

РАЗВОДКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭМС

Аннотация

В последнее время возрастает значимость электромагнитной совместимости (ЭМС) электронных схем и устройств, что повышает требования к электромагнитным свойствам оборудования. Интерес представляют два аспекта: способность схемы генерировать низкоуровневые помехи (или полное отсутствие таковых) и невосприимчивость схемы к внешним электромагнитным воздействиям. Явления в электронных схемах и устройст-

вах достаточно хорошо и полно описаны в соответствующей литературе, однако поведению схемы и помехам уделяется недостаточное внимание. В этой статье приведены важные критерии, определяющие электромагнитную совместимость схем и, таким образом, предоставляющие инженерам-разработчикам необходимую информацию для дизайна схем, а также компоновки и разводки печатных плат.

Введение

ЭМС электронной схемы определяется, главным образом, тем, как компоненты расположены друг относительно друга и как выполнены электрические соединения между самими компонентами. Каждый ток, протекающий по проводнику, порождает обратный ток такой же величины, протекающий по соответствующему

проводнику. Создающаяся при этом петля представляет собой антенну, которая может излучать электромагнитную энергию с величиной, определяющейся амплитудой тока, периодом повторения сигнала и геометрическими размерами токовой петли. На рисунке 1 показаны пути токов для типовой схемы.

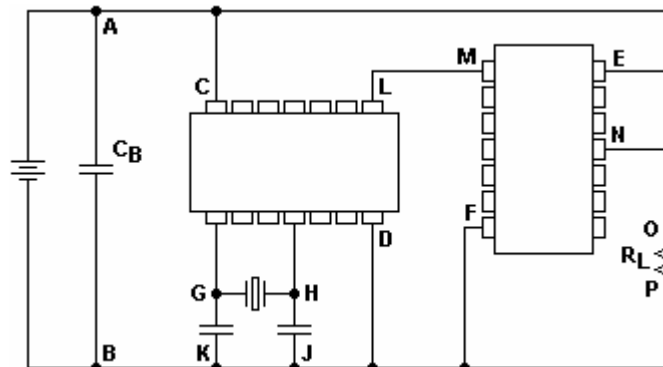


Рис 1. Пути токов электронной схемы

Проводники, в различной степени способствующие генерации нежелательного излучения, разделены на следующие категории:

- Шины питания создают петли A–C–D–B и A–E–F–B. По этим шинам передается энергия, необходимая для работы схемы. Поскольку потребляемая мощность не является постоянной величиной, а зависит от состояний компонентов в определенный момент времени, все частотные составляющие, создающиеся этими компонентами, будут представлены на шинах питания. Из-за относительно высокого импеданса шин питания (обычно около 100 Ом) быстрые изменения токов не могут быть подавлены низким выходным сопротивлением источника питания, поэтому данная функция возлагается на раздельный (развязывающий) конденсатор (C_B).

- Добавочные петли формируются сигнальными проводниками L–M–F–D и N–Q–P–F. Площади, создаваемые внутри этих петель, обычно малы, если сигналы располагаются внутри устройства. Однако, по таким проводникам часто передаются высокочастотные сигналы, поэтому эти шины необходимо также принимать во внимание.
- Схема генератора со своими компонентами создает петлю G–H–J–K. Поскольку в этой части схемы обычно присутствуют высокочастотные сигналы, ей должно быть уделено особое внимание, чтобы не допустить появления дополнительного излучения, а размещение компонентов и разводка проводников должны осуществляться так, чтобы минимизировать эффективные площади антенн.

Поведение цифровых схем

Понимание взаимосвязи между отдельными характеристиками логических схем позволяет находить эффективные пути улучшения ЭМС. На примере каскада КМОП интегральной схемы можно объяснить некоторые эффекты, возникающие в устройствах, выполненных и по другой технологии.

На рисунке 2 показана схема простейшего инвертора на n - и p -канальных комплементарных транзисторах. Если напряжение V_I , подаваемое на вход схемы, меньше порогового напряжения (V_{IT-}) n -канального транзистора, то этот транзистор будет находиться в запертом состоянии. В

то же самое время, p -канальный транзистор будет открыт. В другом случае, при входном напряжении $V_I > (V_{CC} - V_{IT+})$, где V_{IT+} – пороговое напряжение p -канального транзистора, ситуация поменяется на обратную – p -канальный транзистор будет заперт, а n -канальный открыт. И в том, и в другом состоянии схемы ток через транзисторы протекать не будет (исключая ток утечки). Таким образом объясняется причина чрезвычайно малого потребляемого тока КМОП схемы, находящейся в состоянии покоя и работающей при отсутствии активной нагрузки.

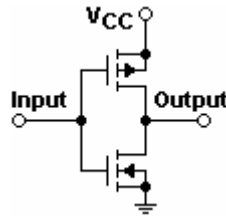


Рис.2. Схема КМОП-инвертора

Однако, если величина входного напряжения находится между двумя значениями (V_{IT} и $V_{CC}-V_{IT}$), то оба транзистора будут находиться в более или менее открытом состоянии. Это приводит к существенному увеличению тока питания (рис. 3), т.е. появляется сквозной

ток. В КМОП-структурах с высокой плотностью компоновки (HCMOS) этот ток может достигать 1 мА, а в так называемых улучшенных КМОП-структурах (advanced CMOS, AC) – даже превосходить 5 мА.

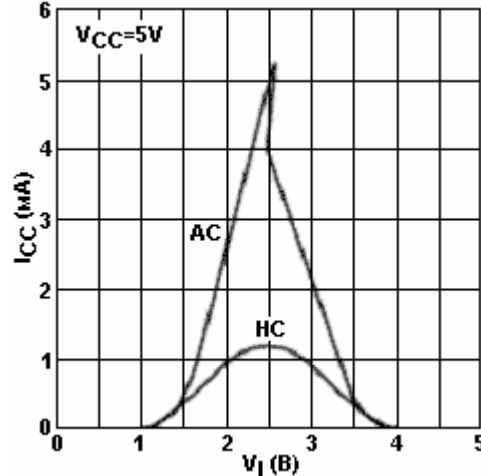


Рис. 3. Ток потребления КМОП-схемы

Поскольку изменение входного напряжения в рассматриваемой схеме не может происходить мгновенно, то в течение времени изменения в токе питания будут присутствовать кратковременные выбросы, величин которых пренебрегать нельзя.

Рассмотренное выше (рис. 3) относится к входным каскадам КМОП интегральной схемы. Значительно более

критически это явление проявляет себя в выходных каскадах. Поскольку они управляют нагрузкой, то размеры выходных транзисторов значительно больше размеров транзисторов входных каскадов. Результатом этого является существенное увеличение сквозного тока от 20 до 60 мА для рассмотренных структур при длительности токовых выбросов от 5 до 10 нс.

Подавление помех на шинах питания

Токовые выбросы, упомянутые ранее, являются одним из наиболее значимых факторов, определяющих электромагнитную помеховую обстановку. Каждый раз, когда выходной каскад переключается из одного состояния в другое, по шинам питания протекает импульсный ток. Проблема обостряется, когда переключения происходят на высокой частоте, например, в проводниках, связывающих процессор с микросхемами быстродействующей памяти.

На практике подавление помех на шинах питания рекомендуется производить включением рядом с интегральной схемой развязывающего керамического конденсатора C_B емкостью 100 нФ (рис. 1). Такой способ подавления помех является эффективным в цифровых

системах. Тем не менее, он будет приводить лишь к незначительному уменьшению электромагнитных помех.

Для достижения значительных улучшений в первую очередь необходимо проанализировать полную схему с паразитными компонентами (рис. 4). Два транзистора (Q1 и Q2) представляют собой выходной каскад интегральной схемы. Их подключение к соседним компонентам осуществляется через цепи $L_p/R_p/C_p$, представляющие паразитные компоненты выводов корпуса:

- L_p – индуктивность вывода от 5 до 30 нГн,
- C_p – емкость вывода от 1,5 пФ до 3 пФ,
- R_p – омическое сопротивление вывода 0,1 Ом.

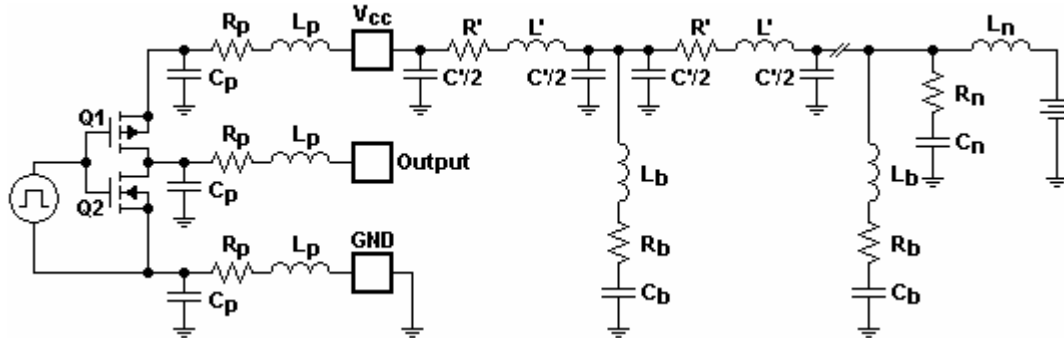


Рис. 4. Схема с паразитными компонентами

Выводы питания VCC и GND подсоединяются к конденсатору C_B и источнику постоянного напряжения (рис. 1). Следующие значения характеризуют импеданс шины питания VCC от источника напряжения до вывода микросхемы:

- L' – индуктивность на единицу длины 5 нГн/см,
- C' – емкость на единицу длины 0,8 пФ/см,
- R' – сопротивление на единицу длины 0,01 Ом/см.

Далее проводник шины питания подходит к первому развязывающему конденсатору C_B (рис. 4, компоненты L_b , R_b и C_b в правой части схемы):

- C_b – типовое значение емкости 100 нФ,
- L_b – индуктивность вывода SMD-корпуса 2 нГн,
- R_b – сопротивление потерь 0,2 Ом.

Затем проводник питания (длина 5 см) подходит к второму развязывающему конденсатору C_B (рис. 4, компоненты L_b , R_b и C_b в центральной части схемы).

Эквивалентная схема этих проводника и конденсатора аналогична рассмотренным ранее.

Для простоты, примем следующие номиналы компонентов для эквивалентной схемы источника питания:

- L_n – индуктивность 5 мкГн,
- C_n – емкость 0,1 мкФ,
- R_n – выходное сопротивление 50 Ом.

Поведение этой схемы было промоделировано SPICE-программой. При этом было допущено, что выход схемы не был нагружен. На рисунке 5 приведены результаты моделирования в виде временных диаграмм со следующими обозначениями:

- I_{CC} – ток питания интегральной схемы (вывод VCC),
- I_{C1} – ток, протекающий через первый развязывающий конденсатор,
- I_{C2} – ток, протекающий через второй развязывающий конденсатор.

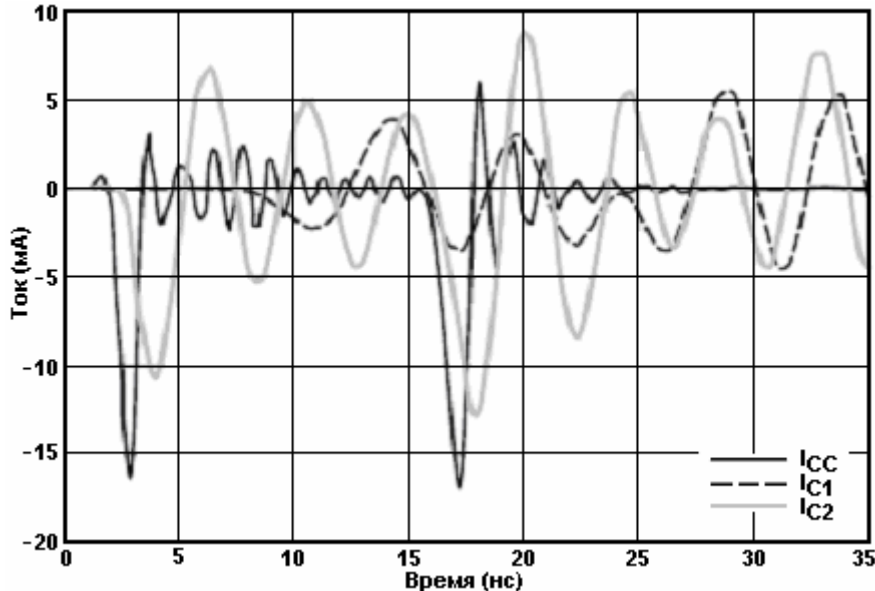


Рис. 5. Токи шины питания

Как видно на временной диаграмме ток I_{CC} содержит выброс амплитудой около 15 мА. Исходя из предыдущих рассуждений, это может быть обусловлено тем, что развязывающий конденсатор лишь отчасти способен сглаживать импульсы тока. Фактически, резонансная схема, образованная индуктивностью проводника и конденсатором C_B , будет возбуждаться, что приведет к увеличению тока I_{C1} . Основная часть тока I_{C2} передается шиной питания и протекает с небольшим уменьшением амплитуды через второй конденсатор C_B .

С точки зрения электромагнитной совместимости схемы, конденсатор C_B не способен существенно уменьшить излучаемые помехи. Длинные проводники питания, которые на практике присутствуют во многих случаях, создают относительно большие площади петель, являющиеся эффективными антеннами. Импульсные токи, протекающие по этим проводникам, создают неприемлемый уровень излучения.

Улучшения поведения схемы можно добиться при ограничении протяженности проводников с токами, показанными на рисунке 5. Это не может быть достигнуто

при использовании только конденсатора C_B . Из-за существующей индуктивности, больших размеров корпуса ИС и большой длины проводников между выводами ИС и конденсатора C_B подключение нескольких дополнительных конденсаторов с разными значениями емкости параллельно может не дать существенного улучшения.

Большой интерес представляет предотвращение влияния других частей схемы, которое может быть уменьшено включением индуктивности после первого конденсатора C_B , которая представляет достаточно большое сопротивление на высоких частотах. К

моделируемой схеме была добавлена индуктивность L_{CH} величиной 1 мкГн, импеданс которой был ограничен на высоких частотах подключением параллельно ей резистора 50 Ом.

Результаты моделирования приведены на рисунке 6. Как и ожидалось, выбросы токов, втекающих в ИС (I_{CC}) и первый конденсатор C_B (I_{C1}) не стали меньше. Тем не менее, уменьшение выбросов тока I_{CH} после введенной индуктивности составляет более 20 дБ. Этот метод может способствовать значительному снижению паразитного излучения.

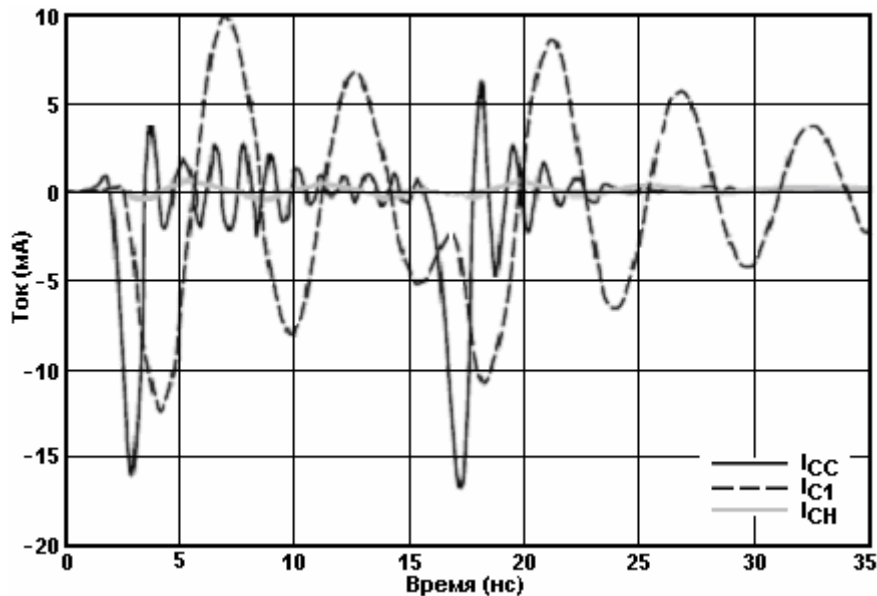


Рис. 6. Токи шины питания при использовании индуктивности

Следующий вопрос посвящен правильному размещению отдельных компонентов на печатной плате для максимального подавления помех. На рисунке 7 показан один из правильных вариантов. Заземленная область (полигон) под интегральной схемой подключена к выводу GND ИС. Эта область обеспечивает распределение основной части линий поля, выходящих из ИС, между корпусом микросхемы и земляной областью. Более того, индуктивность большой поверхности очень мала, что чрезвычайно важно для проводника, соединяющего

вывод GND микросхемы с соответствующим выводом конденсатора.

Несущественно, где расположен развязывающий конденсатор – у вывода питания микросхемы V_{CC} или у ее общего вывода GND. Важно лишь то, чтобы паразитные индуктивности и эффективные площади антенн, образующихся при соединениях, были как можно более малыми. Индуктивность L_{CH} , напротив, должна располагаться настолько близко к соответствующей части схемы, насколько это возможно.

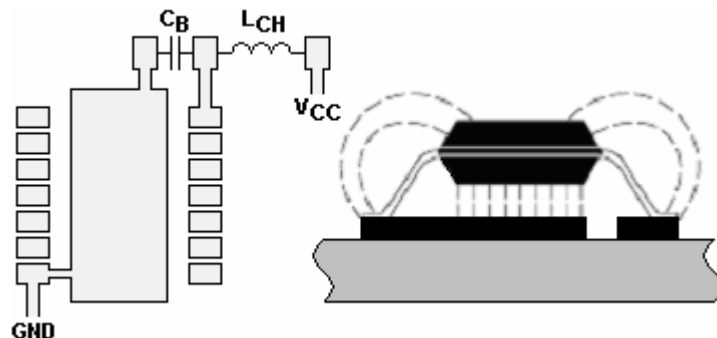


Рис. 7. Расположение ИС, C_B и L_{CH} .
Подавление помех на шинах питания

На рисунке 8 показаны пути токов схемы при подаче на вход импульсного сигнала при нагрузке на линию с импедансом Z . Входной импеданс схемы формируется входной емкостью ИС C_{IN} (5 пФ) и входным сопротивлением R_{IN} (от нескольких килоом до нескольких мегом). При поступлении отрицательного фронта входного сигнала ток будет протекать с выхода драйвера на

сток транзистора и со стока через общий провод возвратится к источнику сигнала. То есть емкость подключенного проводника и входная емкость приемника перезаряжаются через выходное сопротивление драйвера. При поступлении положительного фронта сигнала эта емкость перезаряжается источником питания через выходное сопротивление драйвера. В этом случае, сигнальные токи также проявляются на проводниках питания.

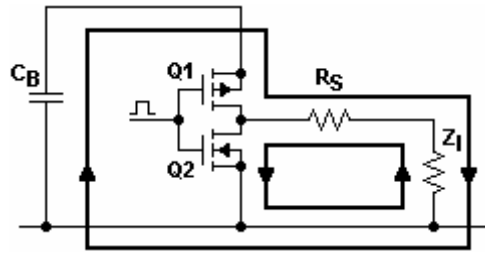


Рис. 8. Сигнальные и возвратные токи

На рисунке 9 приведены результаты моделирования схемы, приведенной на рисунке 8. Предполагалось, что выход ИС был нагружен через проводник длиной 5 см (характеристическое сопротивление $Z_0=100$ Ом) на параллельное соединение резистора 100 кОм и емкость 5 пФ. Следствием большей емкостной нагрузки является существенное уменьшение выбросов тока I_{CC} при отрицательных фронтах выходного

напряжения V_{OUT} . Емкостная нагрузка на выходе в течение небольшого промежутка времени поддерживает в этой точке исходный (высокий) потенциал и препятствует протеканию тока через верхний (по схеме) транзистор. При положительных фронтах сигнальный ток I_{OUT} вносит свою добавку в ток питания I_{CC} .

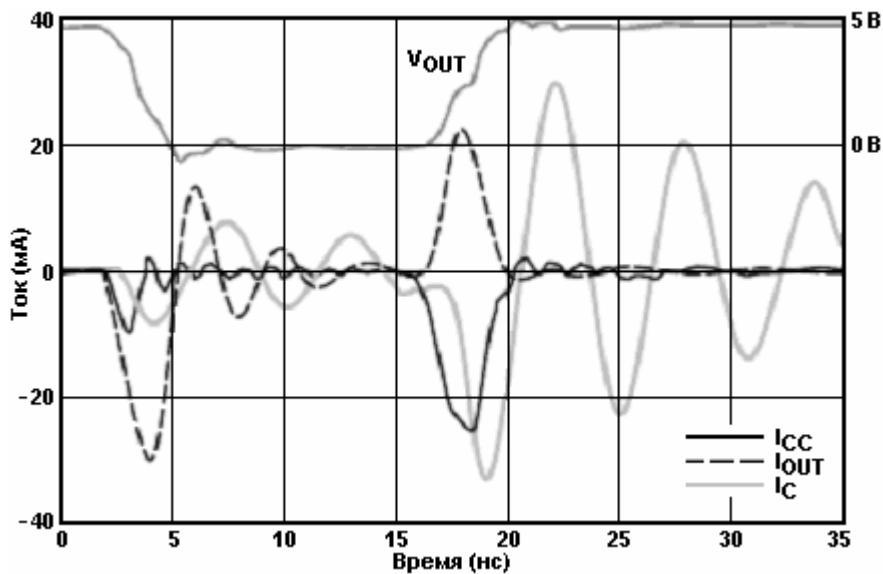


Рис. 9. Токи в сигнальных проводниках и шинах питания

Токи могут быть уменьшены включением последовательно с выходом резистора R_S . Теория линий передачи утверждает, что этот резистор не оказывает негативного влияния на скоростные характеристики схемы при условии, что выходное сопротивление драйвера (сумма величин внутреннего сопротивления и резистора R_S) меньше или равно характеристическому сопротивлению подключенного проводника ($Z_0=70...120$ Ом). На практике, эти сопротивления имеют номиналы порядка 50 Ом, что приводит к уменьшению амплитуды выбросов токов примерно на 3 дБ. Такое решение требует большего количества компонентов и может использоваться только в том случае, когда искажения, связанные с отражениями сигнала в проводнике, могут быть устранены.

возможных антенн, т.е. уменьшению длины сигнальных проводников и проводников возвратных токов. Действенным методом является параллельное размещение этих проводников (рис. 10). Это получается автоматически при использовании многослойной печатной платы, одним из внутренних слоев которой служит земляной полигон, располагающийся под сигнальными проводниками. Такой метод часто используется, если по проводникам транслируются высокочастотные сигналы (например, тактовые) или длина проводников велика. В этом случае, проводники обладают определенным импедансом, который к тому же поддерживается постоянным на всем протяжении. Кроме того, перекрестные помехи критичных сигналов могут быть уменьшены при соответствующей разводке дополнительных земляных проводников.

Особое внимание должно быть уделено наибольшему снижению эффективности излучения

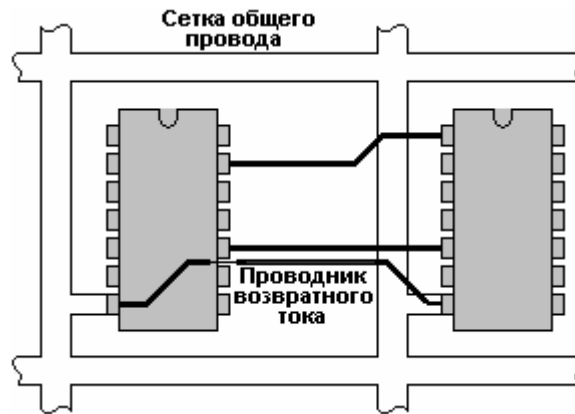


Рис. 10. Пример разводки сигнальных и земляных проводников

Наиболее выгодным и технически эффективным методом является уменьшение длины проводников следующих критичных сигналов (по уменьшению приоритета):

1. цепи тактовых частот;
2. адресные шины низших разрядов между процессором и памятью;
3. шины данных между процессором и памятью.

Все интегральные микросхемы, между которыми передаются данные на высокой частоте, должны быть

размещены настолько близко друг к другу, насколько это возможно, что позволит уменьшить длину соединительных проводников. Это относится особым образом к шинам между микропроцессором и его памятью.

Следующим шагом является наибольшее уменьшение площадей вероятных антенн, т.е. уменьшение расстояний между проводниками, передающими сигналы, и проводниками их возвратных токов.

Генератор

Самые высокие частоты в цифровых системах обычно присутствуют в генераторе. Выходной сигнал генератора передается к другим частям схемы, где обычно производится деление частоты. Часто усилитель

генератора встраивается в микроконтроллеры и процессоры, и только пассивные компоненты (кварцевый резонатор и конденсаторы) располагаются извне (рис. 11).

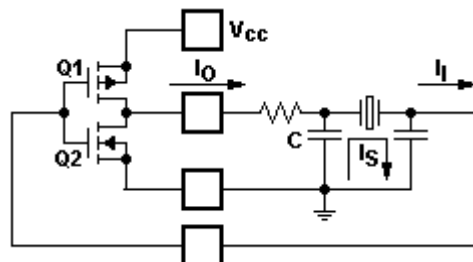


Рис. 11. Схема кварцевого генератора

Схема кварцевого генератора должна быть проанализирована с учетом протекания значимых токов для определения, где необходимо подавление помех. Схема параллельного резонанса сформирована кварцевым резонатором X и двумя конденсаторами C (дельта-контур). Поведение резонатора сходно с поведением индуктивности; резонансная частота схемы очень близка к собственной резонансной частоте кристалла. Импеданс дельта-контра, измеренный на входе или выходе, обычно составляет несколько десятков кОм из-за высокой добротности резонатора. Если значения компонентов выбраны правильно, то, вследствие высокого импеданса контура, ток между усилителем и внешними компонентами I_O будет весьма мал. Тем не менее, существует обратный эффект, связанный с тем, что выходной импеданс МОП-драйвера не соответствует импедансу резонатора. Кроме того, схема генерирует сигнал прямоугольной формы с множеством гармонических составляющих, для которых сопротивление дельта-контра уже не столь велико. В результате, в схеме драйвера присутствуют большие выходные токи. Для улучшения схемы обычно

последовательно с выходом драйвера подключается резистор R_S (рис. 11). В идеальном случае, форма напряжения на входе резонансной схемы должна быть синусоидальной. Когда выход МОП-драйвера согласованно нагружен, то протекающий ток I_L будет очень небольшим.

Конденсатор C (рис. 11) на резонансной частоте обладает импедансом всего лишь несколько сотен ом. Следовательно, ток I_S , протекающий в резонансной цепи, будет значительно большим, чем ток в проводнике, соединяющим резонансный контур со схемой. Поэтому петле из резонатора и конденсаторов должно быть уделено особое внимание, размещение компонентов должно быть компактным, а соединительные проводники – чрезвычайно короткими.

На рисунке 12 показано, как это может быть сделано. Два конденсатора C резонансной схемы располагаются непосредственно рядом с кварцевым резонатором X . Кроме того, эти компоненты должны размещаться максимально близко с соответствующими выводами микросхемы.

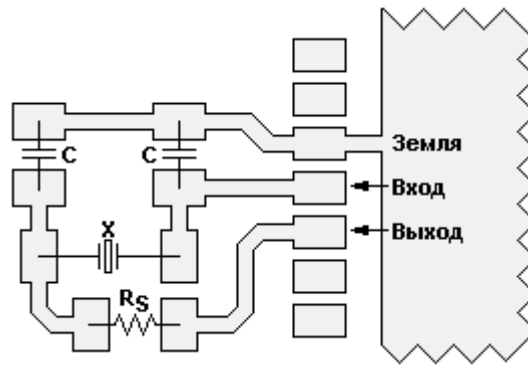


Рис. 12. Пример разводки генератора

Часть схемы с кварцевым резонатором и конденсаторами, а также излучаемые ими помехи должны в значительной степени находиться под контролем разработчика. Не менее важно, чтобы соединение драйвера с общим проводом (землей) находилось вблизи

с ИС, т.е. рядом с местоположением выводов драйвера, если это возможно. Это гарантирует малые площади неизбежных петель при относительно длинных соединениях в корпусе интегральной схемы.

Заключение

Реализация ЭМС устройств начинается в первую очередь с разработки схем и выбора компонентов. Неправильные решения на ранних стадиях разработки часто могут быть скорректированы позднее лишь со значительными затратами времени и сил. Понимание принципов работы схемы абсолютно необходимо для выполнения требований электромагнитной совместимости. Одним из основных условий этого является уменьшение эффективных площадей антенн. Например, совершенно недостаточно иметь короткими

только сигнальные проводники; проводники их возвратных токов должны быть короткими также.

Зачастую автоматическая расстановка и разводка не позволяют достичь приемлемых результатов с точки зрения электромагнитной совместимости. Поэтому вся ответственность в принятии решений по размещению критичных компонентов и разводке их соединительных проводников полностью ложится на разработчика. В этом случае CAD-пакет может использоваться лишь в качестве *разумного инструмента рисования*.