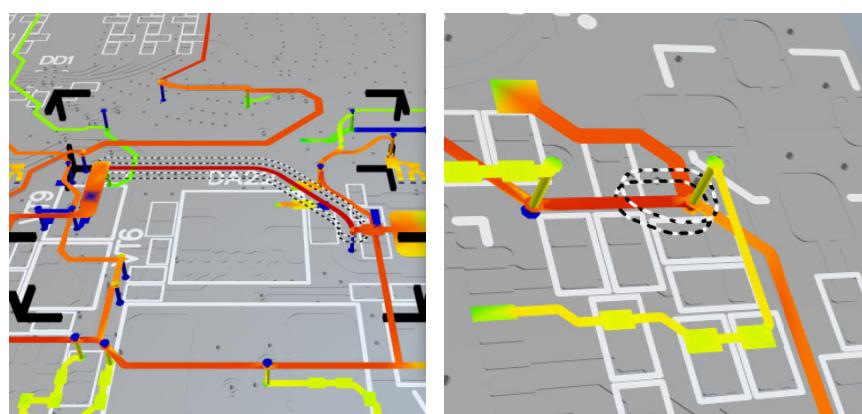


Рис. 10. Области с повышенной плотностью тока

Fig. 10. The areas with increased current density

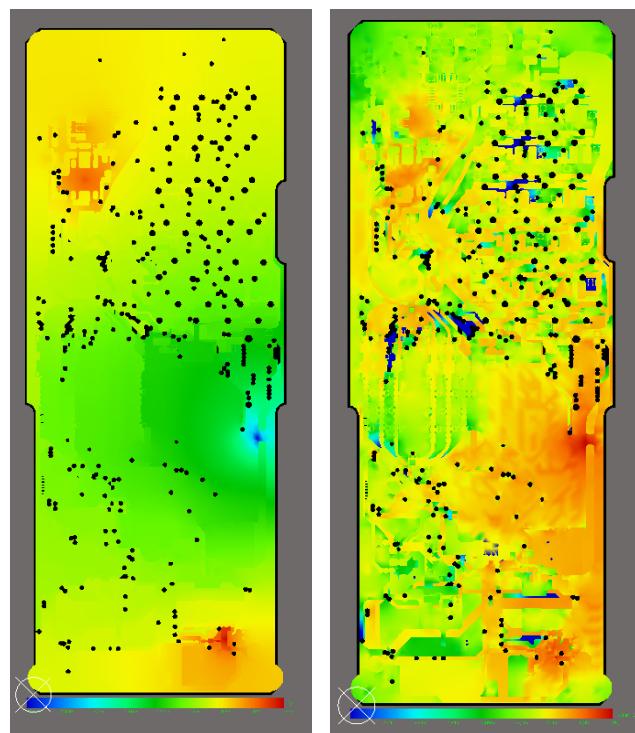


Рис. 11. Распределение напряжения (слева) и плотности тока (справа) в плоскости заземления

Fig. 11. The distribution of voltage (left) and current density (right) in the ground plane

Таблица 3. Результаты, полученные по методике электрического анализа

Table 3. The results obtained by the electrical analysis method

Режим работы	Цель питания	Плотность тока, $J, \text{А/мм}^2$	Падение напряжения, $\Delta V, \text{В}$	Плотность возвратных токов, $J_b, \text{А/мм}^2$
ПРМ	Upit	48,7 / 53,1	0,02 / 0,02	16,1 / –
	3.3V	141 / 138	0,13 / 0,11	
ПРД	Upit	93,8 / 94,2	0,07	39,9 / –
	3.3V	109 / 110	0,09 / 0,07	
	8V	27,8 / 28,2	0,05 / 0,04	
	28V	50,6 / 49,7	0,1 / 0,06	

\* – значения, указанные через дробь: получены в PDN Analyzer от CST / получены в Power Analyzer от Keysight

Подставив (3) в (10), получим

$$Q = I^2 \left( \rho \frac{L}{S} \right) t. \quad (11)$$

#### Исследование печатного узла по методике термического анализа

В настоящей работе исследование ПП приемовозбудителя по методике термического анализа проводилось с помощью системы автоматизированного проектирования Altair Pollex. Расчеты проводились методами эквивалентных тепловых полей (TNM) и упрощенных методов конечных разностей (FDM).

Когда сформирован стек слоев, выполнена трассировка ПП и проведен электрический анализ, можно приступить к переносу модели в CAD для выполнения термического анализа

согласно блок-схеме алгоритма рисунка 3. Перенос модели осуществляется путем экспорта через файлы ODB++. Для ПП приемовозбудителя получилось 95774 элементов. Экспорт модели платы выполнен с учетом полной металлизации и структуры слоев.

Чтобы получить температурное распределение по объему ПП, пользователю необходимо знать и уметь работать:

- с библиотекой материалов;
- стеком слоев;
- компонентами ПП;
- граничными условиями анализа.

Материалы слоев ПП приемовозбудителя, их основные параметры приведены на рисунке 12. Первоначальный стек слоев представлен на рисунке 5. В итоговом варианте изменена толщина средних слоев MID LAYER1 и MID LAYER2

с 0,018 до 0,035 мм соответственно на основе проведенного электрического анализа. Подсчет процентного соотношения меди на каждом слое в Pollex Thermal производится автоматически.

В таблице 4 перечислены все элементы, подвергаемые анализу, с указанием всех параметров, необходимых для расчета. При анализе не учитывались компоненты, рассеиваемая мощность которых составляла менее 100 мВт.

Materials										
Name	Type	Frequency (MHz)	Dielectric Constant	Loss Tangent	Electric Resistivity (Ohm.m)	Relative Magnetic Permeability	Thermal Conductivity X (W/m.K)	Thermal Conductivity Y (W/m.K)	Thermal Conductivity Z (W/m.K)	
AIR	Dielectric	0.00000	1.00000	0.00000			0.02650	0.02650	0.02650	
ALLOY42	Conductor	0.00000			6e-07	1.00000	12.50000	12.50000	12.50000	
ALUMINA94%	Dielectric	0.00000	9.00000	0.00500			18.00000	18.00000		
ALUMINA96%	Dielectric	0.00000	9.00000	0.00500			35.00000	35.00000	29.40000	
ALUMINUM-0TMR	Conductor	0.00000			2.73e-08	1.00000	216.30000	216.30000	221.80000	
ALUMINUM-6061T6	Conductor	0.00000			2.73e-08	1.00000	155.00000	155.00000	167.00000	
ALUMINUM-NITRIDE	Dielectric	0.00000	8.30000	0.00500			170.00000	170.00000	170.00000	
BERYLIA	Dielectric	0.00000	6.80000	0.00100			155.71000	155.71000	155.71000	
COPPER	Conductor	0.00000			1.678e-08	1.00000	370.00000	370.00000	394.00000	
FR4	Dielectric	0.00000	4.50000	0.02000			0.35000	0.35000	0.35000	
GLASS-EPOXY	Dielectric	0.00000	4.30000	0.00500			0.26000	0.26000	0.26000	
Gold	Conductor	0.00000			2.25e-08	1.00000	202.20000	202.20000	202.20000	

Рис. 12. Материалы слоев печатной платы

Fig. 12. The materials of the printed circuit board layers

Таблица 4. Перечень элементов для анализа

Table 4. List of elements for thermal analysis

Линия	Позиция обозначения	Функциональное назначение	Максимальная рассеиваемая мощность, Вт	Температура, °C		Корпус		
				мин.	макс.	Размеры, мм	Тип	Контактная площадка, мм
3,3V	DD13	расширитель портов	0,7	-45	+125	4×4×0,9	QFN	0,25×0,2
	VT7–VT9	транзистор	1,3	-55	+150	2,9×2,4×1	SOT23	0,55×0,5
3,3V1	DA10	ключ (MUX/DEMUX)	10	-40	+85	5×5×0,9	QFN	0,25×0,2
	DD11, DD12	синтезатор	1	-40	+85	5,1×5,1×0,8	LFCSP	0,25×0,2
	DA16, DA21	ключ (MUX/DEMUX)	0,2	-40	+105	2,1×2,1×0,9	SC-70	0,5×0,21
	DA18	аттенюатор	1	-40	+105	4×4×0,9	QFN	0,3×0,2
	DA19, DA20	смеситель	0,35	-40	+105	4×4×0,8	QFN	0,3×0,2
	DA17	усилитель	0,7	-40	+105	3×3×0,9	QFN	0,3×0,25
3,3V_PRM	DA4, DA11, DA23	усилитель	0,7	-40	+105	3×3×0,9	QFN	0,3×0,25
	DA7	аттенюатор	1	-40	+105	4×4×0,9	QFN	0,3×0,2
	DA9, DA12	ключ (MUX/DEMUX)	0,2	-40	+105	2,1×2,1×0,9	SC-70	0,5×0,21
	DD3, DD4	ключ (MUX/DEMUX)	0,5	-40	+85	2×2×0,6	QFN	0,3×0,15
3,3V_PRD	DA3	преобразователь напряжения	1,8	-40	+125	6,7×6,7×1,7	SOT223	1,5×0,84
	DA5, DA6	РЧ-детектор	0,17	-40	+85	2,9×2,8×1,45	6-SOT23	0,6×0,22
	DA8	ОУ	0,4	-40	+125	3×3×0,9	8-SOT23	0,6×0,15
	DA13	усилитель	0,7	-40	+105	3×3×0,9	QFN	0,3×0,25
	DA25	ключ (MUX/DEMUX)	0,2	-40	+105	2,1×2,1×0,9	SC-70	0,5×0,21
	DA24	датчик температуры	0,25	-55	+125	3×3×0,9	DFN	0,3×0,2

Окончание табл. 4  
Table 4 (continued)

Линия	Позиция обозначения	Функциональное назначение	Максимальная рассеиваемая мощность, Вт	Температура, °C		Корпус		
				мин.	макс.	Размеры, мм	Тип	Контактная площадка, мм
	DD1, DD2	ключ (MUX/DEMUX)	0,5	-40	+85	2×2×0,6	QFN	0,3×0,15
	DD5–DD10	ключ	,13	-40	+85	1,45×1×0,6	MicroPak	0,3×0,05
Upit	DA22	преобразователь напряжения	0,5	-40	+125	6,25×6,25×2,22	BGA	0,5×0,5
	VT1	транзисторный ключ	3,7	-55	+150	3,3×3,3×1	1212-8	1×0,25
8V	DA14	усилитель	3,3	-40	+95	4,6×4,25×1,6	SOT-89	1,04×0,44
28V	DA15	усилитель	10	-40	+95	6×5×0,9	PDFN	0,77×0,2
	VT10–VT21	транзисторные ключи	0,265	-55	+150	2,9×2,4×1	SOT23	0,55×0,5
	VT3	транзисторный ключ	5,0	-55	+175	6,2×5,2×1	TDSO-8	1×0,25

Перед запуском термического анализа необходимо также задать граничные условия, среди которых:

- направление силы тяжести Z (имитация того, что ПП лежит на столе, слой TOP сверху);
- температура окружающей среды 26 °C;
- конвекция естественная;
- материал клея компаунда loctite 3609;
- материал теплопроводящей площадки медь (используется в слое BOT под выходными усилителями DA14, DA15) и др.

Для проверки релевантности результатов расчета было проведено экспериментальное измерение нагрева компонентов ПП приемовозбудителя. Измерено температурное распределение на поверхности ПП экспериментального образца ПП с помощью тепловизора HtiHTA2. Проверка устройства проводилась на рабочем месте, схема которого приведена на рисунке 13. Эксперимент выполнен в нормальных климатических условиях и при номинальных напряжениях электропитания:

- температура воздуха +25...+27 °C;
- относительная влажность воздуха 45...75 %;
- атмосферное давление  $8,6 \cdot 104 \dots 10,6 \cdot 104$  Па (645...795 мм рт. ст.);
- напряжение электропитания сети переменного тока 220 В / 50 Гц.

По результатам анализа модели ПП на нагрев в режиме ПРД получена картина температурного распределения, представленная на рисунке 14 для слоя TOP и на рисунке 15 для слоя BOT. Слева указаны термограммы, полученные с по-

мощью тепловизора HtiHTA2, справа – в САПР Altair Pollex.

Для рисунка 15 в случае экспериментальной модели приведена проекция платы снизу. Часть ПП слева закрыта технологическим кабелем, по которому осуществляется управление ПП через технологическую программу с ПЭВМ.

Показания самых горячих узлов сведены в таблицу 5.

Самыми горячими компонентами на ПП оказался выходной усилитель DA15 и ключ DA10. Запас по температуре для них обеспечен на уровне 18 и 21 °C от паспортных данных. Зоны с резким температурным градиентом отсутствуют, в среднем для ПП градиент температуры составил 2,4 °C/мм. Условия критериев оценки выполняются. Анализ результатов полученных термограмм показал, что средневзвешенная разница температур между экспериментом и расчетом составила 2,4 % для слоя TOP и 5,9 % для слоя BOT, обеспечивая общую погрешность на уровне 4,2 %. Сопоставление полученных термограмм показало релевантность результатов.

Моделирование ПП с толщиной средних слоев в MID LAYER1 и MID LAYER2 на уровне 0,018 мм показало, что максимальная температура увеличится на 6 °C и составит 83,4 °C, однако в этом случае не учитывается джоулев нагрев, вызванный высокой плотностью тока по линии 3,3 В. Он приведет к увеличению нагрева и перераспределению тепла в нижней части ПП, ввиду чего термический анализ, выполненный с толщиной средних слоев 0,018 мм, можно считать некомплексным.

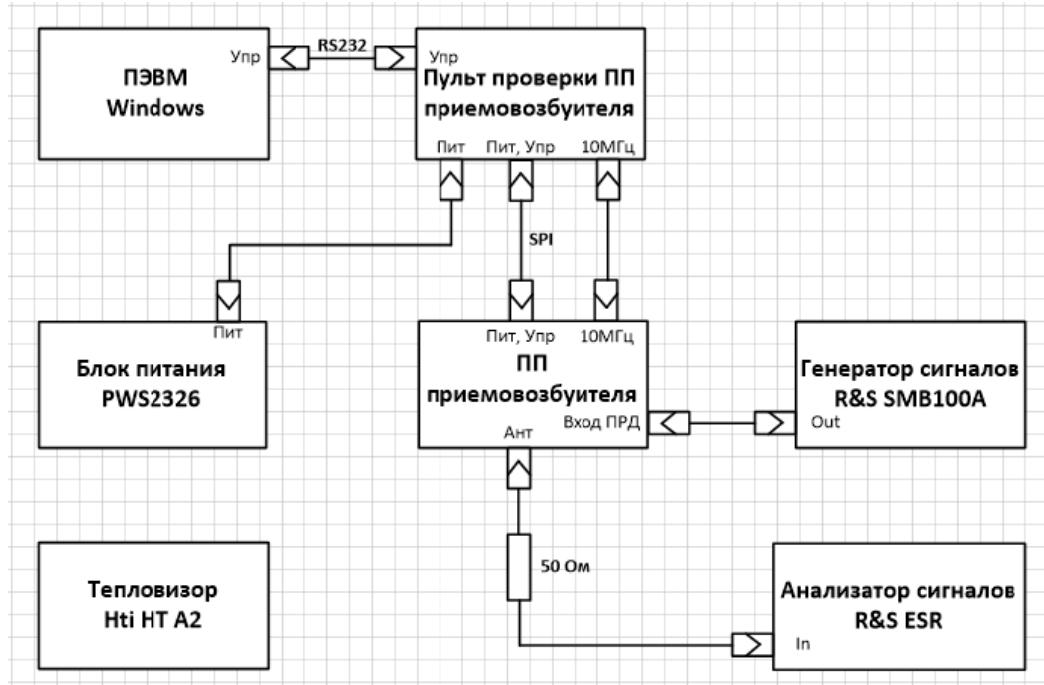


Рис. 13. Схема проверки температурного распределения на ПП в режиме ПРД

Fig. 13. The scheme of checking the temperature distribution on PCB in the PRD mode

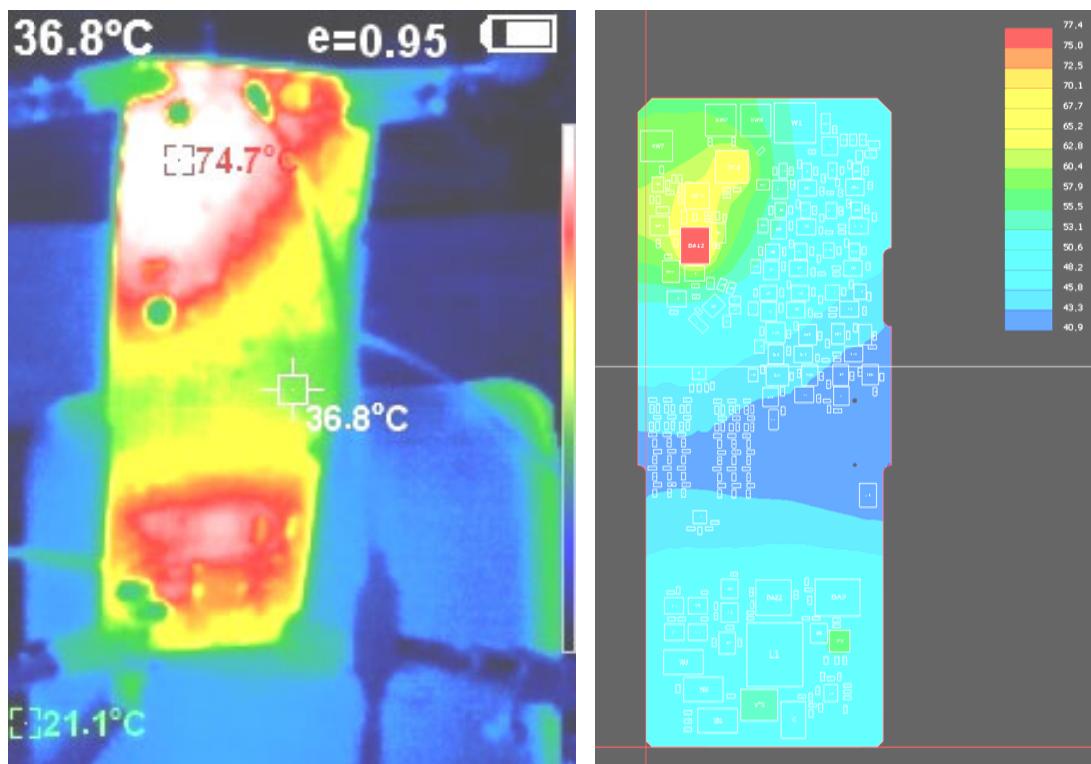


Рис. 14. Распределение температуры по объему ПП в экспериментальной (слева) и расчетной (справа) моделях, слой ТОР

Fig. 14. The temperature distribution over the volume of the PCB in the experimental (left) and computational (right) models, TOP layer

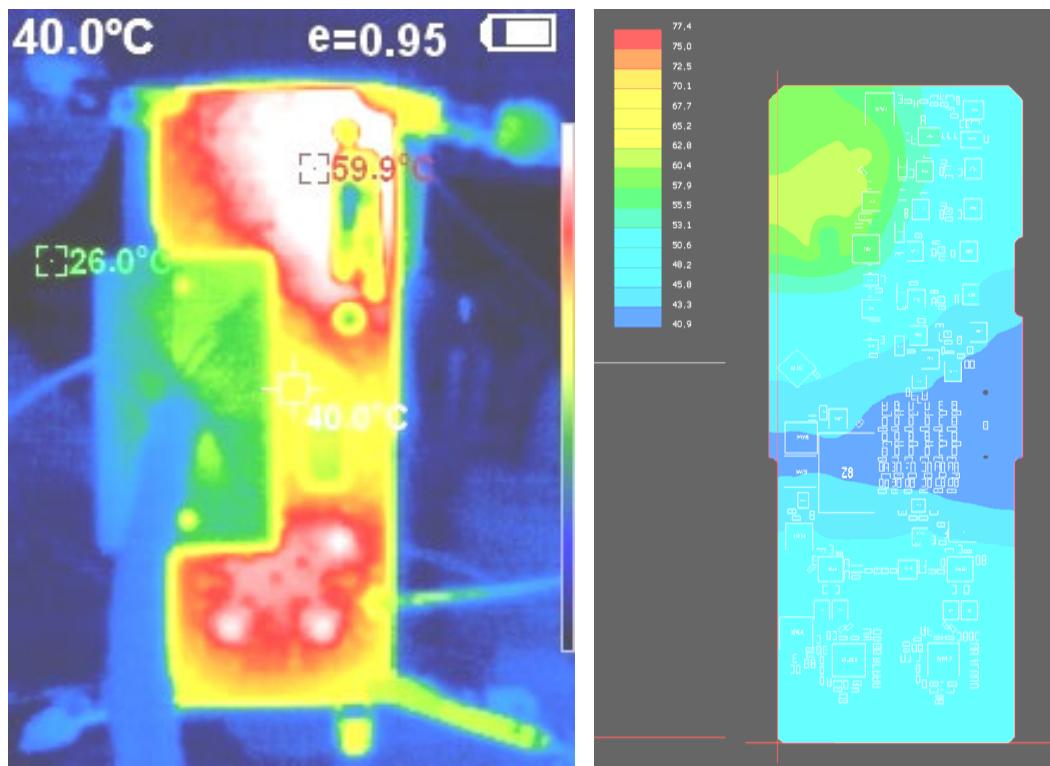


Рис. 15. Распределение температуры по объему ПП в экспериментальной (слева) и расчетной (справа) моделях, слой ВОТ

Fig. 15. The temperature distribution over the volume of the PCB in the experimental (left) and computational (right) models, BOT layer

Таблица 5. Результаты, полученные по методике термического анализа

Table 5. The results obtained by the thermal analysis method

Слой	Компонент на плате	Температура экспериментальная, °C	Температура расчетная, °C
TOP	DA14	71,9	70,1
	DA15	74,7	77,4
	DA10	65,0	64,0
	DA22	44,9	50,6
	VT1	56,1	57,9
	VT3	54,2	55,5
BOT	Зона теплоотвода	59,9 / 40,0*	62,8
	DA20	48,6	47,8
	DD11	46,5	48,9
	DD12	46,0	53,4

\* – на зеркальной поверхности теплоотвода тепловизор показывает меньшую температуру.

## Выводы

Разработана и описана методика диагностирования печатных плат аппаратуры связи методом электрического и термического анализа. Комбинирование методов анализа позволяет повысить точность расчета. Методика подразумевает проверку распределений напряжений и токов в цепях питания, а также выявление зон локального перегрева и соответствия теплового режима нормативным требованиям. Ее применение целесообразно при проектировании и ве-

рификации сложных ПП до момента изготовления прототипа. Методика особенно эффективна при работе с многослойными жесткими и гибкожесткими высокоплотными ПП. Максимальное количество сигнальных слоев не может превышать 32. При анализе простых ПП целесообразнее применить другие методы диагностирования. Предлагаемая методика показала высокую эффективность, была опробована на нескольких функциональных видах ПП. Предложенные критерии оценки методики позволя-

ют минимизировать время регулировки реальных изготовленных изделий.

По результатам электрического анализа на основе критериев оценки выявлены проблемные участки, требующие корректировки топологии, в частности, завышенная плотность тока для участка цепи линии 3,3 В, которая составила  $141 \text{ A/mm}^2$  в режиме ПРМ и  $110 \text{ A/mm}^2$  в режиме ПРД. В результате отредактирован стек ПП. Изменение толщины средних слоев ПП (MID LAYER1 и MID LAYER2) с 0,018 до 0,035 мм позволило снизить плотность тока в 2 раза. При помощи компьютерной модели выполнен термический анализ по разработанной методике. Экспорт модели платы выполнен с учетом полной металлизации и структуры слоев. Для проверки релевантности результатов расчета было выполнено экспериментальное измерение нагрева компонентов ПП приемовозбудителя. Полученные при использовании модели платы термограммы с учетом полной металлизации и структуры слоев близки к экспериментальным, погрешность моделирования не превышает 5 %. Это дает возможность принять правильное решение по обеспечению работоспособности изделия. Необходимость коррекции топологии или стека ПП после получения термограмм не выявлена. Варианты с изменением стека, такие как использование более ВЧ диэлектриков или увеличение толщины или материала проводящих слоев, не дают значительного выигрыша по снижению максимумов и концентрации тепловых полей, однако значительно влияют на стоимость конечной готовой ПП.

#### Библиографические ссылки

1. *Bogatin E.* (2018) Signal and Power Integrity - Simplified. 3rd Edition. Eds. Pearson Education, p. 992, ISBN-13: 978-0134513416
2. *Smith L.D., Bogatin E.* (2017) Principles of Power Integrity for PDN Design: Robust and Cost Effective Design for High Speed Digital Products. Eds. Pearson Education, p. 816, ISBN-13: 978-0132735629
3. *Ottm Г.* Методы подавления шумов и помех в электронных системах: монография. М. : Мир, 1979. 318 с.
4. *Wenchang H., Muqi O., Yin S., Jongjoo L., Chulsoon H.* (2025) Reinforcement Learning-Based Optimization of Bonding Wires for EMI Mitigation. *IEEE Transactions on Signal and Power Integrity*, vol. 4, pp. 124-131. DOI: 10.1109/TSIPI.2025.3560229
5. *Huifeng Z., Haoqi S., Dean S., Xiaolong G., Yier J., Xuan Z.* (2023) PDN Pulse: Sensing PCB Anomaly with the Intrinsic Power Delivery Network. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 18, pp. 3590-3605. DOI: 10.1109/TIFS.2023.3285490
6. *Алексеев В. Ф., Горбач А. П., Хуторная Е. В.* Моделирование распределения плотности тока на печатной плате // SCIENCES OF EUROPE. 2020. Т. 1, № 55. С. 37–41.
7. Моделирование цепей питания и анализ их влияния на надежность печатной платы в среде HYPERLYNX / А. С. Ишков, П. А. Максимов, В. С. Маркелов, П. А. Блинков // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM. 2021. № 12. С. 45–50.
8. *Qiuyue W., Yuan X., Na L., Mingwei Z., Qing H.* (2024) Electrothermal Transient Co-Simulation with Domain Decomposition Method for 3-D Complex Integrated Systems. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 14, № 8, p. 1374-1383. DOI: 10.1109/TCRMT.2024.3428478
9. *Talis P., Edemar O.P., Hamilton C.S., José R.P.* (2024) Analytical Electro-Thermal Model and 3-D Thermal Resistance Network for SMD-Based Printed Circuit Board Power Converters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 12, no. 5, p. 4979-4992. DOI: 10.1109/JESTPE.2024.3424588
10. *Кочетков О. С., Лобачев Н. Ю., Сарычев Е. В.* Способы влияния на температурное распределение по объему приемо-передающего модуля // Вестник гонцерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 3. С. 77–88. DOI: 10.38013/2542-0542-2023-3-77-88
11. Влияние печатных проводников на тепловой режим радиоэлектронных приборов / С. Ю. Сотникова, Н. А. Кононова, Л. Б. Ландер, В. Э. Цветков, С. В. Яловнаров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 712–724. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724
12. *Колесникова Т.* Тепловой анализ печатной платы и ее компонентов в программной среде COMSOL Multiphysics // Электронные компоненты. 2020. № 5. С. 58–66.
13. *Кушинарёв А. С., Макаров О. Ю.* Методика обеспечения тепловых режимов радиоэлектронных устройств с мощными светодиодами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 3. С. 90–95. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.013
14. Оптимизация теплового режима приемо-передающего устройства по результатам моделирования тепловых процессов в среде Solid Works Flow Simulation / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, П. С. Романовский, А. А Стануль // Znanstvena misel Journal. 2019. Т. 1, № 35. С. 47–60.
15. *Костин А. В., Богданов Д. С., Бобров И. С.* Анализ теплового влияния двух внутренних параллельных печатных проводников платы, установленных на металлическое основание и расположенных в одном слое // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 90–99. DOI: 10.21685/2307-4205-2023-3-11
16. Проектирование цепи питания гибкожесткой печатной платы с применением средств моделирова-

- ния / П. А. Макеев, И. Р. Музаров, Д. В. Ландышев, И. Р. Галимов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 6. С. 70–80. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-70-80
17. Колотов А. С., Копысов А. Н. Моделирование распределения плотности тока и напряжения на печатной плате // Вектор развития. 2024. № 13. С. 41–44.
18. Балакирев М. И., Вахмяков Ю. С., Журиков А. В. Радиопередающие устройства / под ред. О. А. Челнокова: справочник. М. : Радио и связь, 1982, 256 с.
19. Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: Схемы, блоки, 50-омная техника / под ред. Ю. А. Лурье : справочник. М. : Мир, 1990. 256 с.
20. Жирнов А. А., Иванова В. В. Модуль гетеродинов приемника с двойным преобразованием частоты // Наука настоящего и будущего. 2023. № 2. С. 162–163.
21. Довбня В. Г., Азиатцев В. Е., Михайлов С. Н. Помехоустойчивость радиоприемных систем цифровых линий связи: монография. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2017. 175 с. ISBN: 978-5-7681-1201-1
22. Satoshi T., Shinsuke H., Kyoya T., Akifumi K., Yoshiki S., Kunio S. (2025) A 300-GHz-Band 36-Gb/s Scalable 2-D Phased-Array CMOS Double Superheterodyne Receiver. *IEEE Solid-State Circuits Letters*, vol. 8, pp. 133-136, DOI: 10.1109/LSSC.2025.3566726
23. Листопад Н. И., Жерносеков Р. А., Надольский А. Н. Об одной возможности линеаризации характеристик телевизионных передатчиков // Информационные радиосистемы и радиотехнологии. 2020. С. 54–56.
24. Максимов А. А., Горгадзе С. Ф. Линеаризация усилителя мощности с раздельным усилением и регулированием режима по питающему напряжению // Радиотехника. 2025. Т. 89, № 1. С. 5–23. DOI: 10.18127/j00338486-202501-01

## References

1. Bogatin E. (2018) Signal and Power Integrity - Simplified. 3rd Edition. Eds. Pearson Education, p. 992, ISBN-13: 978-0134513416
2. Smith L.D., Bogatin E. (2017) Principles of Power Integrity for PDN Design: Robust and Cost Effective Design for High Speed Digital Products. Eds. Pearson Education, p. 816, ISBN-13: 978-0132735629
3. Ott G. (1979) *Metody podavlenija shumov i pomekh v elektronnyh sistemah* [Methods of suppressing noise and interference in electronic systems]. Moscow: Mir Publ., 318 p. (in Russ.).
4. Wenchang H., Muqi O., Yin S., Jongjoo L., Chulsoon H. (2025) Reinforcement Learning-Based Optimization of Bonding Wires for EMI Mitigation. *IEEE Transactions on Signal and Power Integrity*, vol. 4, pp. 124-131. DOI: 10.1109/TSIPI.2025.3560229
5. Huifeng Z., Haoqi S., Dean S., Xiaolong G., Yier J., Xuan Z. (2023) PDN Pulse: Sensing PCB Anomaly with the Intrinsic Power Delivery Network. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 18, pp. 3590-3605. DOI: 10.1109/TIFS.2023.3285490
6. Alekseev V.F., Gorbach A.P., Hutorajna E.V. (2020) [Modeling of current density distribution on a printed circuit board]. *Sciences of Europe*, vol. 1, no. 55, pp. 37-41 (in Russ.).
7. Ishkov A.S., Maksimov P.A., Markelov V.S., Blinkov P.A. (2021) [Modeling power supply circuits and analyzing their impact on the reliability of a printed circuit board in the HYPERLYNX environment]. *Sistemy proektirovaniya, modelirovaniya, podgotovki proizvodstva i upravlenie proektami CAD/CAM/CAE/PDM*, no. 12, pp. 45-50 (in Russ.).
8. Qiuyue W., Yuan X., Na L., Mingwei Z., Qing H. (2024) Electrothermal Transient Co-Simulation with Domain Decomposition Method for 3-D Complex Integrated Systems. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 14, no. 8, p. 1374-1383. DOI: 10.1109/TCMT.2024.3428478
9. Talis P., Edemar O.P., Hamilton C.S., José R.P. (2024) Analytical Electro-Thermal Model and 3-D Thermal Resistance Network for SMD-Based Printed Circuit Board Power Converters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 12, no. 5, p. 4979-4992. DOI: 10.1109/JESTPE.2024.3424588
10. Kochetkov O.S., Lobachev N.Ju., Sarychev E.V. (2023) [Methods for influencing the temperature distribution by volume of the transmit-receive module]. *Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antej”*, no. 3, pp. 77-88. DOI: 10.38013/2542-0542-2023-3-77-88 (in Russ.).
11. Sotnikova S.Ju., Kononova N.A., Lander L.B., Cvetkov V.Je., Jalovnarov S.V. (2022) [Influence of printed conductors on the thermal regime of radio-electronic devices]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*, vol. 65, no. 10, pp. 712-724. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724 (in Russ.).
12. Kolesnikova T. (2020) [Thermal analysis of a printed circuit board and its components in COMSOL Multiphysics]. *Elektronnye komponenty*, no. 5, pp. 58-66 (in Russ.).
13. Kushnarjov A.S., Makarov O.Ju. (2019) [A technique for providing thermal conditions for radio-electronic devices with powerful LEDs]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*, vol. 15, no. 3, pp. 90-95. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.013 (in Russ.).
14. Piskun G.A., Alekseev V.F., Romanovskij P.S., Stanul' A.A (2019) [The optimization of the thermal mode of the receiving and transmitting device based on the results of modeling thermal processes in the Solid-Works Flow Simulation environment]. *Znanstvena misel Journal*, vol. 1, no. 35, pp. 47-60 (in Russ.).
15. Kostin A.V., Bogdanov D.S., Bobrov I.S. (2023) [The analysis of the thermal effect of two internal parallel printed circuit board conductors mounted on a metal base and arranged in one layer]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh system*, no. 3, pp. 90-99. DOI: 10.21685/2307-4205-2023-3-11 (in Russ.).
16. Makeev P.A., Muzafarov I.R., Landyshev D.V., Galimov I.R. (2023) [Designing the power supply circuit of a flexibly rigid printed circuit board using modeling tools]. *Izvestija SPbGJeTU «LJetI»*, vol. 16, no. 6,

- pp. 70-80. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-70-80 (in Russ.).
17. Kolotov A.S., Kopysov A.N. (2024) [The modeling the distribution of current and voltage density on a printed circuit board]. *Vektor Razvitiya*, no. 13, pp. 41-44 (in Russ.).
18. Balakirev M.I., Vohmjakov Yu.S., Zhurikov A.V. (1982) *Radioperedajushchie ustroystva* [The radio transmitting devices]. Moscow: Radio i Sviaz' Publ., 256 p. (in Russ.).
19. Red Je. (1990) *Spravochnoe posobie po vysokochastotnoj shemotehnike: Shemy, bloki, 50-omnaja tekhnika* [Reference manual on high-frequency circuitry: Circuits, blocks, 50-ohm technique]. Moscow: Mir Publ., 256 p. (in Russ.).
20. Zhirnov A.A., Ivanova V.V. (2023) [The double conversion receiver heterodyne module]. *Nauka nastojashhego i budushhego*, no. 2, pp. 162-163 (in Russ.).
21. Dovbnja V.G., Aziatcev V.E., Mihajlov S.N. (2017) *Pomehoustojchivost' radiopriemyh system cifrovyh linij svjazi* [The noise immunity of radio receiving systems of digital communication lines]. Kursk: Jugozapadnyj gosudarstvennyj universitet, 175 p. (in Russ.).
22. Satoshi T., Shinsuke H., Kyoya T., Akifumi K., Yoshiaki S., Kunio S. (2025) A 300-GHz-Band 36-Gb/s Scalable 2-D Phased-Array CMOS Double Superheterodyne Receiver. *IEEE Solid-State Circuits Letters*, vol. 8, pp. 133-136, DOI: 10.1109/LSSC.2025.3566726
23. Listopad N.I., Zhernosekov R.A., Nadol'skij A.N. (2020) [On one possibility of linearization of characteristics of television transmitters]. *Informacionnye radiosistemy i radiotekhnologii*, pp. 54-56 (in Russ.).
24. Maksimov A.A., Gorgadze S.F. (2025) [The linearization of a power amplifier with separate gain and supply voltage mode control]. *Radiotekhnika*, vol. 89, no. 1, pp. 5-23. DOI: 10.18127/j00338486-202501-01 (in Russ.).

### **The Diagnostic Technique for Printed Circuit Boards of Communications Equipment by the Method of Thermal and Electrical Analysis**

*A.S. Kolotov*, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*A.N. Kopysov*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*V.V. Khvorenkov*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*In the modern world, communications systems play a key role in ensuring effective communication and information security. The reliability and serviceability of printed circuit boards of communication equipment directly affect the stability of the entire system. In this regard, the development of effective diagnostic methods is of particular importance, allowing timely detection of malfunctions and preventing their development. The need to ensure reliable and safe operation of complex communication systems and complexes is only increasing every year. The development and improvement of methods of analysis printed circuit boards is actual scientific and technical task, the solution of which will increase the reliability, productivity and competitiveness of electronic devices. This article develops and describes methods of electrical and thermal analysis. A computer model of a receiver-exciter board with dual frequency conversion has been developed, taking into account thermal and electrical parameters. The possibility and necessity of using computer simulation at the post-operational level is substantiated. Thermal and electrical analysis for direct current was performed using a computer model. The simulation of the board's power supply integrity was performed in the Altium Designer CAD using the extensions PDN Analyzer from CST and Power Analyzer from Keysight. The maps of current density distribution, voltage drops and return paths were constructed. The problem areas requiring topology correction have been found. The Altair Pollex CAD system was used to simulate thermal conditions, which allows conducting research on stationary and non-stationary processes. It can be used to conduct research on stationary and non-stationary processes. A practical comparison of the prototype of the exciter board and the computer model was carried out. It was shown that the obtained programs of the thermal analysis of the board model, made taking into account the full metallization and structure of the layers, can lead to an error in determining the temperature of electronic components of up to 5%. This makes it possible to make the right decision to ensure the reliability of the product.*

**Keywords:** communication equipment, printed circuit boards, Altium Designer, PDN, DC electrical analysis, Altair Pollex, thermal analysis, power supply integrity, electromagnetic compatibility.

Получено 02.09.2025

#### **Образец цитирования**

*Колотов А. С., Копысов А. Н., Хворенков В. В.*  
Методика диагностирования печатных плат аппаратуры связи методом термического и электрического анализа // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 3. С. 104–123. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-104-123

#### **For Citation**

Kolotov A.S., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V. (2025) [The Diagnostic Technique for Printed Circuit Boards of Communications Equipment by the Method of Thermal and Electrical Analysis]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 3, pp. 104-123. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-104-123 (in Russ.).