

# Рекомендации по дизайну ПП и отладке устройств с физическим уровнем Ethernet

Иосиф КАРШЕНБОЙМ  
iosifk@eltech.spb.ru

**Целью данной статьи является описание рекомендаций по проектированию печатных плат и отладке при разработке устройств с физическим уровнем Ethernet.**

## Введение

Почти все фирмы — изготовители микросхем предоставляют пользователям всю информацию, необходимую для разработки проектов. Так, например, фирма Micrel разместила у себя на сайте полный комплект документации, необходимый для разработки, включая описания, схемные решения, файлы Gerber, модели IBIS и драйверы программного обеспечения. Все эти файлы могут быть загружены с сайта компании. В большинстве случаев все оценочные платы и руководства пользователя также доступны практически по всем микросхемам различных изготовителей. Для этого всегда можно обратиться к региональному дилеру производителя. И, прежде чем приступать к проектированию собственных устройств, всегда оказывается очень полезным изучить инструкции по применению микросхем, представляемые изготовителем, а также референсный проект. Статьи, не только иностранные фирмы предоставляют пользователям подобные услуги. Например, фирма «Орион Микро» ([www.orion-micro.ru](http://www.orion-micro.ru)) из Таганрога готовится к выпуску стартового набора с контроллером Ethernet 10/100.

Поскольку разработка аппаратной части является самой «консервативной» в проекте и ее невозможно быстро переделать или изменить так, как меняется прошивка микроконтроллера или ПЛИС, то в первую очередь именно здесь хочется избежать ошибок, связанных с проектированием.

В статье обобщены рекомендации нескольких ведущих фирм-производителей микросхем по проектированию печатных плат и по размещению компонентов на платах. Данные рекомендации необходимо учитывать при разработке устройств с физическим уровнем Ethernet, поскольку каждое из них представляет собой сложный аналогово-цифровой проект, работающий на достаточно большой частоте. Проект должен учитывать многочисленные требования, начиная от гальванической развязки и заканчивая защитой от электростатического разряда. Печатная плата

(ПП) — это самый важный компонент, определяющий электромагнитные шумы, влияние электростатического разряда и производительность устройства в целом. От выполнения всех этих требований в дизайне ПП зависит качество выполнения всего устройства в целом. Основная цель этой работы — сократить шум, вносимый цифровыми схемами, и общий фоновый шум, а также обеспечить экранирование между внутренней схемой на ПП и внешним оборудованием. Эти требования по проектированию ПП должны быть применены ко всему дизайну ПП, а не только к изделиям с физическим уровнем Ethernet.

Кроме того, в данной статье приводятся некоторые рекомендации по проверке и отладке устройств на первых этапах испытаний на функционирование.

## Примечания к терминологии, используемой в данной статье

В данной статье мы будем придерживаться терминологии, применяемой в современной иностранной литературе. Нам привычны определения «высокочастотные» и «низкочастотные» сигналы. Но данные определения подразумевают, что мы имеем дело с повторяющимися сигналами, имеющими определенную форму, к которой применимы термины «период повторения» и, соответственно, «частота». Однако для микропроцессорной техники данные определения для сигналов не всегда подходят. Множество сигналов имеет форму, к которой невозможно применить термин «период повторения». Примером такого сигнала может быть сигнал запроса прерывания, поступающий в микроконтроллер в произвольные моменты времени. Однако для таких аperiodических сигналов, как и для повторяющихся сигналов, важной характеристикой будет являться время прохождения по проводнику печатной платы. В соответствии с требованиями к времени прохождения сигнала по проводнику на плате введем термин «высокоскоростные» и «низкоскоростные» сигналы. То есть для нас при проекти-

ровании печатной платы будет важно время прохождения сигнала от одного компонента схемы к другому. Конечно, такое разделение сигналов на группы носит чисто условный характер. То, что для одного проекта и одного типа печатных плат, например 4-слойных, будет «низкоскоростной» трассой, для другого типа печатных плат, например 2-слойных, будет «высокоскоростной» линией.

Примерно такое же разделение на «высокоскоростные» и «низкоскоростные» можно сделать и по отношению к проектам в целом. Деление это тоже довольно условное. Но можно сказать, что если в проекте присутствуют аналоговые цепи, которые работают на частотах в сотни мегагерц, то такой проект смело можно отнести к разряду «высокоскоростных».

## Общее описание

Чтобы успешно выполнить проект по разработке печатной платы для высокоскоростной схемы и учесть проблемы целостности сигнала, нам необходимо тщательно выполнить все требования по расположению компонентов на плате и принять все необходимые меры по фильтрации питания.

В данной статье собраны рекомендации, приводимые различными производителями микросхем [1–6]. Особенно хочется отметить AN-139 [2] — это инструкция по применению, в ней описываются некоторые общие руководящие принципы и рекомендации, которые могут облегчить проектирование ПП и уменьшить время отладки системы. В AN-139 приведены рекомендации для микросхем KSZ8841/42 — семейства контроллеров Ethernet в ЛВС. Но рекомендации, данные в AN-139, будут полезны и при использовании любых других микросхем с физическим уровнем Ethernet.

Рассмотрим следующие темы:

- расположение компонентов и стратегия использования слоев ПП;
- вопросы электропитания и фильтрации помех;

- аналоговая часть схемы стыка с Ethernet и проблемы защиты от электростатического разряда (ESD);
- проблемы целостности сигнала;
- практические методы отладки устройств с микросхемами физического уровня Ethernet.

### Примечания к проектированию ПП

#### Расположение компонентов и стратегия использования слоев ПП

Для высокоскоростных проектов устройств, а именно устройств, подключаемых к 10/100 Ethernet, фирма Micrel настоятельно рекомендует использовать печатные платы, имеющие, по крайней мере, 4 слоя. Для более высокоскоростных проектов, например, для гигабитного Ethernet, корпорация Intel рекомендует применять уже не 4, а 6 слоев.

Известно, что стоимость печатной платы пропорциональна площади поверхности платы и числу слоев. Типичная плата с 4 слоями выполняется так, чтобы чувствительные к быстрдействию трассы сигналов и дифференциальные пары не проходили через переходные отверстия при соединении микросхем, расположенных на слое компонентов (верхняя поверхность платы). Второй слой — непрерывный и широкий слой «земли». Аналогично слою «земли» выполнен и третий слой — слой питания. Четвертый, самый нижний — это слой, по которому проходят трассы сигналов. Эти четыре слоя и показаны на рис. 1.

#### Цепи «корпус», «шасси» и «земля»

Корпус (шасси) блока и трансформаторы выполняют две задачи: они помогают уменьшить уровень электромагнитных шумов, излучаемых во внешнее по отношению к ПП пространство, а также действуют как экран, защищающий компоненты, находящиеся на ПП от электростатического разряда. Поэтому необходимо выполнить следующие рекомендации:

- Разместите трассу корпуса (шасси) блока во все слои ПП, кроме слоев питания. Используйте переходные отверстия с низким переходным сопротивлением, чтобы подключиться к корпусу блока на различных слоях ПП.
- Подключите корпус блока в нескольких точках на внешний корпус прибора или металлическую рамку модуля.
- Используйте зазор, чтобы изолировать слой корпуса блока от слоя сигнальной «земли». Область корпуса блока простирается от переднего фронта ПП (соединители RJ-45) к трансформаторам и по краям платы (рис. 1, 2).
- Рекомендуется использовать единственную точку соединения слоя «земли» с корпусом прибора (шасси). Корпус прибора должен

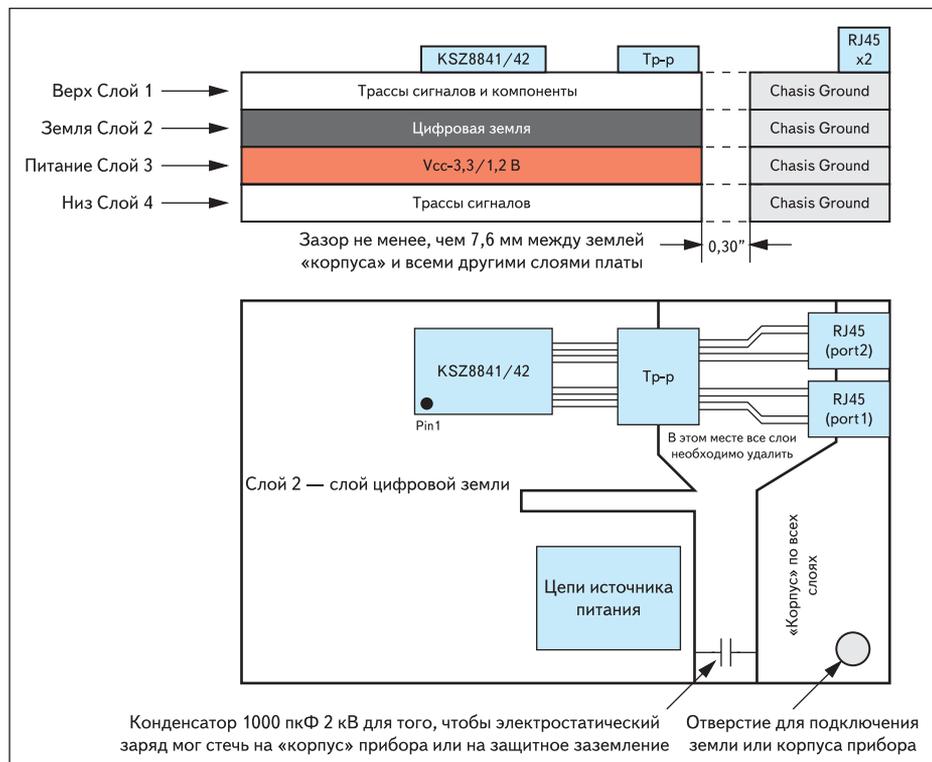


Рис. 1. 4 слоя печатной платы и выполнение слоя «земли»

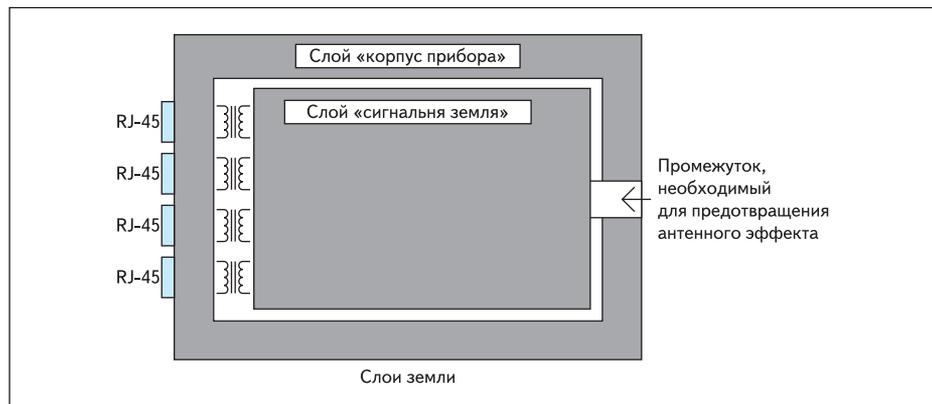


Рис. 2. Расположение слоя «земли» и «корпуса»

быть отделен от слоя цифровой «земли», чтобы уменьшить электромагнитное излучение (EMI) и вместе с тем улучшить защиту от электростатического разряда (как показано на рис. 1).

#### Слой «земли» и «питания»

##### Слой «земли»

Не разбивайте слой «земли» на отдельные слои для аналоговых сигналов, цифровых сигналов и силовых цепей. Для изделий 10/100 Ethernet рекомендуется делать объединенный слой «земли». Область «земли» должна быть выполнена одним непрерывным слоем, поскольку разделение слоя «земли» может вызвать увеличение уровня электромагнитных шумов.

- Слой «земли» может быть разделен на отдельные домены — аналоговый и цифро-

вой (GNDD, GNDA, и GNDS). Аналоговый домен слоя «земли» и цифровой домен слоя «земли» должны соединяться перемычкой, которая должна находиться далеко от входов AGND трансивера [1, 2] (рис. 3).

- Все входы AGND у микросхемы трансивера не должны непосредственно соединяться друг с другом (рис. 4а). Они должны быть непосредственно подключены к аналоговому домену слоя «земли» (рис. 4б).
- Проложите высокоскоростные сигналы выше непрерывного слоя «земли».
- Заполните медными полигонами неиспользованные области сигнальных слоев и подключите их к слою «земли» через переходные отверстия.
- Разместите переходные отверстия так, чтобы избежать длинных щелей в слоях из-за переходных отверстий.

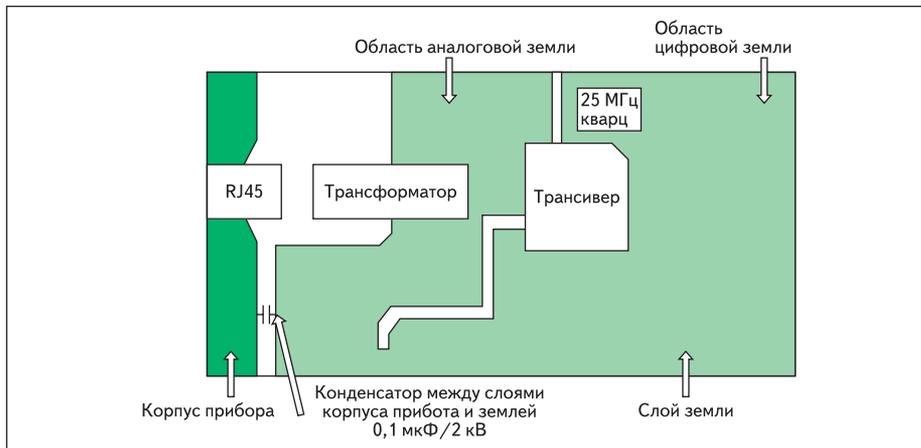


Рис. 3. Расположение областей цифровой и аналоговой «земли»

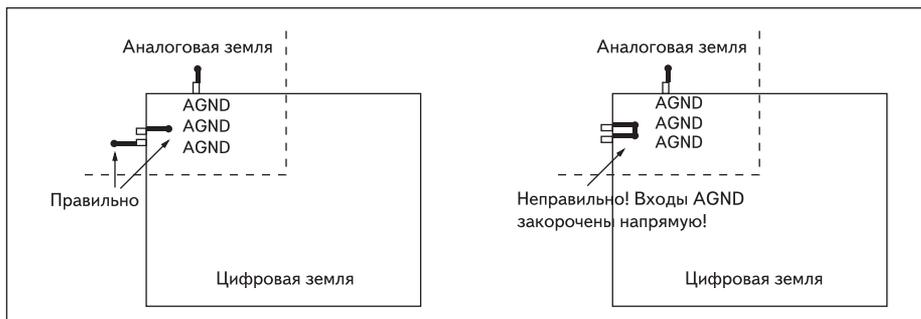


Рис. 4. Подключение выводов микросхемы к аналоговой «земле»

### Слой аналогового питания

Разместите аналоговые компоненты в пределах слоя аналогового питания. Отделите аналоговые слои питания от слоев питания логических схем, имеющих повышенный шум (рис. 5).

### Слой цифрового питания

Разместите цифровые компоненты в пределах слоя цифрового питания. Выполнение слоя питания показано на рис. 5. Для DM9000 ферритовый дроссель должен иметь импеданс 100 Ом в 100 МГц и выдерживать ток более 250 мА. Подходящий компонент — Panasonic EXCL4532U для поверхностного

монтажа или аналогичный. Электролитические блокировочные конденсаторы с номиналами 10, 0,1 и 0,01 мкФ должны быть установлены между шиной питания и заземлением в точке подключения каждого ферритового дросселя.

### Зона повышенного шума под трансформатором

- Необходимо удалить слои питания и «земли» на всех уровнях ПП непосредственно под трансформаторами.
- Корпус прибора должен быть на соединителе RJ-45 и на трансформаторе (рис. 1, 2).

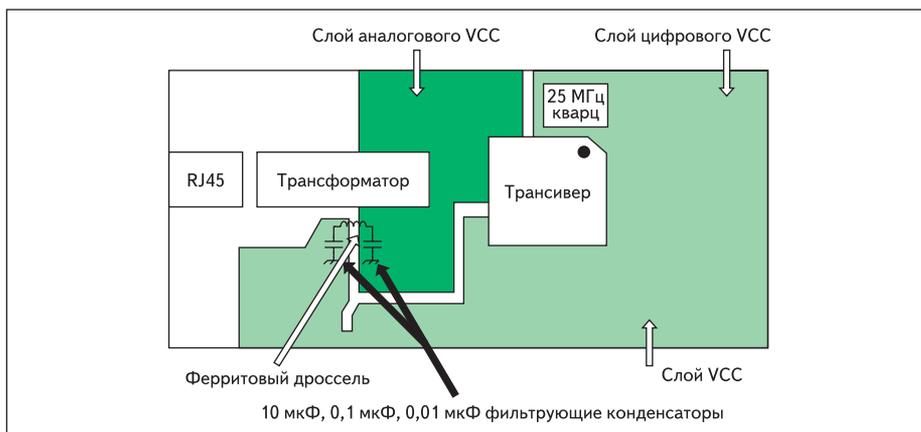


Рис. 5. Расположение областей цифрового и аналогового питания

- Не проводите цифровые сигналы между физическим уровнем и разъемом RJ-45. Проводите трассы для пар сигналов Tx и Rx далеко от всех других активных сигналов и корпуса блока.

### Рекомендации по размещению трасс сигналов

#### Общие правила

- Компоненты должны быть расположены так, чтобы не образовывались длинные петлеобразных трасс. Трансформатор 10/100М размещают как можно ближе к трансиверу и к разъему RJ-45. Например, для DM9000 — не более 20 мм (рис. 1).
- Можно использовать металлический экран, закрывающий схему входной части устройства.
- Используйте ферритовый дроссель на проводе питания постоянного тока, чтобы уменьшить электромагнитные шумы.
- Кварцевый резонатор 25 МГц не должен быть расположен около трасс высокочастотных сигналов, например типа RX или TX, трансформатора, а так же у края ПП.
- Не проводите маршруты трасс сигналов с поворотами на 90°. Вместо этого должны быть выполнены повороты на 45°, а ширина дорожки ПП должна быть выбрана с учетом того номинала тока, который ожидается в данной цепи (рис. 6). Рекомендуется, чтобы цепи типа RX и TX имели угол поворота трасс 45° или шли по дуге.
- Избегайте использовать переходные отверстия при прокладке трасс для пар сигналов Rx и Tx.
- Обеспечьте согласование на сигналах синхросигналы и высокоскоростных цифровых сигналах. Размещайте согласующие резисторы номиналом 50 Ом как можно ближе к трансформатору 10/100М и входам Rx и Tx. Согласующие резисторы и конденсаторы с сигналов Tx и Rx на «землю» должны быть помещены непосредственно около трансивера (для DM9000 на расстоянии не более 10 мм — рис. 7).
- Обеспечьте соответствие импеданса на высокоскоростных трассах сигналов, чтобы предотвратить отражения сигналов в линии.

#### Размещение трасс для дифференциальных сигналов

- Расположите дифференциальные пары по возможности близко друг к другу и удалите их от всех других сигналов.
- Оба провода дифференциальной пары должны быть расположены на одном и том же слое ПП.
- Расположите обе трассы каждой дифференциальной пары идентично. Трассы, такие как Rx и Tx, направленные от трансивера к трансформатору и к разъему RJ45, должны выполняться по кратчайшему пути симметрично и близко друг к другу (не более 2 мм). Пары сигналов Rx, Tx

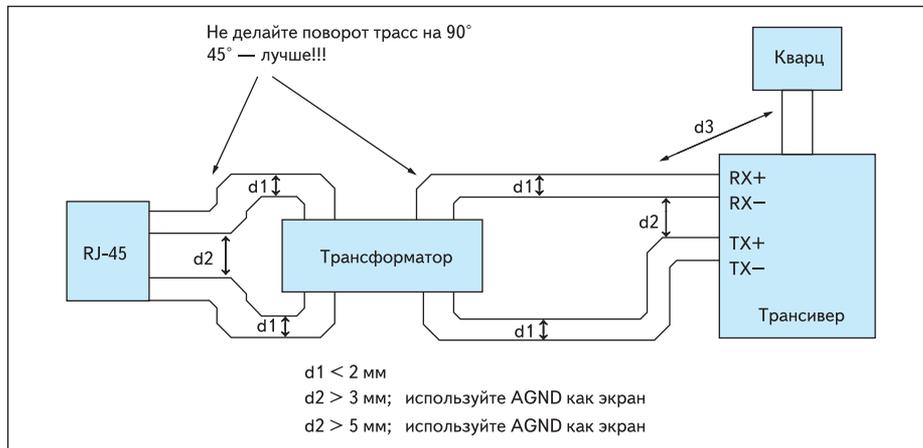


Рис. 6. Расположение компонентов и трасс на плате

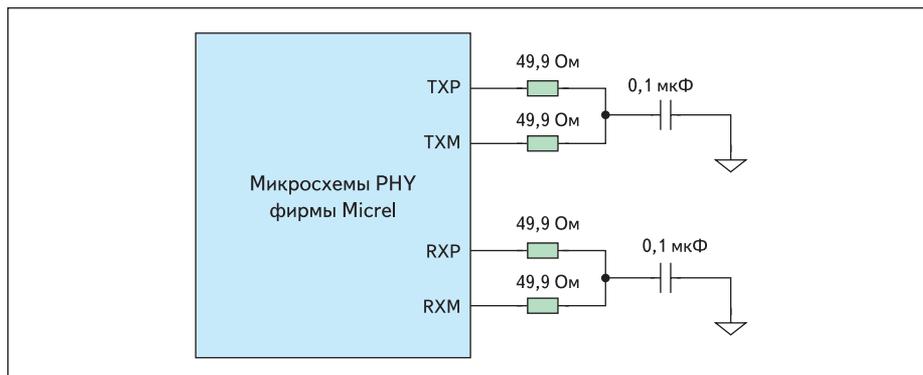


Рис. 7. Согласование цепей Tx и Rx

и синхрочастоты должны быть как можно короче. Не размещайте пару Rx поперек пары Tx. Расположите принимающую пару далеко от передающей пары (не ближе 3 мм). Лучше всего между этими двумя парами трасс разместить слой «земли» [2].

- Расположите пары линий передачи данных (Tx) и пары линий приема данных (Rx) не менее чем на тройном расстоянии друг от друга.
- Проводите дифференциальные пары для сигналов Tx и Rx, используя ширину трассировки 5 mil и интервал в 5 mil [1] (рис. 8).

### Рекомендации по размещению сигналов синхрочастоты

- Для быстродействующих сигналов, проходящих по плате необходимо принять дополнительные меры: необходимо избегать переходных отверстий и контактных площа-

док на дорожках этих сигналов, так как переходные отверстия создадут нежелательную емкость и индуктивность, а это, в свою очередь, может вызвать отражения и искажения сигналов из-за неоднородности импеданса при переходе от отверстия к трассе.

- Удостоверьтесь, что импедансы правильным образом проверены и согласованы на всех трассах высокоскоростных сигналов, и там везде есть соответствующие схемы согласования.
- Проводите трассы синхрочастоты максимально короткими.
- Необходимо отделить области с различными тактовыми частотами между аналоговыми и цифровыми компонентами схемы, чтобы избежать их взаимного влияния друг на друга.
- Проводите сигналы синхрочастоты так, чтобы их трассы находились над ненарушенным слоем «земли».

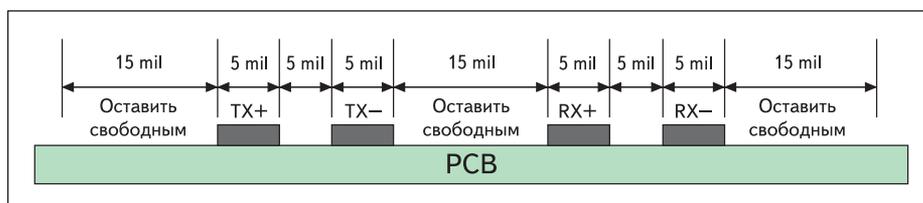


Рис. 8. Примеры расположения трасс сигналов Tx и Rx

- Все линии данных и синхрочастоты для высокоскоростных сигналов, а также и дифференциальные трассы должны иметь равную длину.
- Используйте буферный формирователь тактовых импульсов, если необходимо распределить синхрочастоту от одного генератора на несколько нагрузок.
- Терминируйте все сигналы синхрочастоты. Например, установите последовательный согласующий резистор номиналом 33–50 Ом в непосредственной близости к источнику синхрочастоты.
- Необходимо помнить о том, что задержка распространения по трассе, проходящей по внешнему слою, составляет 57 пс/см, в то время как задержка на трассе, проходящей по внутренним слоям — 71 пс/см.
- Из-за того, что физические параметры материала имеют ограничения, материал FR-4 используется только для частот до 500 МГц, а материал GE-Tek может применяться и на частотах до 800 МГц. Материал GE-Tek позволяет получить повышение производительности по сравнению с FR-4, но он более дорогой.
- Все кварцевые резонаторы должны быть расположены как можно ближе к выводам микросхемы, находиться верхнем слое и иметь нестабильность частоты в пределах  $\pm 50$  млн<sup>-1</sup>.

### Рекомендации по выбору трансформатора и кварцевого резонатора

Производители обычно дают список рекомендованных для применения трансформаторов и кварцевых резонаторов.

Для проектов с самой низкой стоимостью оптимальные результаты можно получить при использовании кристаллического резонатора на 25 МГц в режиме подключения его к выводам XTAL1, XTAL2 и включения соответствующих конденсаторов. Допуск частоты резонатора должен быть 50 млн<sup>-1</sup> или лучше.

Для того чтобы убедиться, что выбранный резонатор имеет необходимые характеристики, необходимо выполнить следующие шаги:

1. Проверить, что спецификации на резонатор, представленные производителем, соответствуют всем критериям качества, которые приводит изготовитель микросхем, а именно: выполняются условия по номиналу частоты, допуску частоты, температуре, режиму колебаний и емкости нагрузки.
2. Необходимо измерить электрические параметры резонатора в реальных устройствах. Для того чтобы не нагружать входы XTAL1 и XTAL2 при подключении измерительного прибора, можно произвести измерения частоты косвенным способом, снимая характеристики других сигналов микросхемы, которые стробируются той же тактовой частотой. Проверьте разброс значений параметров, полученный на нескольких

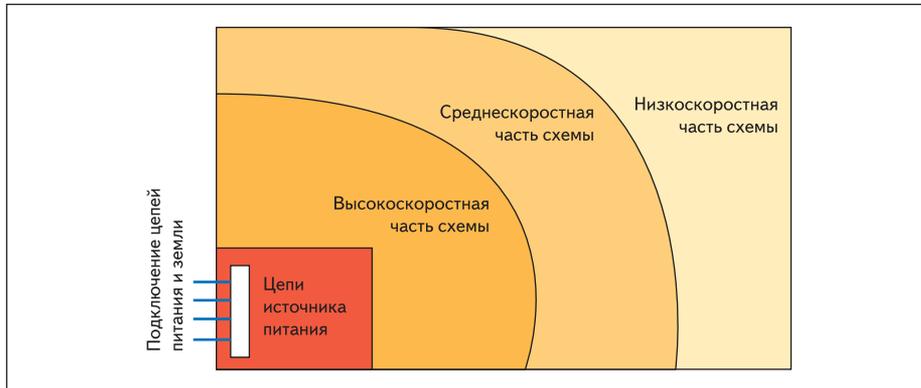


Рис. 9. Расположение компонентов на печатной плате в зависимости от скорости работы цепей

образцах. Для кристаллических резонаторов также важно исследовать поведение во время запуска и влияние, вызванное изменением напряжения питания и температуры. Более подробные рекомендации по выбору и определению характеристик резонаторов можно найти в [6].

- Необходимо на реальных, работающих образцах разработанных приборов провести испытания на соответствие требованиям физического уровня и на электромагнитную совместимость (FCC и EN).

### Вопросы питания и фильтрации помех

Для правильного функционирования разрабатываемого устройства необходимо, чтобы выполнялись следующие правила:

- Электропитание должно соответствовать требованиям по потребляемой мощности.
- При использовании импульсных источников питания необходимо обеспечить фильтрацию выходных напряжений и соответствующее экранирование, поскольку импульсные источники могут излучать довольно много электромагнитных шумов. Питание и «земля» не должны иметь шумы более 50 мВ «пик-пик».

Проблемы проектирования питания и фильтрации помех в печатных платах для высокочастотных систем становятся достаточно серьезными, так как обеспечивать соответствие большому количеству разнообразных требований. Если говорить обобщенно, то высокочастотные цепи вообще потребляют больше мощности, чем низкочастотные цепи. Это означает, что распределение электропитания должно быть выполнено так, чтобы в проект были заложены слои питания, способные обеспечить большие импульсные и постоянные токи, и соответственно, слой «земли» должен покрывать максимальную область платы, чтобы уменьшить длину и индуктивность цепей земли, по которым токи текут обратно в источник питания. Такой подход к проектированию позволяет устранить шум в цепях «земли». Лучший результат дает такое расположение компонентов схемы на ПП, когда

самые высокочастотные компоненты расположены в непосредственной близости к разьему питания, и, следовательно, имеют самый короткий путь для прохождения тока питания и возвратного тока (рис. 9).

### Методы фильтрации питания на примере KSZ8841/42

Проблемы фильтрации, возникающие при проектировании печатной платы, могут быть разделены на две части: фильтрация входного напряжения и фильтрация напряжения на уровне микросхемы.

### Фильтрующие конденсаторы

В типичном проекте системы распределения питания рядом с входным разъемом питания устанавливается конденсатор относительно большой емкости (100 мкФ или больший). Данный фильтрующий конденсатор устанавливают со следующими целями:

1. Предотвратить передачу произведенного в ПП шума, из ПП — к объединительной плате и другим цепям электропитания.
2. Фильтровать напряжение питания так, чтобы напряжение на входном разъеме ПП было поддержано на устойчивом уровне.
3. Подавлять звон цепей объединительной платы электропитания, который может возникнуть из-за индуктивности цепей электропитания и объединительной платы.

Для того чтобы получить качественную фильтрацию напряжения питания, необходимо выполнить приведенные ниже рекомендации:

- Все фильтрующие конденсаторы для всех входов электропитания размещают как можно ближе к контактным площадкам напряжения питания (например, для DM9000 — не более 2,5 мм от вышеупомянутых входов [3]).
- Фильтрующий конденсатор с номиналом 0,1–0,01 мкФ должен быть включен между

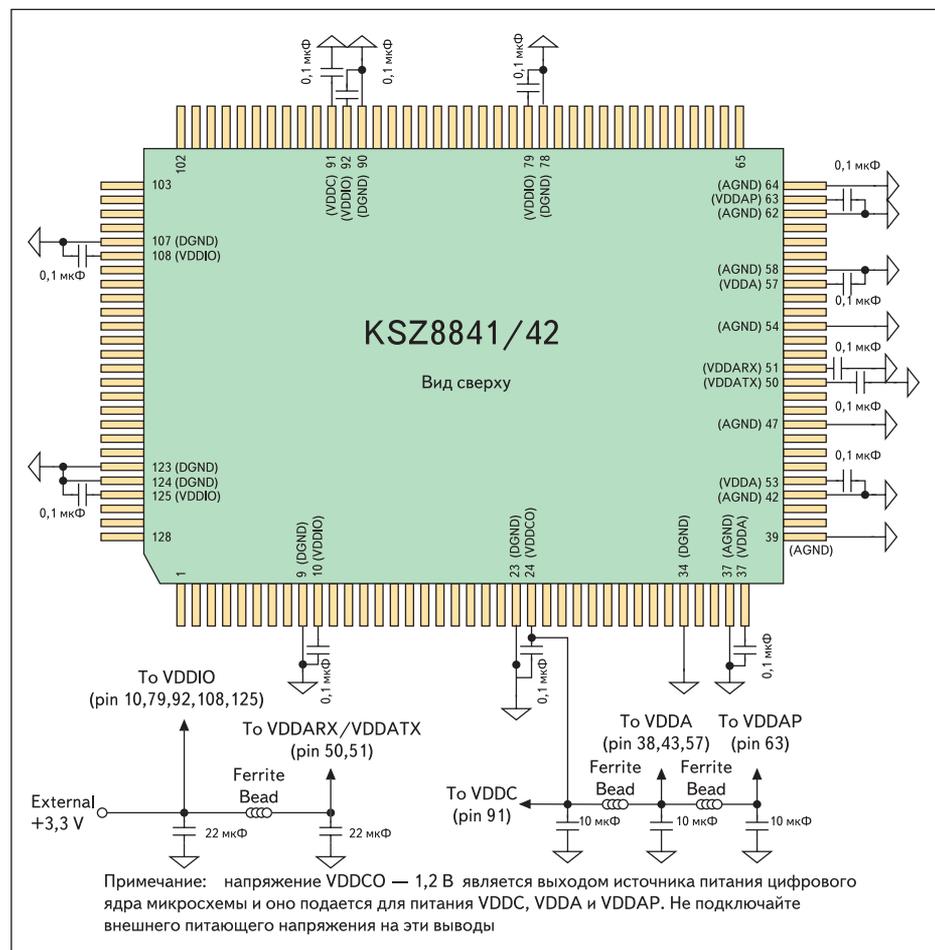


Рис. 10. Подключение цепей питания и фильтрации для KSZ8841/42

DVDD/DGND и AVDD/AGND и установлен как можно ближе к входам трансивера. Консервативный подход заключается в том, чтобы использовать два конденсатора в каждой цепи DVDD/DGND и в цепи AVDD/AGND. Один конденсатор 0,1 мкФ — для низкочастотного шума, а другой 0,01 мкФ — для высокочастотного шума на электропитании.

В высокочастотной цифровой системе на уровне микросхемы используются фильтрующие конденсаторы (0,1 мкФ или 0,01 мкФ) и дроссели — ферритовые бусинки (по крайней мере 100 Ом на 100 МГц) прежде всего для того, чтобы устранить высокочастотные шумы и другие влияния переходного процесса а также минимизировать проблемы, которые могут возникнуть у компонентов, чувствительных к высокочастотным колебаниям. Для сокращения времени переходного процесса, происходящего при переключениях, а также и для сокращения амплитуды этого переходного процесса необходимо иметь как можно более низкую индуктивность конструкции от выводов микросхем до конденсаторов фильтров. Когда конденсатор установлен на плате, длина трассы на плате от выводов микросхемы «VCC» до конденсатора фильтра представляет собой главный источник индуктивности. Эта индуктивность должна быть минимизирована, чтобы получить хорошее качество фильтрации при услови-

ях высокочастотного переходного процесса. Компания Micrel настоятельно рекомендует (рис. 10) использовать конденсаторы, монтируемые на поверхность (тип корпуса SMD-0603 или меньший), чтобы они могли быть размещены как можно ближе к выводам питания и «земли», и использовать дроссель — ферритовую бусинку, которая позволяет изолировать различные цепи, по которым поступает питание VCC.

Ферритовые бусинки хорошо работают в цепях фильтрации питания, потому что они обеспечивают высокое последовательное сопротивление по высокой частоте, и при этом не вызывают снижение уровня постоянного напряжения. Поскольку последовательное сопротивление дросселей пропорционально частоте, то ферритовая бусинка позволяет низкочастотным составляющим питающего напряжения проходить без потерь, но подавляет высокочастотные составляющие. По обе стороны от ферритовой бусинки необходимо поместить конденсаторы емкостью примерно в 10 мкФ.

Размещение слоев и фильтрация электропитания на ПП должны обеспечить такое подавление шумов, которое позволило бы достигнуть следующих показателей при измерении в устройстве:

1. Все DVDD и AVDD должны быть в пределах 50 мВ (размах),
2. Все DGND и AGND должны быть в пределах 50 мВ (размах).

3. Результирующее напряжение шума переменного напряжения, измеренное для DVDD/DGND и для AVDD/AGND, должно быть менее 100 мВ «пик-пик».

Есть несколько вариантов подключения средней точки трансформатора. В PHY фирмы micrel средняя точка трансформатора подключается к напряжению AVDD. Напряжение AVDD, подключенное к средней точке передающего трансформатора, должно быть хорошо отфильтровано, чтобы исключить передачу шума от электропитания в витую пару. Поэтому рекомендуется, чтобы фильтрующий конденсатор с номиналом 0,01 мкФ был помещен между этой точкой на слой «земли» AGND. ■

*Окончание следует*

## Литература

1. Application Note AN 111 «General III Design and Layout Guidelines Micrel 10/100 Switches and PHYs» <http://www.micrel.com>
2. Application Note AN 139, <http://www.micrel.com>
3. DM9000 Layout Guide; DM9000-LG-V01
4. LXT972A 3.3V Dual-Speed Fast Ethernet Transceiver Datasheet, Intel Corporation.
5. Magnetic-Less Ethernet Point-to-Point Ethernet over a Backplane Application Note, January 2002, Intel Corporation.
6. 82563EB/82564EB LAN on Motherboard Design Guide Application Note (AP-467), Intel Corporation.