



**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

ПРАВИЛО №1 — ШИРИНА ПРОВОДНИКА

Ошибка — очень часто начинающие разработчики используют ту ширину проводников (дорожек), которая стоит по умолчанию в используемой САПР. Там базовое значение ширины стоит 6 mils, то есть около 0.15 мм. Данная ширина проводников использована практически везде и это плохо, ибо ведет к ряду проблем.

ПРАВИЛО №1 — ШИРИНА ПРОВОДНИКА

- **Проблема №1** — падение напряжения. Все мы помни закон Ома из которого следует, что чем меньше площадь сечения проводника, тем больше его сопротивление. Чем больше сопротивление проводника, тем больше на нем упадет напряжение.
- **Проблема №2** — нагрев проводника. Тут все тот же закон Ома, мощность выделяемая на проводнике пропорциональна его сопротивлению, то есть чем больше сопротивление, тем больше тепла выделится на проводнике. Дорогу 0.15 мм ток в 5-10А легко испарит.

ПРАВИЛО №1 — ШИРИНА ПРОВОДНИКА

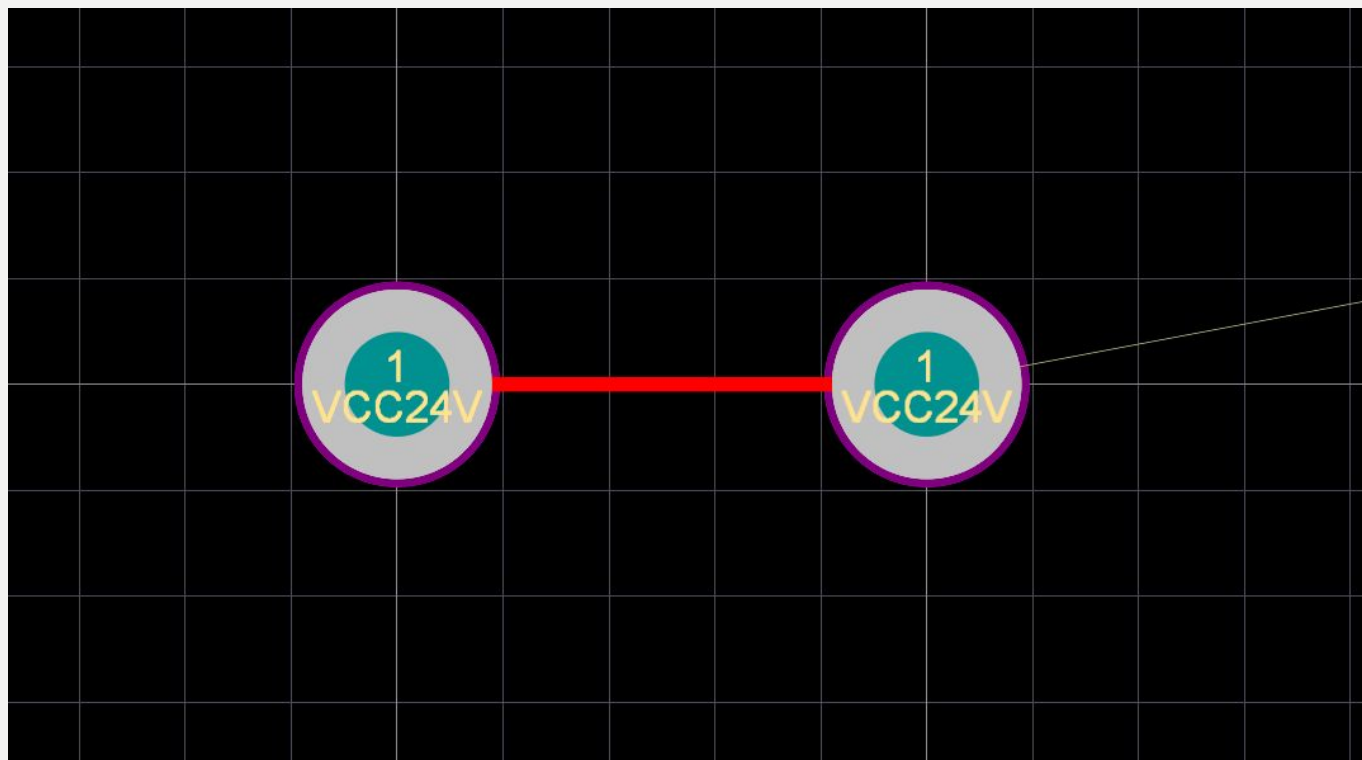
- **Проблема №3** — паразитная индуктивность. Этот момент к базовым вряд ли уже относится, но знать про него надо. Чем меньше сечение проводника, тем больше его индуктивность. То есть любой проводник на самом деле не просто «кусок меди», это составной компонент из активного сопротивления, индуктивности и паразитной емкости. Если эти параметры слишком высоки, то они начинают негативно отражаться на работе схемы. Чаще они проявляются частотах больше 10 МГц.
- **Проблема №4** — низкая механическая прочность. Дорожка шириной 2 мм более прочно прикреплена к текстолитовой основе, чем дорожка 0.15 мм. Ради интереса возьмите заводскую ненужную плату и поковыряйте ее.

ПРАВИЛО №1 — ШИРИНА ПРОВОДНИКА

- **Решение** — используйте максимально возможную ширину проводников. Если проводник можно провести с шириной 0.6 мм, то это лучше, чем провести его шириной 0.15 мм.

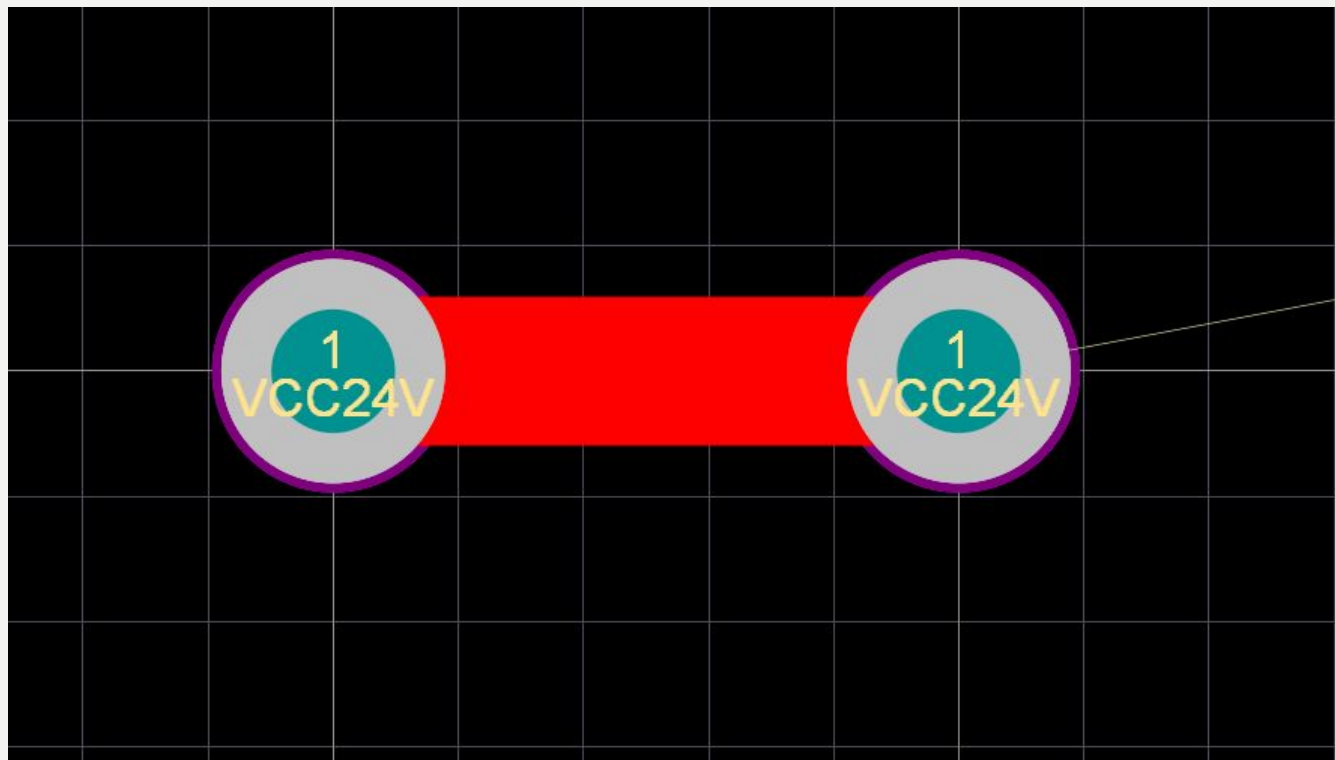
ПРИМЕР:

Плохо



ПРИМЕР:

Хорошо



ПРАВИЛО №2 — ПОДКЛЮЧЕНИЕ К ВЫВОДАМ

- Под выводами подразумевается контактная площадка компонента (pad), переходные отверстия (via) и прочие объекты, которые на плате мы соединяем с помощью проводников (дорожек).

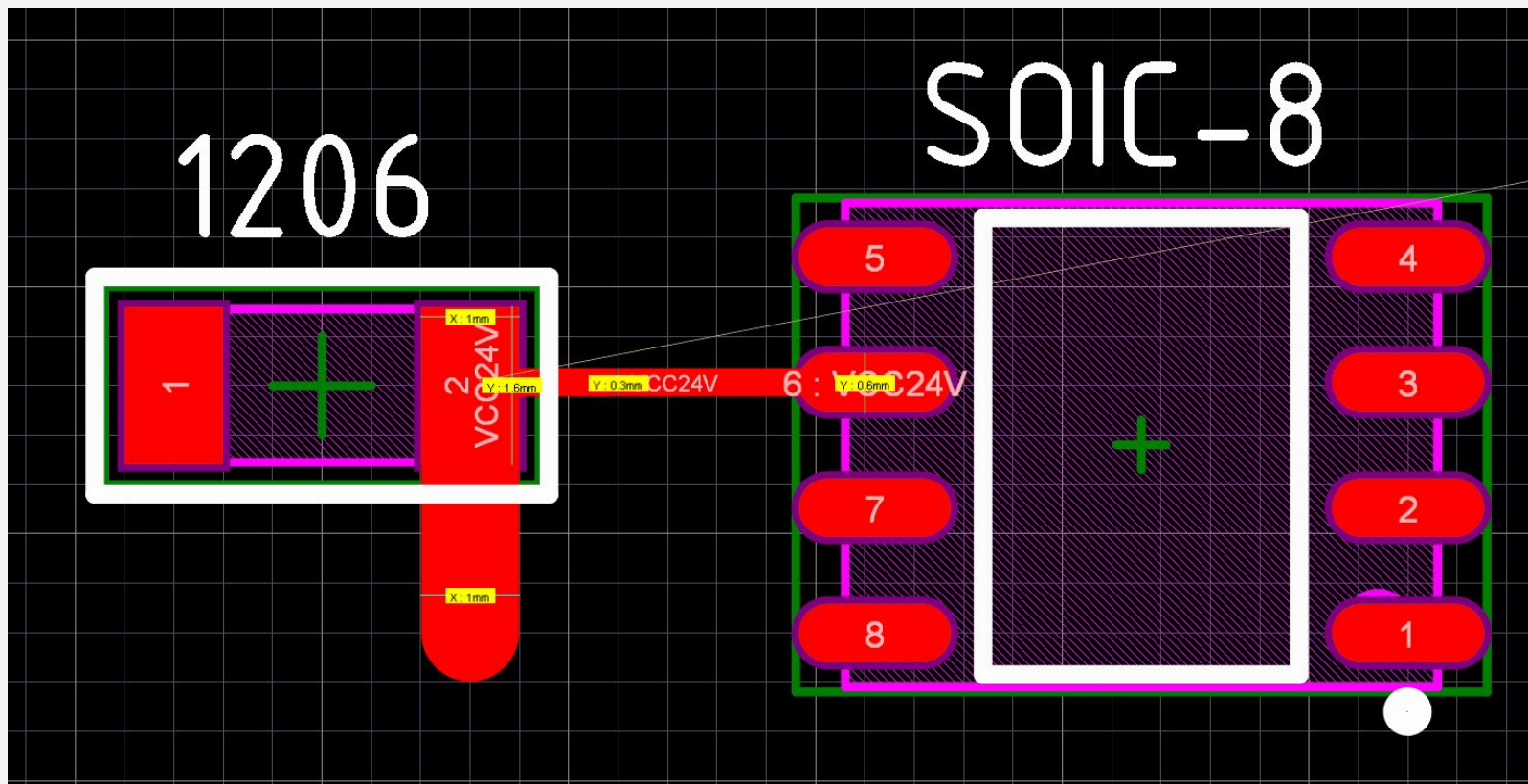
Ошибка — бывают две крайности. В одной, разработчик совершает ошибку из правила №1 и подключает дорожку 0.15 мм к выводу smd резистора 1206. В другом случае наоборот, использует проводник ширина которого равна ширине контактной площадки. Оба варианта плохие.

ПРАВИЛО №2 — ПОДКЛЮЧЕНИЕ К ВЫВОДАМ

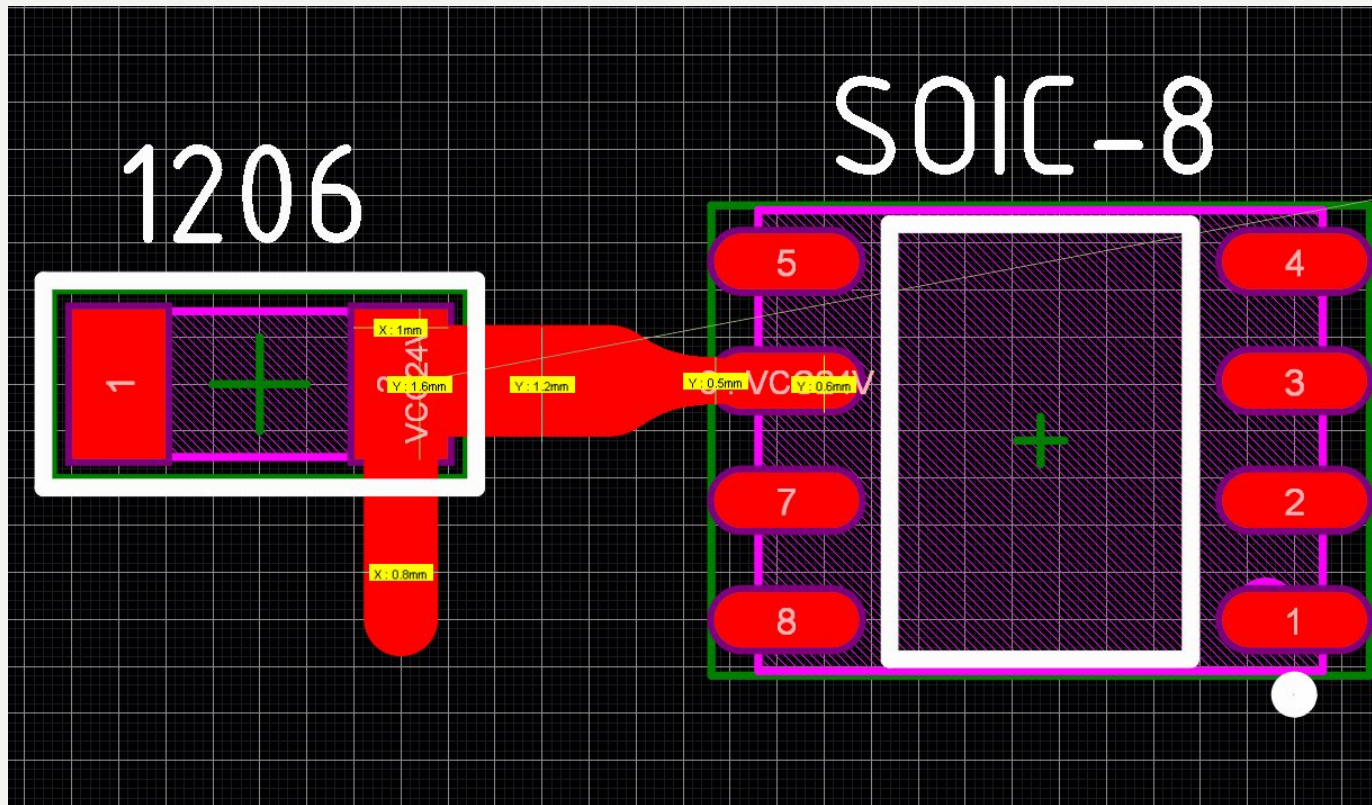
- **Проблема №1** — низкая механическая прочность. При нескольких попытках перепайки компонента, площадка или дорожка просто отслоятся от текстолитовой основы печатной платы.
- **Проблема №2** — технологические проблемы с монтажом платы. Хотя это станет проблемой, если вы начнете заказывать в Китае не только платы, но и сборку. Вам конечно соберут, но % брака вырастает.
- **Решение** — ширина проводника, подключаемого к контактной площадке, должна составлять примерно 80% от ширины этой площадки.

ПРИМЕР:

Плохо

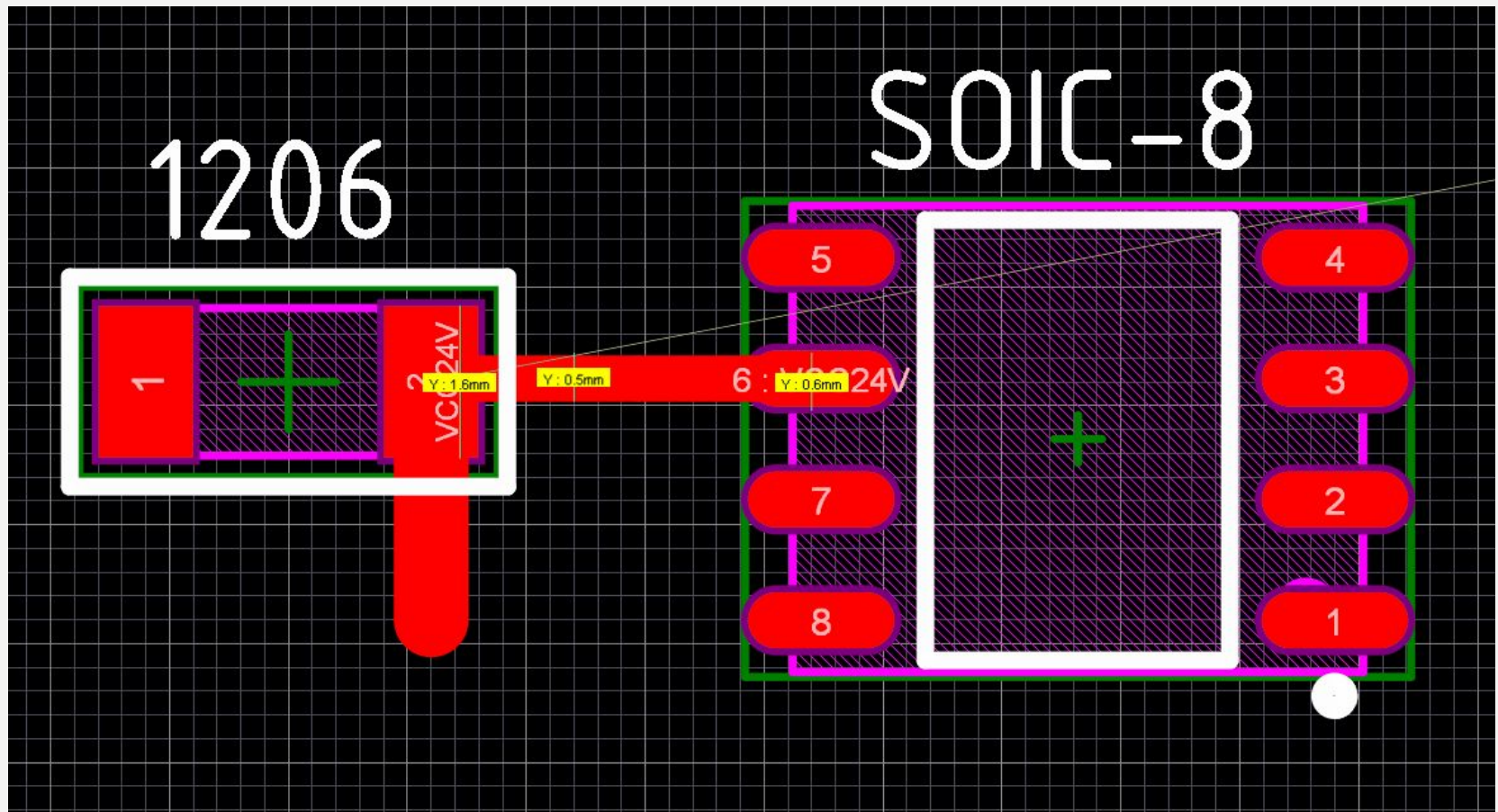


Хорошо



- Размер площадки конденсатора 1206 в данном случае составляет **1.6 x 1 мм**. Соответственно для подведения сигнала снизу используется дорожка равная 80% от ширины площадки, то есть 0.8 мм (80% от 1 мм). Для подведения сигнала справа используется дорожка толщиной 1.2 мм (примерно 80% от 1.6 мм). Ширина площадки у микросхемы в корпусе SOIC-8 равна 0.6 мм, поэтому подводить нужно сигнал с помощью дорожки около 0.5 мм.

- Стоит понимать, что данный вариант является идеальным. Переход из 1.2 мм в 0.5 мм вам наверняка не понравится — лишняя возня. Его можно избежать. Для этого обычно принимают ширину дорожки относительно минимального рад-а (площадки), то есть в данном случае можно сделать вот так:



ПРАВИЛО №3 — ЦЕПИ ПИТАНИЯ

- Теперь рассмотрим случай, когда упрощение в отношении правила №2 просто недопустимо, а именно — проектирование цепей питания. Данное правило опирается на два предыдущих и является частным, но пожалуй самым критичным случаем.
- **Ошибка** — пренебрежение правилами №1 и №2 при проектировании цепей питания.
- **Проблема №1** — на выходе вашего стабилизатора напряжения строго +3.3В. Вы включаете устройство и наблюдаете, что микросхема ведет себя неадекватно, АЦП измеряет не точно и периодически выключается. Вы измеряете напряжение на ногах потребителя (микросхемы) и обнаруживаете вместо +3.3В всего лишь +2.6В.

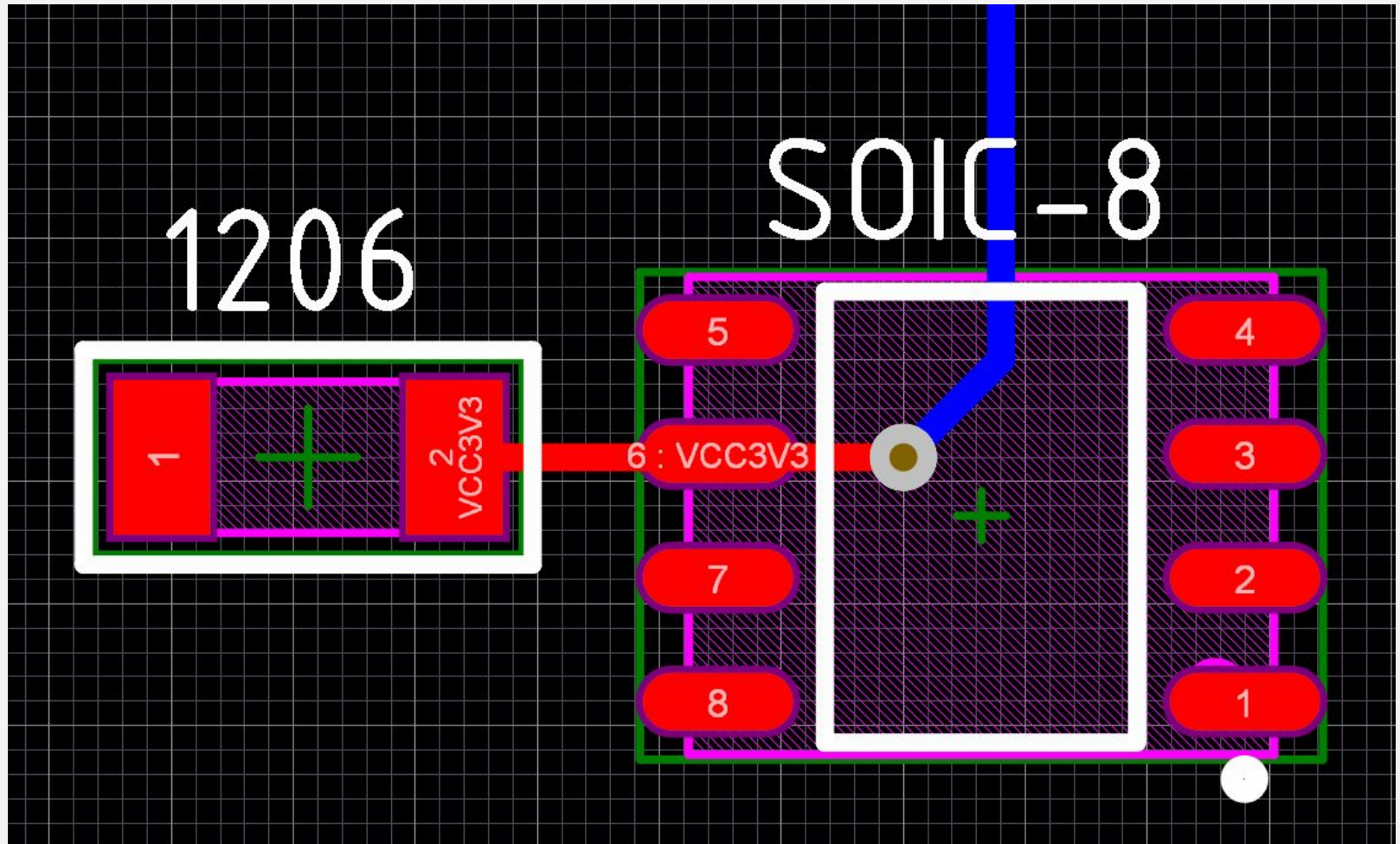
ПРАВИЛО №3 — ЦЕПИ ПИТАНИЯ

- **Проблема №2** — ваш DC-DC преобразователь не запускается, либо на выходе имеет большие пульсации.
- **Проблема №3** — в попытках найти неисправность, вы ставите щуп осциллографа на линию +3.3В и обнаруживаете там вместо постоянного напряжения какие-то страшные пульсации и помехи.

Решение — соблюдаем особо строго и фанатично правила №1 и №2. Дорожки максимально широкие. Питание должно приходиться на микросхему через керамический конденсатор, который по возможности ставят ближе к выводу этой микросхемы.

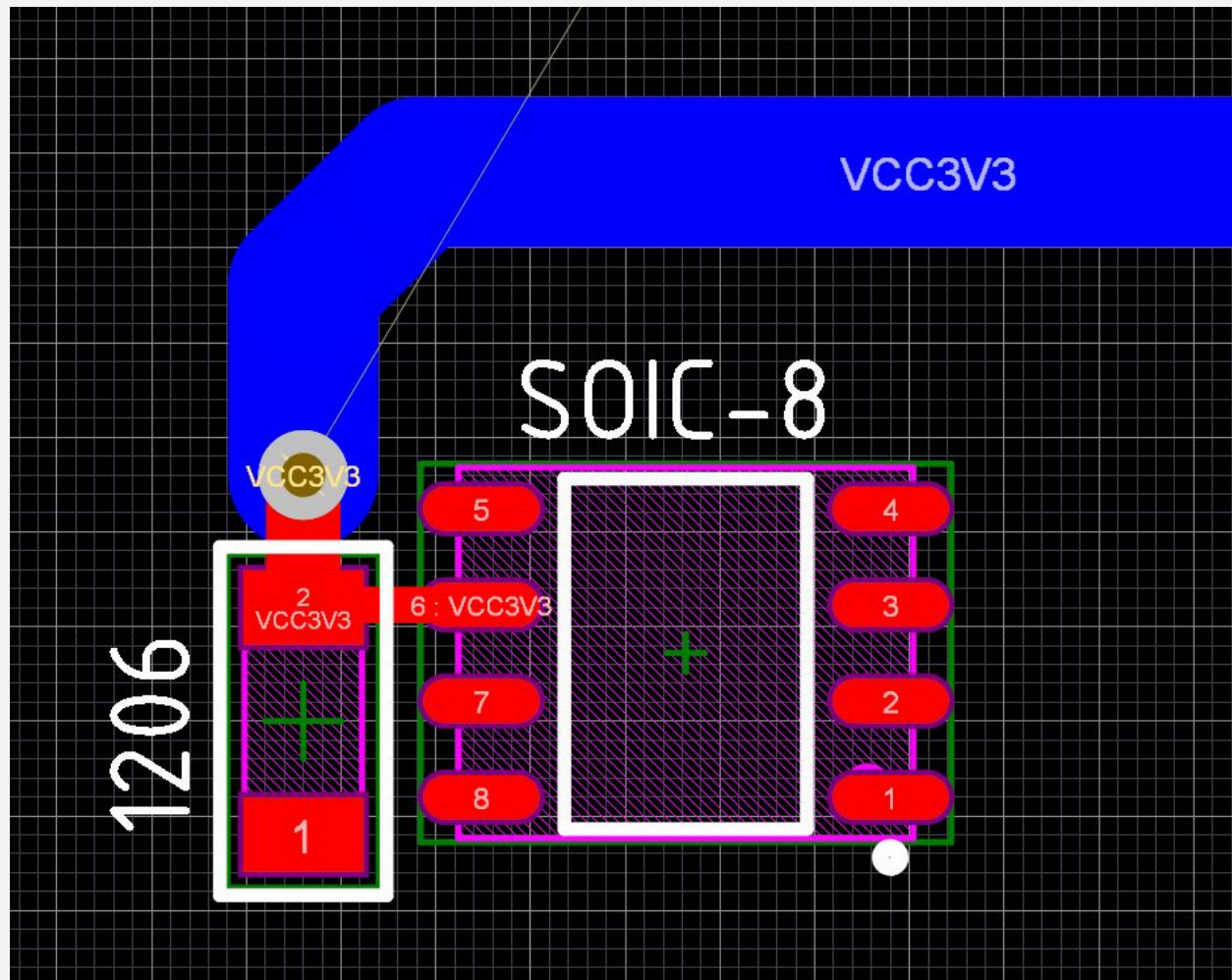
ПРИМЕР:

Плохо



ПРИМЕР:

Хорошо



Хорошо

Что сделано, чтобы стало

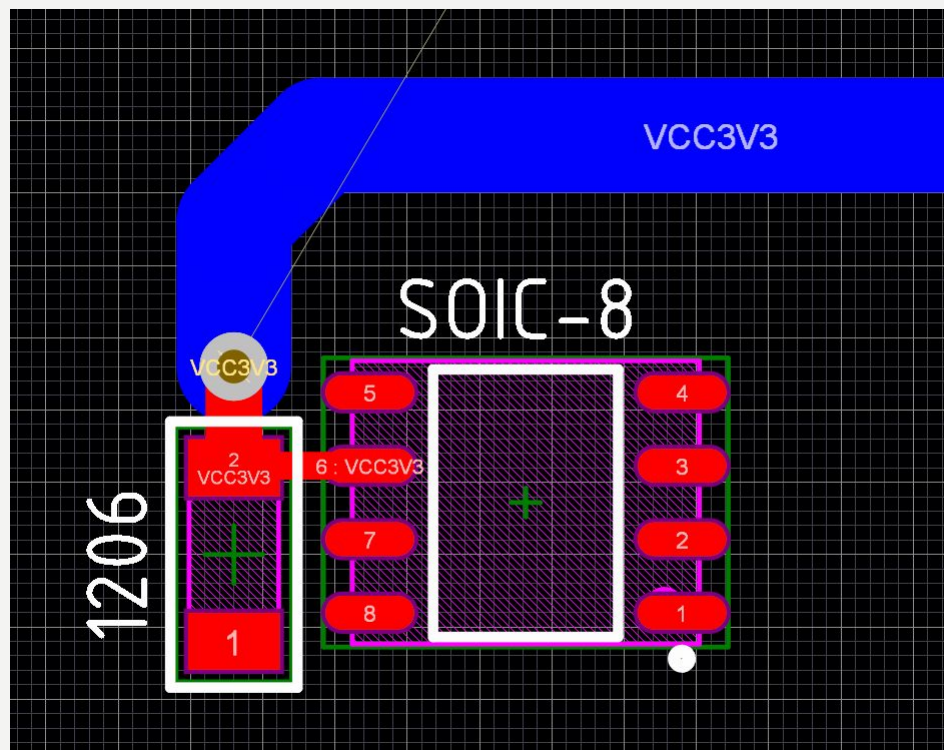
хорошо:

1) Дорожка питания $VCC3V3$ теперь подходит не в обход конденсатора, а через него. То есть сначала на конденсатор, а затем уже на вывод микросхемы

2) Переходное отверстие (via) используем размером $1.2/0.6$ мм. Да, согласно требованиям для 4 класса точности (стандартного), я могу использовать переходное

отверстие размером $0.7/0.3$ мм, но возможно применение более габаритного перехода. Это позволило уменьшить его сопротивление и пропустить больший ток

3) Шина питания, которая приходит от стабилизатора у меня теперь не 0.3 мм, а 2 мм! Не бойтесь делать широкие проводники. Такой подход минимизирует падение напряжения в цепи и уменьшит индуктивность проводника



ПРАВИЛО №4 — ЗЕМЛЯ

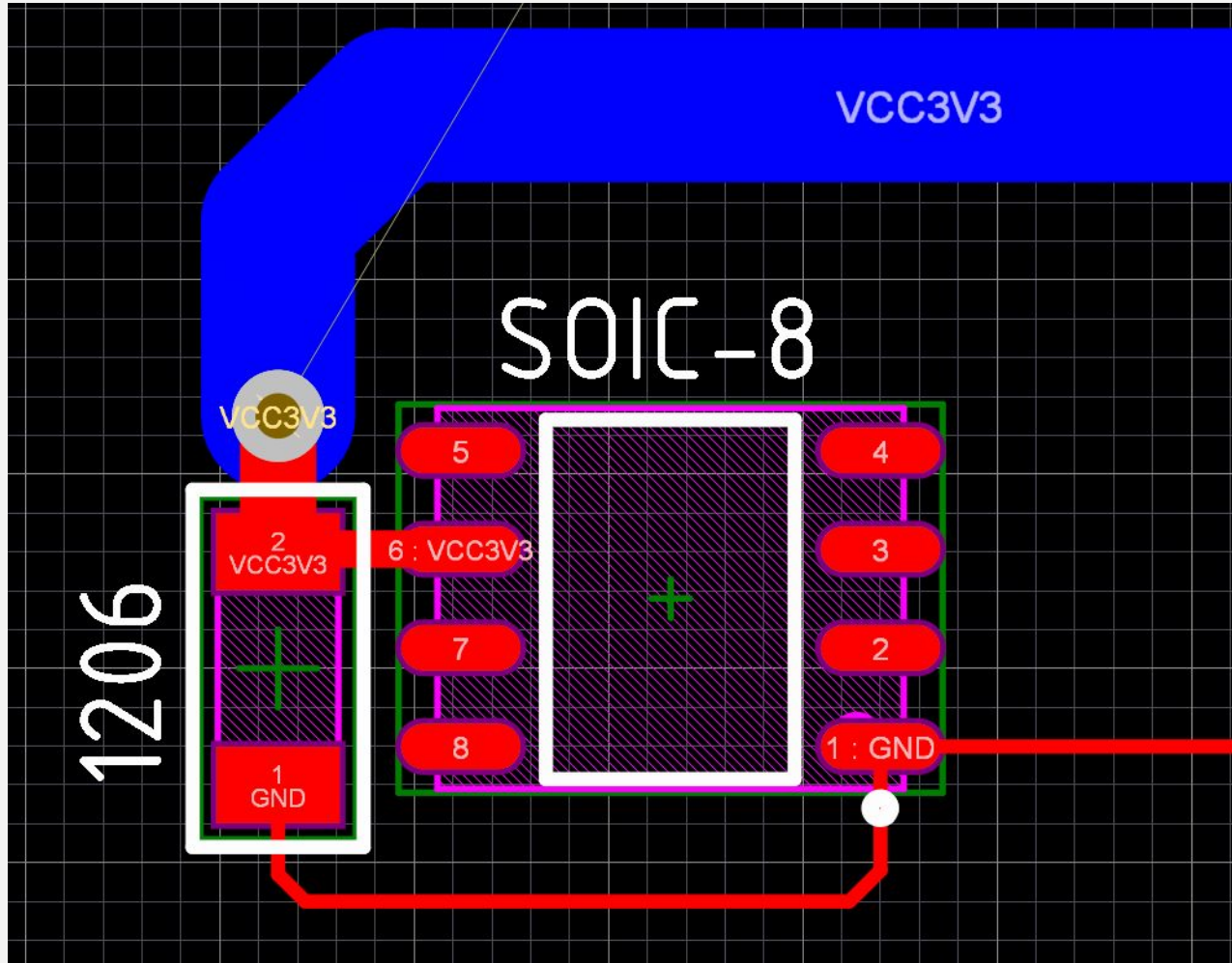
- О влиянии качества проектирования земляной шины (GND) можно говорить вечно, но любой разговор сводится к простой сути: *стабильно и работоспособность устройства в наибольшей степени зависит именно от проектирования земли*. Данная проблема очень объемная и требует глубокого изучения, поэтому я дам самые базовые рекомендации.
- **Ошибка** — трассировка цепи GND (земли) обычным проводником, да еще и минимальной ширины.

ПРАВИЛО №4 — ЗЕМЛЯ

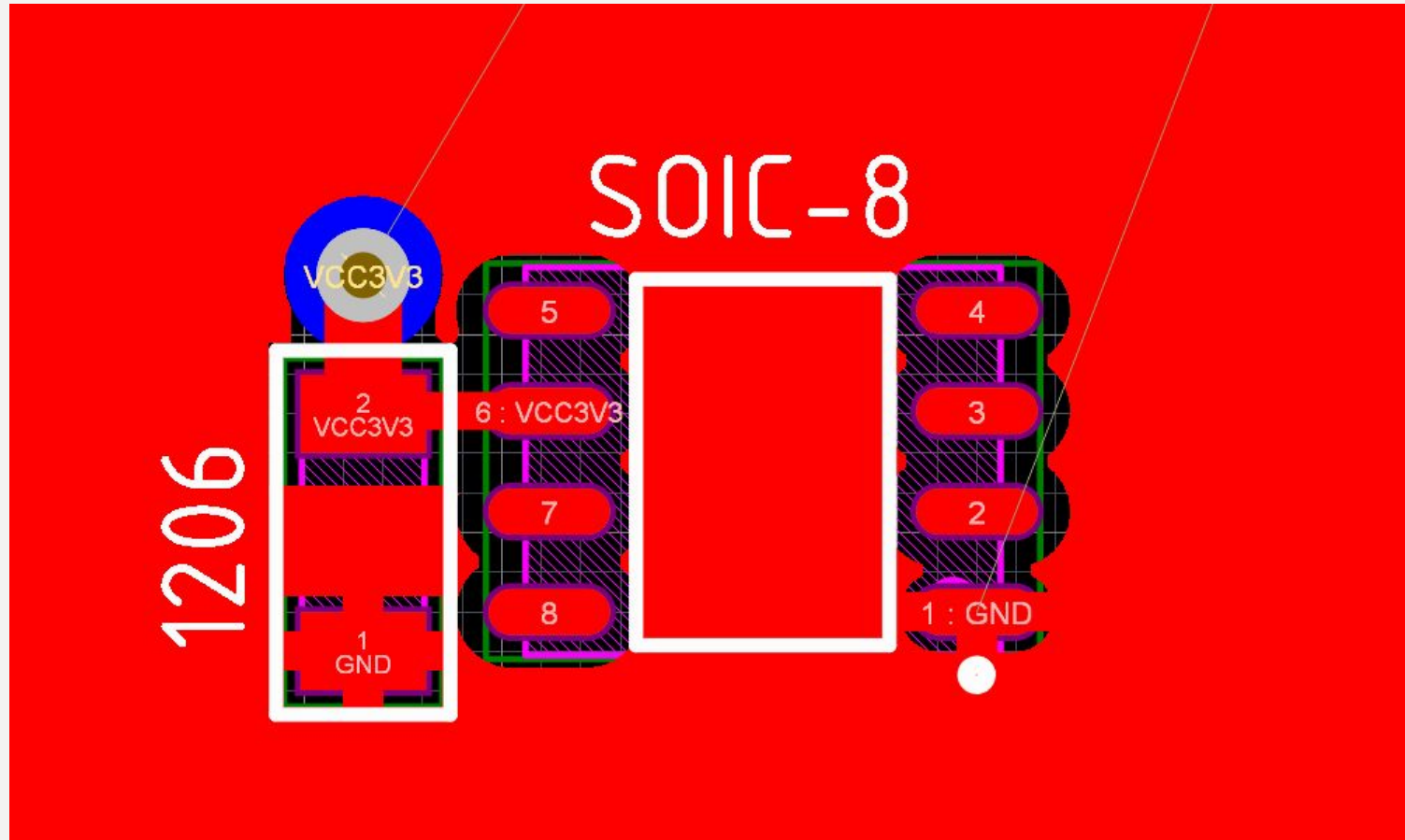
- **Проблема №1** — нестабильность работы устройства и сильные помехи в цепях, особенно в цепях питания.
- **Проблема №2** — нагрев и часто обрыв тонкого проводника, т. к. в нем действует большой ток.
- **Решение** — использовать полигон для разводки цепи GND, а в идеале отдельный слой, который полностью выделен для данной цепи, например, нижний слой.

ПРИМЕР:

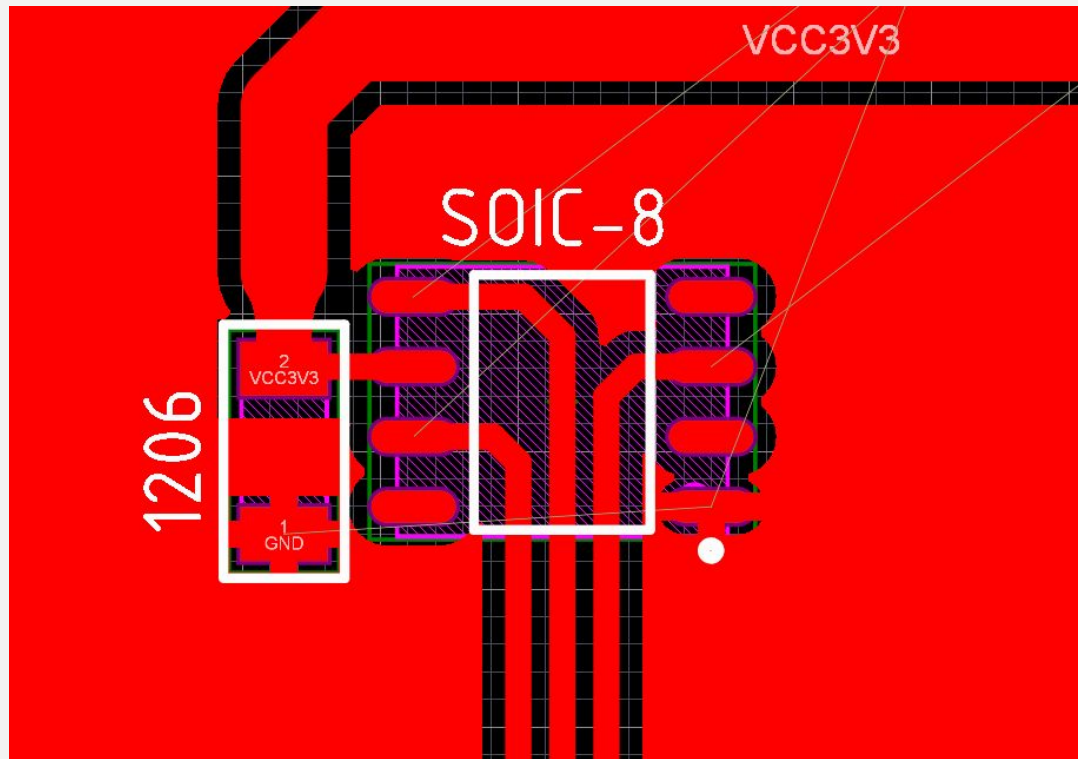
Плохо



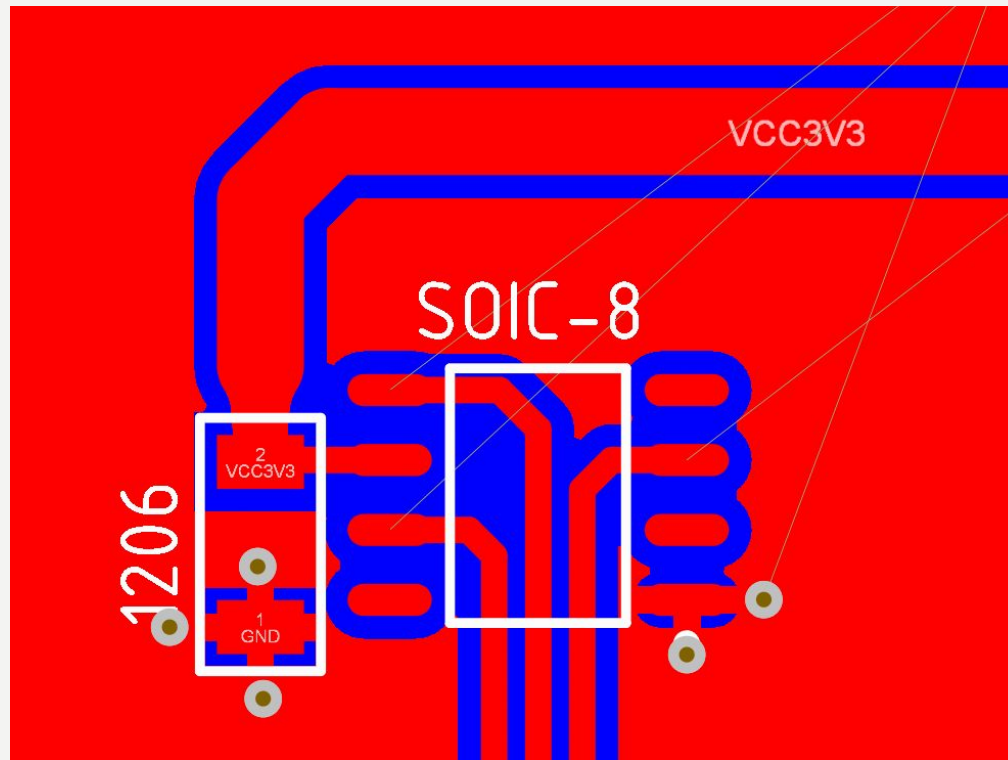
Хорошо



Как видите, вместо обычного проводника применена заливка сплошным полигоном. Такое решение обеспечило огромную площадь сечения, ведь полигон - это просто очень большой проводник. Только иногда такое решение имеет недостаток, например, когда плотность монтажа высокая и другие проводники разрывают сплошной полигон, как тут цепи *LED1..3* разрывают кратчайший путь между выводом микросхемы и конденсатора (GND):



Тут поможет, упомянутый ранее, отдельный слой GND. В двухслойной плате в идеале под него выделить нижний слой, а в многослойной плате — один из внутренних слоев:



Таким образом мы восстановили кратчайший путь для тока по цепи GND, а помог в данном случае нижний слой (синий цвет), который из себя полностью представляет земляной полигон. Переходные отверстия (via) около контактных площадок обеспечили для них максимально короткое соединение с нижним слоем земли.

Конечно это идеальный случай и иногда не получится его реализовать без удорожания платы, поэтому тут решение за вами. Порой «супер» надежность и не нужна, тут важно найти для своей задачи золотую середину между стоимостью и качеством.

ПРАВИЛО №5 — ШИРИНА ЗАЗОРА

- Минимальное значение зазора между медными проводниками на печатной плате, нам диктуют технологические требования. Для 4-го (стандартного) класса значение составляет 0.15/0.15 мм или 6/6 mils. Максимальная ширина ограничена лишь вашей фантазией, габаритами платы и здравым смыслом.
- **Ошибка** — зазор недостаточно большой, обычно оставляют значение по умолчанию около 0.15 мм.
- **Проблема №1** — электрический пробой. Короткое замыкание возникает, когда 2 проводника с разным потенциалом замыкают, например, металлическим предметом и ток резко возрастает. К сожалению идеальных диэлектрических материалов не бывает и в какой-то момент любой материал начинает проводить ток.

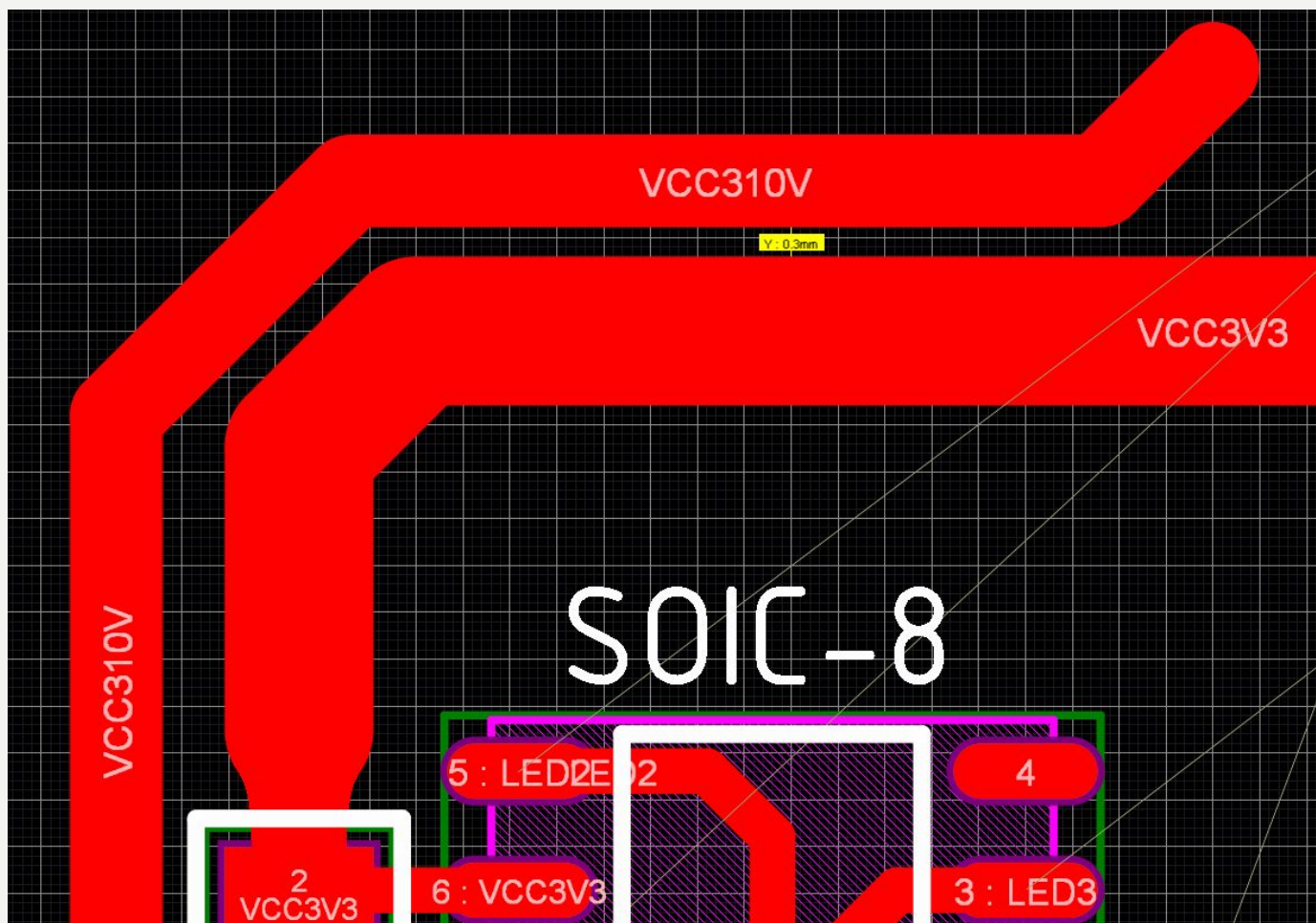
Пример тому — изоляторы на ЛЭП, иногда и их пробивает. Данное явление происходит, когда превышено значение *критического напряжения пробоя*. По этой же причине и стеклотекстолит, являющийся основой большинства печатных плат, в какой-то момент может начать пропускать ток.

ПРАВИЛО №5 — ШИРИНА ЗАЗОРА

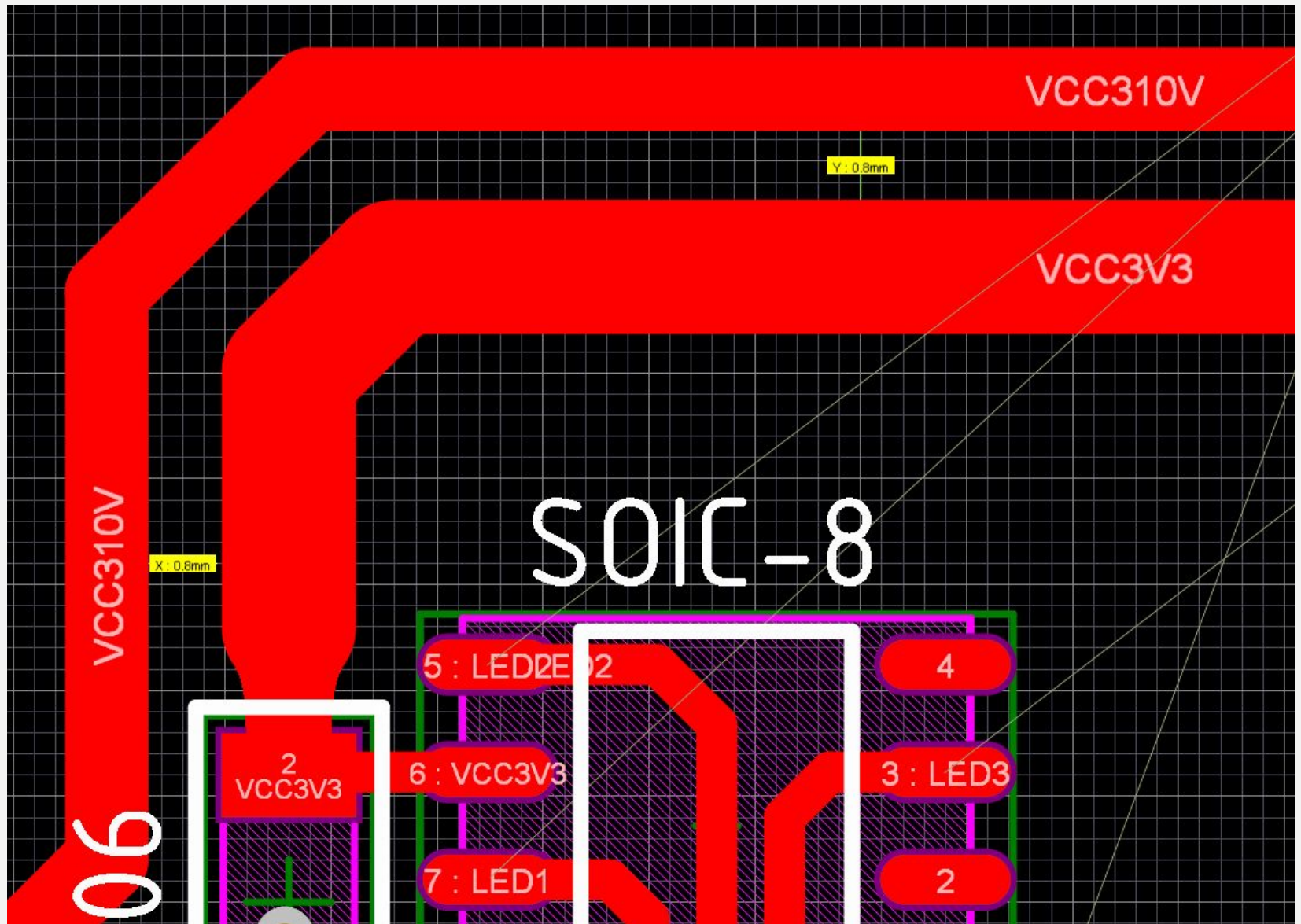
- **Решение** — увеличение расстояния между проводниками. Напряжение пробоя зависит от типа материала и от толщины/ширины изолятора. В случае печатных плат — расстояние (зазор) между проводниками как раз является тем параметром, который влияет на критического значение напряжения пробоя. **Чем больше расстояние между проводниками, тем большее напряжение необходимо чтобы пробить его.**
- Пробой по стеклотекстолиту не всегда самая актуальная проблема. Воздух, который окружает плату, тоже является диэлектриком, но при определенных условиях становится проводником, вспомните грозу. Воздушный электрический пробой большая проблема в электронике, особенно если учитывать, что воздух может быть сухой, а может и иметь влажность 90-100%, например, в тропиках или на Севере.

ПРИМЕР:

Плохо



Хорошо



- Почему 0.3 мм плохо, а 0.8 мм уже хорошо спросите вы и в качестве ответа приведу вам 2 источника:

1) Обычные физика и электротехника. Данные в них разнятся из-за различных методик измерений и прочего, но наиболее реалистичная цифра **для сухого воздуха** составляет **2 кВ/мм**. Тут многие испугаются цифры и подумают: «У меня же нет таких напряжений» и это будет ошибкой. Данное значение характерно лишь для сухого воздуха, который встретить в реальных условиях удастся редко. И тут цифры уже куда скромнее, например, при влажности 100% напряжение пробоя воздуха составляет всего **250 В/мм!** А еще на значение напряжения пробоя влияет запыленность воздуха и платы, а так же атмосферное давление.

- 2) Стандарт IPC-2221. Интересует нас таблица 6-1, которая ВЫГЛЯДИТ ВОТ ТАК:

Table 6-1 Electrical Conductor Spacing

Voltage Between Conductors (DC or AC Peaks)	Minimum Spacing						
	Bare Board				Assembly		
	B1	B2	B3	B4	A5	A6	A7
0-15	0.05 mm [0.00197 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.05 mm [0.00197 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]
16-30	0.05 mm [0.00197 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.05 mm [0.00197 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.25 mm [0.00984 in]	0.13 mm [0.00512 in]
31-50	0.1 mm [0.0039 in]	0.6 mm [0.024 in]	0.6 mm [0.024 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.13 mm [0.00512 in]
51-100	0.1 mm [0.0039 in]	0.6 mm [0.024 in]	1.5 mm [0.0591 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.5 mm [0.020 in]	0.13 mm [0.00512 in]
101-150	0.2 mm [0.0079 in]	0.6 mm [0.024 in]	3.2 mm [0.126 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.4 mm [0.016 in]
151-170	0.2 mm [0.0079 in]	1.25 mm [0.0492 in]	3.2 mm [0.126 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.4 mm [0.016 in]
171-250	0.2 mm [0.0079 in]	1.25 mm [0.0492 in]	6.4 mm [0.252 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.4 mm [0.016 in]
251-300	0.2 mm [0.0079 in]	1.25 mm [0.0492 in]	12.5 mm [0.4921 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.8 mm [0.031 in]
301-500	0.25 mm [0.00984 in]	2.5 mm [0.0984 in]	12.5 mm [0.4921 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.8 mm [0.031 in]	1.5 mm [0.0591 in]	0.8 mm [0.031 in]
> 500 See para. 6.3 for calc.	0.0025 mm /volt	0.005 mm /volt	0.025 mm /volt	0.00305 mm /volt	0.00305 mm /volt	0.00305 mm /volt	0.00305 mm /volt

B1 - Internal Conductors

B2 - External Conductors, uncoated, sea level to 3050 m [10,007 feet]

B3 - External Conductors, uncoated, over 3050 m [10,007 feet]

B4 - External Conductors, with permanent polymer coating (any elevation)

A5 - External Conductors, with conformal coating over assembly (any elevation)

A6 - External Component lead/termination, uncoated, sea level to 3050 m [10,007 feet]

A7 - External Component lead termination, with conformal coating (any elevation)

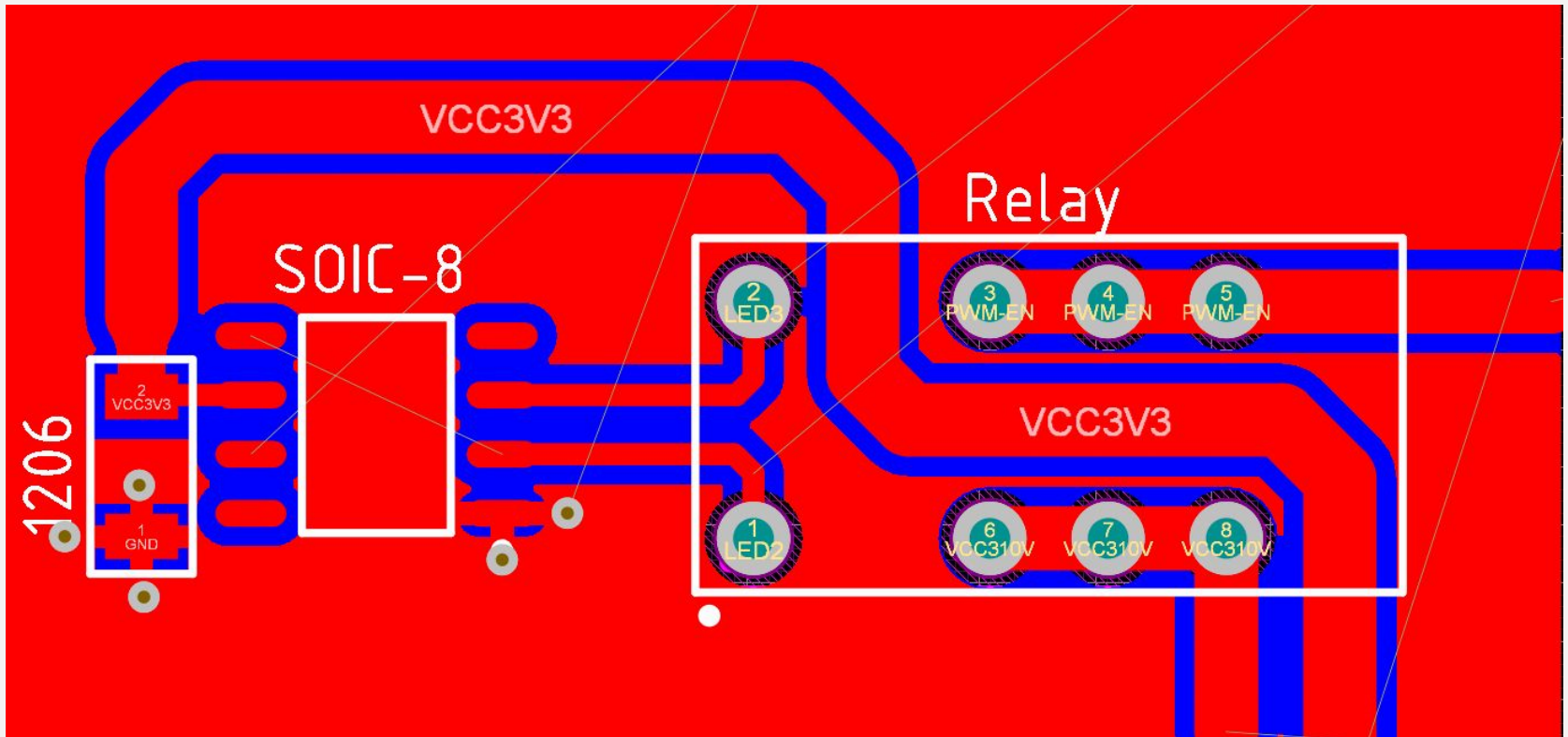
- Как видите в таблице для большое количество значений даже для нашего конкретного случая **301-500В**. Если посмотрим, то увидим значение 0.25 мм для закрытых проводников на внутренних слоях, то есть в «идеальных» условиях без доступа пыли, грязи и влаги. Если устройство будет работать где-то в горах и проводник находится на внешних слоях (все проводники в случае 2-х слойной платы) на высоте до 3000 метров, то там минимальный зазор уже 2,5 мм, то есть в 10 раза больше. Если же мы эксплуатируем устройство на большей высоте, то зазор необходим уже в 12.5 мм! Стоит сделать замечание — такой большой зазор требуется если наша плата не покрыта защитными составами, например, лаком или компаундом. Как только появляется защитное покрытие, то мы видим уже более адекватные значения: **0.8** и **1.5** мм.
- Поэтому в «хорошем» примере по мимо обеспечения зазора 0.8 мм, необходимо так же покрыть плату защитных составом, например, лаком после завершения монтажа устройства, его отмывки и сушки. В противном случае необходимо увеличить зазор!

ПРАВИЛО №6 — ГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЗАЗОР

- **Ошибка** — приравнивание диэлектрического зазора к гальваническому. По сути они очень похожи, но по требованиям все строже, когда дело доходит до гальванической развязки. Ярким случаем является развязка схемы управления и силовой части с помощью реле или оптрона, когда зазор между развязанными сторонами выбирается так же 0.8 или 1,5 мм.
- **Проблема №1** — пробой изоляции, выход из строя системы управления и прочего дорогого оборудования.
- **Решение** — увеличение порога электрического пробоя. Стандартными значениями обычно являются напряжения 1,5 кВ, 2,5 кВ и 4 кВ. Если ваше устройство работает с сетевым напряжением, но человек напрямую с ним не взаимодействует, то напряжение развязки в 1,5 кВ будет достаточным. Если предполагается взаимодействие человека с устройством, например, через кнопки и прочие органы управления, то рекомендую применить изоляцию с напряжением 2,5 кВ и более.

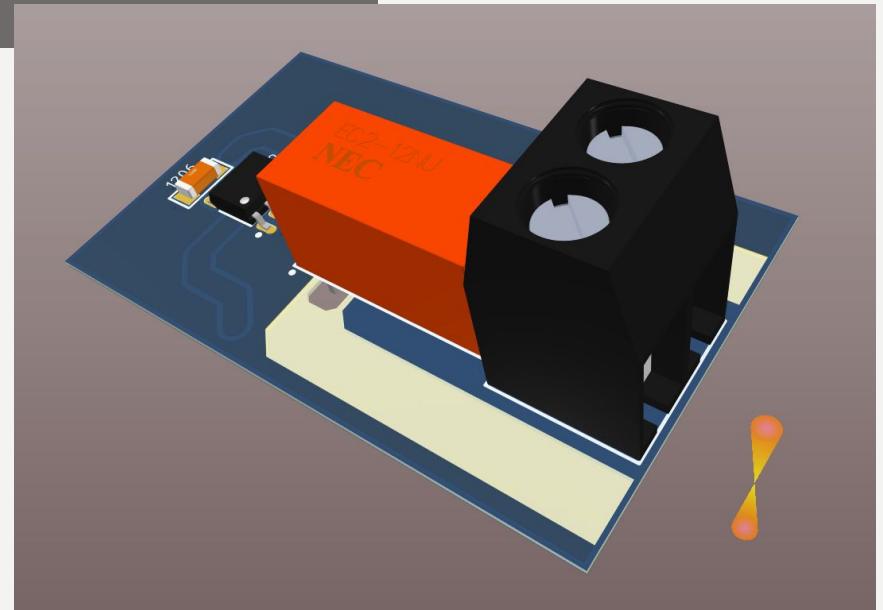
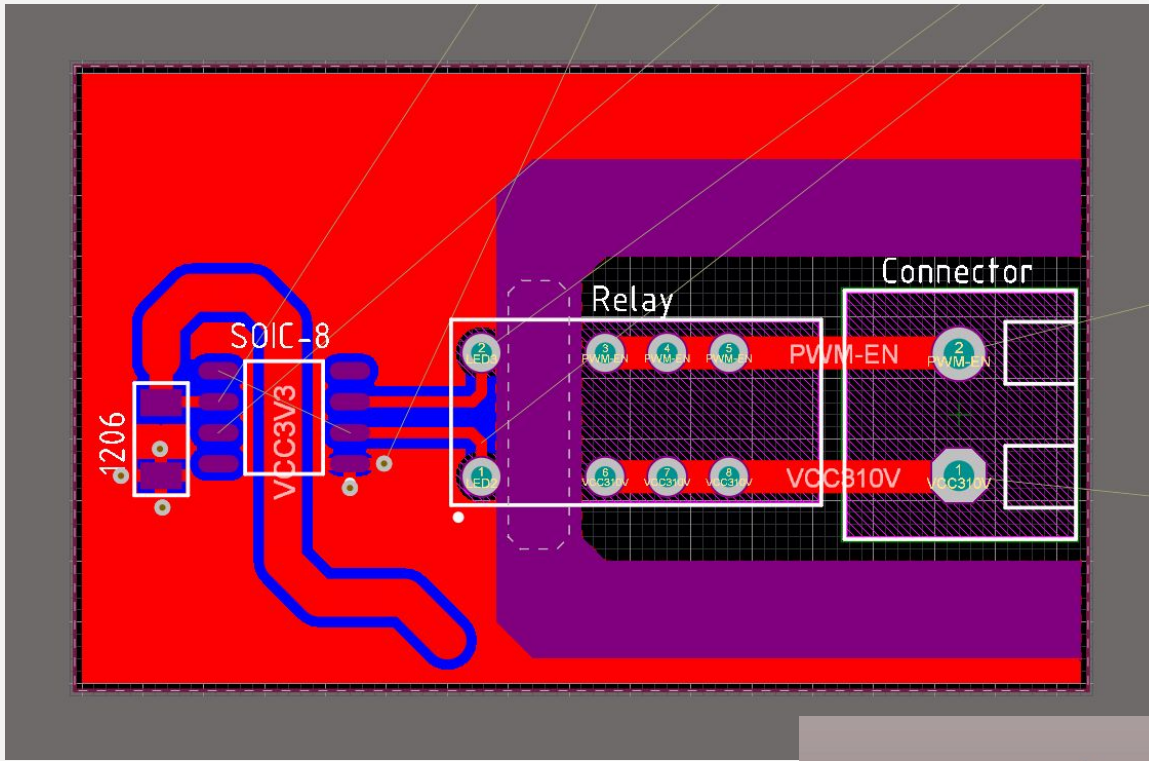
ПРИМЕР:

Плохо



Что плохого спросите вы, ведь зазоры на плате есть, их можно сделать и 1,5 мм. Дело в том, что даже если сделать зазор 2 мм, то этого будет недостаточным для обеспечения изоляции. Самым «слабым» местом должно быть расстояние между выводами управления реле (1-2) и выводами силовыми (3-8). Так же надо учитывать, что пробой может быть не только между проводниками на одном слое, но и на разных — насквозь плату через стеклотекстолит.

Хорошо



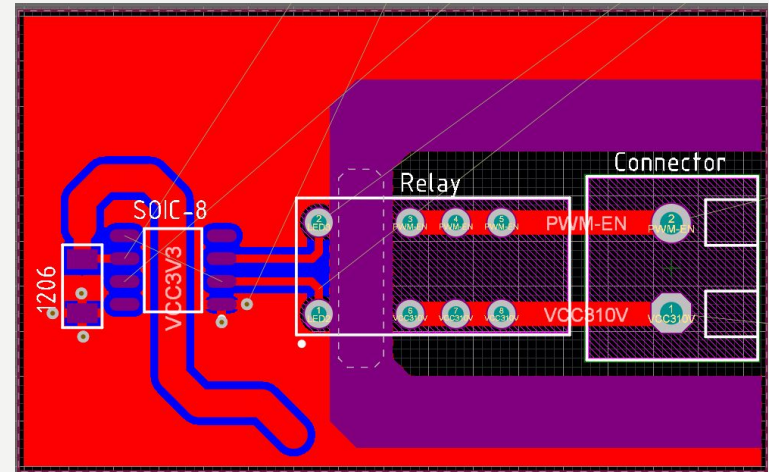
• Что было сделано для улучшения ситуации:

а) Появилась четкая граница между низковольтной и высоковольтной частью. Теперь проводник +3.3В не проходит в высоковольтной области +310В, полигон GND не выходит за границу

низковольтной части, соответственно и пробоя не будет. Так же в зоне/границе гальванической развязки не должно быть вообще ничего.

б) Изолирующая зона освобождена от паяльной маски. Маска — тоже слабое место и в зависимости от качества ее пробьет раньше, чем стеклотекстолит. Это делать не обязательно в общем случае, но если с устройством взаимодействуют люди, то настоятельно рекомендуется.

в) Слабое место — расстояние между управляющими и силовыми выводами реле. Везде сделана изолирующую зону 4 мм, а тут только 2.5 мм. От маски очистили, от проводников тоже и единственное через что может произойти пробой по плате — стеклотекстолит. Поэтому убираем и его, я сделал вырез под реле шириной 2.5 мм и убрал весь текстолит между выводами. Данная операция тоже не обязательна, но существенно повышает надежность и безопасность вашего устройства.

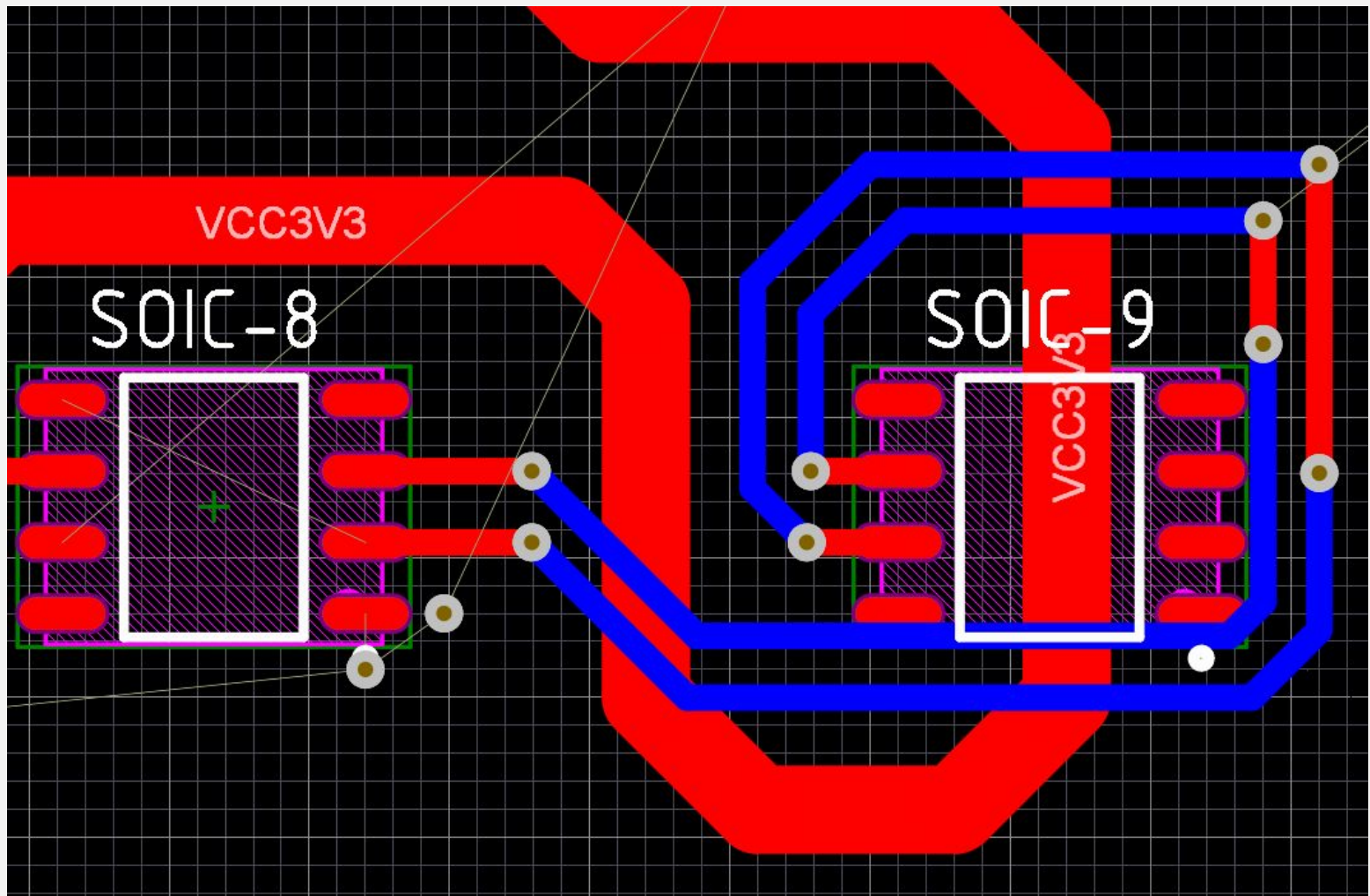


ПРАВИЛО №7 — ПЕРЕХОДНЫЕ ОТВЕРСТИЯ

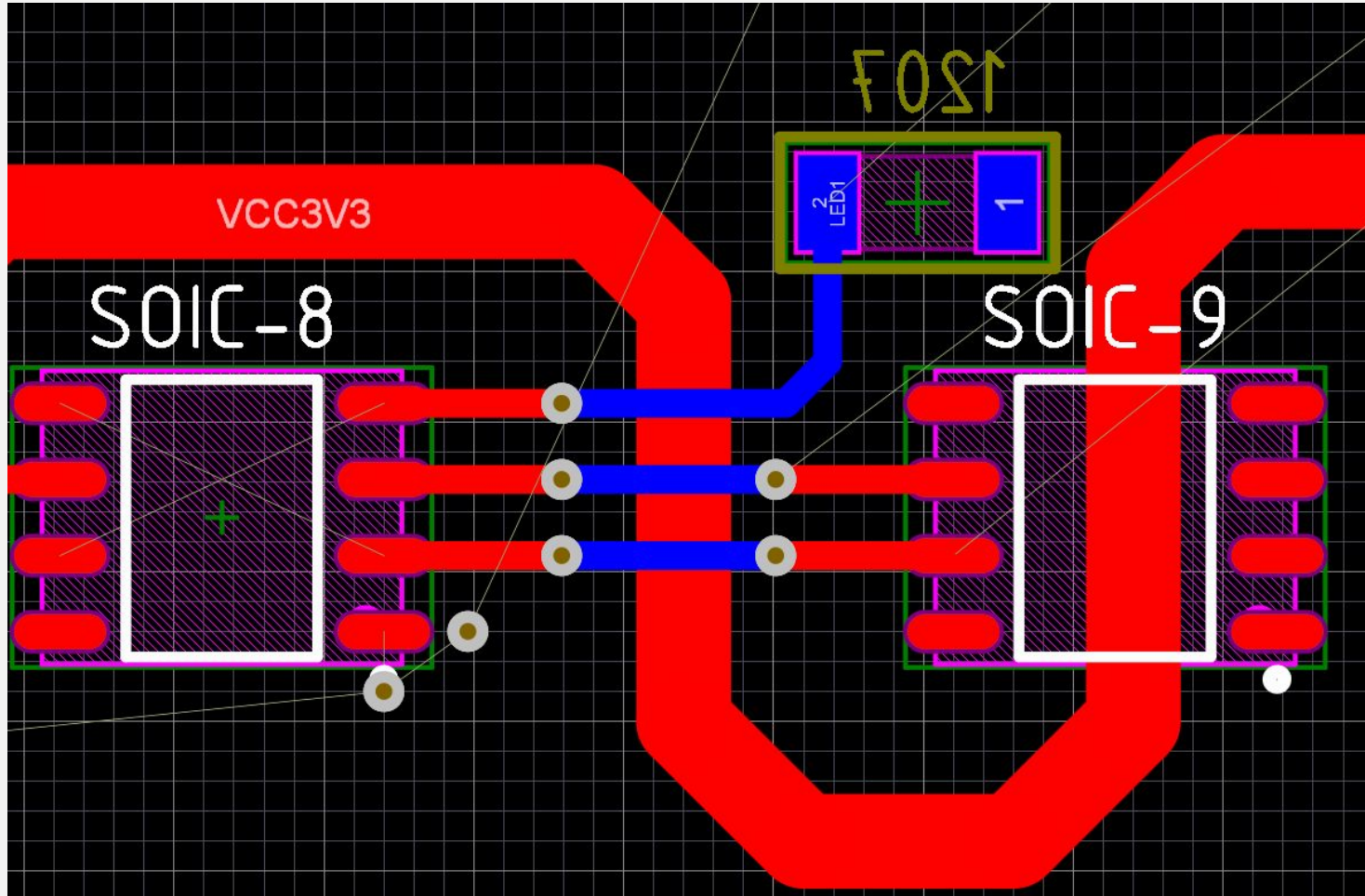
- **Ошибка** — очень часто наблюдается картина, когда на 2-х слойной печатной плате для того, чтобы соединить 2 контактные площадки, используют 3..4... или даже 5 переходных отверстий.
- **Проблема №1** — переходных отверстий (via) становится слишком много на плате и это ограничивает место под проводники, что приводит к удлинению цепей, а следовательно и к увеличению их сопротивления. Уменьшает устойчивость цепей и сигналов к помехам.
- **Решение** — используйте минимальное количество переходных отверстий: если вам нужно соединить 2 контакта на разных слоях, то не используйте более 1-го переходного отверстия. Если 2 контакта находятся на одном слое и вы не можете соединить их напрямую, то используйте максимум 2 переходных отверстия. Если вам нужно больше переходов для соединения, то что-то вы делаете не так — тренируйте логику и переразводите участок платы, который привел к проблеме.

ПРИМЕР:

Плохо



Хорошо



Для соединения использовано минимальное количество переходных отверстий (via), что дает больше свободного места для других проводников и обеспечивает минимальные паразитные параметры проводника.

НЕСКОЛЬКО ОБЩИХ СОВЕТОВ

- Не используйте автотрассировщики! В «сыром» не настроенном виде они выдают ужасный результат. Для того, чтобы автотрассировщик работал хорошо, ему необходимо прописать определённые правила, которые скажут ему, что дороги надо не 0.15, а 1 мм и так далее. Для адекватного результата даже на простых платах приходится прописывать сотню, а то и две, этих самих правил. В Altium Designer под них выделен целый раздел, например. Если вы любитель и у вас не стоит задачи спроектировать свою плату для ноутбука, то разводите плату руками — выйдет быстрее и качество будет на высоте.
- Не ленитесь переделывать плату. Часто бывает, что вы сделали плату на 90%, но дальше все стало туго и вы начинаете нарушать «правила». Откатитесь назад, иногда приходится откатываться в самое начало, сделайте работу качественно и на этапе отладки устройства вы сэкономите очень много времени и нервов.
- Перед тем как начать проектировать плату, посмотрите несколько open source проектов, например, на хабре или hackaday. Главное не копируйте оттуда чужие очевидные ошибки.
- Если у вас есть знакомые разработчики электроники, пускай тоже любители — дайте им на проверку. Свежий взгляд на ваш проект позволит избежать очень много ошибок.

Несколько уточнений:

Правило 1: «используйте максимально возможную ширину проводников» — не всегда верно. Недостаток широких проводников — большая ёмкость. Для цифровых цепей большая ёмкость может привести к завалу фронтов сигналов настолько, что на высокой частоте напряжение не успеет достигнуть нужного для уверенного детектирования уровня за нужное время. Использование очень длинных и широких печатных проводников, проложенных над полигоном земли, может даже привести к перегреву маломощных ключей на выходах микросхем. Поэтому как правило не стоит использовать для цифровых цепей проводники шириной более 1 мм, а для многослойных плат со слоем земли длинные печатные проводники над неразрывным слоем земли или питания не стоит делать шире 0,5 мм. Для аналоговых цепей влияние паразитной ёмкости часто ещё существеннее, особенно когда проводники аналоговых цепей пересекаются с цифровыми или силовыми. Если таких пересечений не удаётся избежать — ширину проводников аналоговой цепи в этом месте лучше сделать минимальной.

Правило 2: «ширина проводника, подключаемого к контактной площадке, должна составлять примерно 80% от ширины этой площадки» — проблемы с пайкой возникают из-за того, что в случае широкой дорожки или полигона тепло паяльника уходит от точки пайки слишком быстро. Это приводит к тому, что эту площадку приходится греть дольше чем соседние, а при ручном монтаже «на автомате» она часто остаётся непропаянной. А если на плате нет паяльной маски — на дорожки может утекать не только тепло, но и припой. Решение — использование контактных площадок с термобарьером. При этом площадка подключается к широкой дорожке или полигону одной или несколькими узкими короткими перемычками, которые не сильно увеличивают паразитную индуктивность, но препятствуют утечке тепла.

Несколько уточнений:

Правило №3 — «Дорожки максимально широкие. Питание должно приходиться на микросхему через керамический конденсатор» — здесь стоит заметить, что не столь важно, чтобы дорожка питания приходила на конденсатор, а не на ножку, зато важна индуктивность и сопротивление переходных отверстий — их нужно делать большого диаметра, а лучше — несколько рядом. Толщина металлизации переходных отверстий намного меньше толщины фольги, поэтому при малом диаметре большой импульсный ток может вызывать локальный нагрев металлизации, а много циклов такого нагрева — её отслоение и разрушение. Использовать керамические конденсаторы или танталовые, или и те и другие — зависит от частоты и отдаваемого тока.