

УСТРАНЕНИЕ НЕДОСТАТКОВ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Неправильный выбор типов пассивных компонентов может привести к ухудшению характеристик даже хорошего операционного усилителя или преобразователя. В статье приведены основные сложности, возникающие у разработчика электронных схем.

У Вас уже есть дорогой прецизионный операционный усилитель или преобразователь данных (аналого-цифровой или цифро-аналоговый преобразователь). После его монтажа на печатную плату вдруг обнаруживается, что характеристики этого компонента не соответствуют спецификации, а схема работает не так, как задумывалось, а то и вовсе не работает. В ней обнаруживается какой-либо дрейф, ее частотные характеристики не соответствуют поставленным, она возбуждается, или она просто не обеспечивает требуемую точность. Прежде, чем возложить вину собственно на ОУ или преобразователь, необходимо проверить пассивные компоненты - конденсаторы, резисторы, потенциометры - и даже печатную плату. Едва уловимые изменения внешних воздействий, паразитные связи, приработка и старение, а также механические воздействия при монтаже могут непреднамеренно стать результатом неправильной работы схемы и даже ее отказа.

Вообще говоря, если Вы используете преобразователь данных с разрешением 12 и более разрядов или дорогой операционный усилитель, то должны чрезвычайно внимательно подходить к выбору пассивных компонентов. Рассмотрим эту проблему на примере 12-разрядного цифро-аналогового преобразователя. Значение половины младшего значащего разряда (МЗР) равно 0,012% от полной шкалы, т.е. лишь 122 миллионных долей (ppm)! Неидеальность пассивных компонентов может приводить к быстрому увеличению погрешности, увеличивая это значение и уменьшая разрядность преобразования.

Применение дорогостоящих пассивных компонентов зачастую не решает проблему. Бывает, что применение дешевого конденсатора нужного типа приводит к таким же хорошим результатам (с точки зрения качественных показателей), что и применение дорогого. Несмотря на некоторую сложность, понимание и анализ эффектов, возникающих в пассивных компонентах, могут оказать неоценимую помощь.

1. КОНДЕНСАТОРЫ

Большинство дизайнеров достаточно хорошо знакомо с основными типами и характеристиками применяемых конденсаторов. Однако механизм возникновения статических и динамических погрешностей в прецизионных схемах достаточно легко забывается из-за большого множества их типов - стеклянных, алюминиевых, танталовых, серебрено-слюдяных, керамических, тефлоновых (фторопластовых), пленочных, включающих в себя полиэстерные, поликарбонатные, полистирольные и полипропиленовые. На рисунке 1 приведена упрощенная модель идеального конденсатора. Номинальная емкость C шунтирована резистором утечки R_p , являющимся сопротивлением диэлектрика. Второй резистор R_s (эквивалентное последовательное сопротивление, ESR) и индуктивность L (эквивалентная последовательная индуктивность, ESL) определяются,

соответственно, сопротивлением и индуктивностью выводов и обкладок.

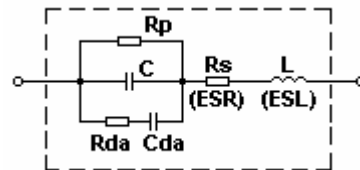


Рис. 1. Эквивалентная схема конденсатора

И, наконец, сопротивление R_{DA} и емкость C_{DA} вместе образуют упрощенную модель явления, известного как диэлектрическая абсорбция. Диэлектрическая абсорбция ухудшает параметры как высокочастотных, так и низкочастотных схем.

Диэлектрическая абсорбция

Мы начали с диэлектрической абсорбции (*dielectric absorption, DA, также называемой натеканием заряда (soakage) и иногда диэлектрическим гистерезисом (dielectric hysteresis)*), возможно потому, что это наименее понятный эффект, который в наибольшей степени ухудшает динамические характеристики конденсатора. Это явление обусловлено замедленными процессами поляризации диэлектрика и приводит к появлению напряжения на выводах конденсатора после его кратковременной разрядки. Рисунок 2 иллюстрирует этот эффект.

абсорбции, выражаемым процентной частью от начального зарядового напряжения, которая снова возникает в конденсаторе после его разряда. Конденсатор заряжается более 1 минуты, после чего закорачивается на время от 1 до 10 секунд. После выдержки около 1 минуты или более измеряется напряжение на нем.

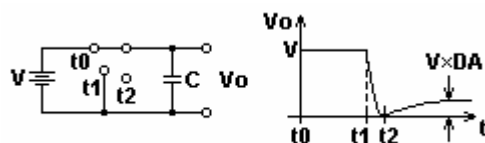


Рис. 2. Остаточное напряжение характеризует диэлектрическую абсорбцию

Будучи заряженным до напряжения V в момент времени t_0 , конденсатор закорачивается через ключ в момент времени t_1 . В момент времени t_2 конденсатор отсоединяется от схемы. Остаточное напряжение на нем медленно начинает расти, приближаясь к некоему постоянному значению. Количественное значение этого явления обычно характеризуется коэффициентом

На практике эффекты влияния диэлектрической абсорбции могут проявляться по-разному: интегратор полностью не сбрасывается до нуля, преобразователь

напряжение-частота (генератор, управляемый напряжением) имеет нелинейную характеристику преобразования, схема выборки-хранения работает неточно. Последний пример может приводить к частичным отказам в системах сбора данных, когда соседние каналы имеют напряжения, выходящие за пределы входного диапазона. Рисунок 3 иллюстрирует этот случай.

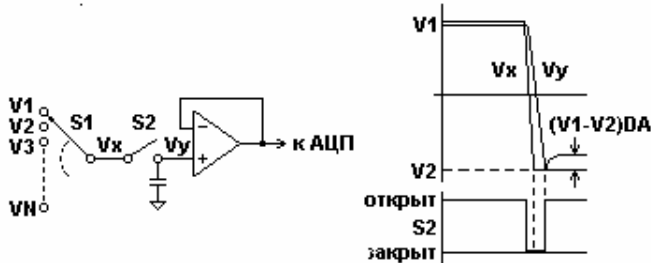


Рис. 3. Ошибки в схеме выборки-хранения из-за диэлектрической абсорбции

Диэлектрическая абсорбция является характеристикой материала диэлектрика, хотя она может зависеть от технологического процесса изготовления конденсатора или от материала его электродов. Значение коэффициента диэлектрической абсорбции может меняться от 0,02% для тефлоновых, полистирольных и полипропиленовых конденсаторов до 10% и более для алюминиевых электролитических конденсаторов.

У некоторых типов полистирольных конденсаторов коэффициент диэлектрической абсорбции может не превышать 0,002%. Керамические и поликарбонатные

конденсаторы общего назначения имеют коэффициент диэлектрической абсорбции около 0,2%, что означает для половины МЗР лишь 8 разрядов преобразования, серебряно-слюдяные, стеклянные и танталовые конденсаторы - от 1,0 до 5,0%, полиэстерные - до 0,5%. Как правило, если в спецификации на конденсатор, применяемый Вами, не приводятся данные о его диэлектрической абсорбции для требуемого временного интервала и диапазона напряжения, то остерегитесь применять такой конденсатор.

Диэлектрическая абсорбция приводит к затягиванию фронтов сигнала в скоростных схемах, таких, как высокочастотные активные фильтры или усилители высокочастотных сигналов. Значение постоянной времени диэлектрической абсорбции для некоторых таких схем может достигать нескольких миллисекунд. В модели конденсатора (рис. 1) эта постоянная определяется элементами R_{DA} и C_{DA} . В схемах с быстрой перезарядкой конденсатора диэлектрическая абсорбция играет роль аналоговой памяти - конденсатор пытается сохранить напряжение предыдущего заряда.

В некоторых схемах можно скомпенсировать погрешности, связанные с диэлектрической абсорбцией. В интеграторе, например, выходной сигнал может быть заведен в обратную связь через компенсационную схему, которая эквивалентна диэлектрической абсорбции. Такая компенсация в схеме выборки-хранения может значительно улучшить (до 10 раз и более) характеристики.

Паразитные эффекты и потери

На рисунке 1 сопротивление утечки R_p , последовательное сопротивление R_s и индуктивность L являются паразитными элементами, ухудшающими динамические характеристики схемы. Эффекты, вносимые этими элементами, часто проявляются вместе и определяются как потери (*dissipation factor, DF*). Ток проводимости, проходящий через конденсатор при постоянном напряжении на его обкладках в установившемся режиме, называется током утечки. Несмотря на то, что утечка в схеме модели выглядит простым обособленным сопротивлением, включенным параллельно конденсатору, на самом деле, она нелинейно зависит от приложенного напряжения. При подаче на конденсатор напряжения происходит постепенное уменьшение тока утечки. Производители часто специфицируют значение утечки как произведение сопротивления на емкость, которое описывает постоянную собственного разряда в секундах. Значение этой постоянной может лежать в диапазоне от одной секунды (алюминиевые и танталовые конденсаторы) до сотен секунд (керамические конденсаторы). Стеклянные конденсаторы имеют значение постоянной времени собственного разряда до 1000 секунд и более, но лучшими характеристиками по этому параметру обладают фторопластовые и пленочные (полистирольные, полипропиленовые) конденсаторы, у которых постоянная времени может превышать миллион секунд. Для этих конденсаторов утечка, созданная загрязненной поверхностью корпуса или связанная с монтажом, может превышать собственную утечку диэлектрика.

Последовательная индуктивность (рис. 1), складывающаяся из индуктивностей выводов и обкладок конденсатора, может на высоких частотах изменять

характер реактивного сопротивления компонента (емкостное сопротивление - индуктивное сопротивление). Величина индуктивности зависит от конструкционного исполнения. Конденсаторы с трубчатыми обкладками из фольги обладают значительно большей индуктивностью, чем опрессованные радиальные (круглые).

Многослойные керамические и пленочные устройства обычно имеют наименьшую последовательную индуктивность, алюминиевые и танталовые - наибольшую. Поэтому электролитические конденсаторы зачастую становятся неэффективными как элементы схем высокочастотных развязок и шунтирования.

Производители конденсаторов часто специфицируют последовательную индуктивность в виде графика зависимости полного импеданса от частоты. Емкостное реактивное сопротивление преобладает на низких частотах, а индуктивное - на высоких. Частота, на которой полное сопротивление конденсатора минимально и чисто активно, называется резонансной частотой.

Последовательное сопротивление R_s определяется суммой сопротивлений выводов и обкладок. Часто производители конденсаторов последовательное сопротивление, последовательную индуктивность и утечку рассматривают как один параметр, называемый параметром потерь (*dissipation factor, DF*). Этот параметр показывает неидеальность конденсатора и измеряется как отношение энергии потерь к энергии, запасенной в одном цикле работы. Отношение эквивалентного последовательного сопротивления к общему реактивному сопротивлению на заданной частоте приближенно равняется значению параметра потерь, эквивалентному величине, обратной добротности Q .

Величина параметра потерь зависит от температуры и частоты. Конденсаторы со слюдяным и стеклянным диэлектриком обычно имеют значение DF от 0,03% до 1,0%. Для керамических конденсаторов величина потерь равна 0,1...2,5% при комнатной

температуре. У электролитических конденсаторов значение DF значительно выше. Пленочные конденсаторы имеют наилучшее значение DF - менее 0,1%.

Точность, температура и другие параметры

Вообще-то, прецизионные конденсаторы дороги и не всегда легко доставаемы. В действительности, выбор емкости ограничен диапазоном допустимых значений и точностью. Точность $\pm 1\%$ для некоторых типов керамических и пленочных конденсаторов является обычной, но иногда недостаточной. Некоторые типы пленочных конденсаторов могут быть сделаны с большей точностью, но только по заказу.

Параметр потерь, коэффициент диэлектрической абсорбции и емкость конденсаторов зависят от температуры. Для некоторых типов эта зависимость линейна, для некоторых нет. Для одних приложений температурный коэффициент емкости не играет особой роли, для других (прецизионные интеграторы, преобразователи напряжение-частота, генераторы стабильной частоты) он представляет определенный интерес, т.к., будучи большим, может существенно ухудшать стабильность работы этих устройств. Температурный коэффициент обычно измеряется в миллионных долях от номинального значения при изменении температуры на один градус ($ppm/^\circ C$). Керамические конденсаторы типа NPO имеют температурный коэффициент 30 $ppm/^\circ C$, что является весьма и весьма неплохим значением. Для алюминиевых

электролитических конденсаторов температурный коэффициент может превышать 10000 $ppm/^\circ C$.

При разработке должна быть учтена максимальная рабочая температура устройства. Полистирольные конденсаторы, например, при температуре около $85^\circ C$ начинают плавиться, фторопластовые же выдерживают рабочую температуру до $200^\circ C$.

Чувствительность емкости и диэлектрической абсорбции к приложенному напряжению могут также ухудшать качественные характеристики схемы. Несмотря на то, что производители не всегда четко специфицируют коэффициент зависимости параметров компонента от приложенного напряжения, разработчик должен всегда принимать во внимание этот фактор. Для примера, при максимальном приложенном напряжении некоторые типы керамических конденсаторов могут уменьшать свою емкость на 50% и более.

Подобным образом, емкость и потери многих типов конденсаторов существенно зависят от частоты, главным образом, из-за изменения диэлектрической постоянной. В этом отношении, лучшие диэлектрические параметры обеспечивают полистирольные, полипропиленовые и фторопластовые конденсаторы.

Монтаж ответственных компонентов

Мучения дизайнеров схем и не заканчиваются после изготовления печатной платы. Часто ее монтаж может испортить даже хорошую дизайнерскую разработку. Например, обычно используемые для очистки растворители могут проникать внутрь электролитических конденсаторов через резиновые уплотнения выводов. Корпуса некоторых пленочных и полистирольных конденсаторов могут растворяться под действием таких растворителей. Грубое обращение с выводами может повредить некоторые конденсаторы и привести к нерегулярно появляющимся сбоям. Чтобы избежать этих проблем, благоразумно производить монтаж особо ответственных компонентов на последнем этапе, если это возможно.

Разработчики должны также помнить о случаях собственных отказов конденсаторов. Металлизированные пленочные конденсаторы после таких отказов могут самовосстанавливаться. В них сначала происходит пробой, связанный с возникновением токопроводящих участков (мостиков), которые образуются через микроотверстия в диэлектрической пленке. Но затем

протекающий по этим мостикам ток разрушает их (тепловое разрушение) и возвращает конденсатор к нормальному функционированию, правда, с уменьшенной емкостью. Конечно, в высокоимпедансных схемах из-за ограниченного значения тока может не происходить разрушения мостиков.

Танталовые конденсаторы также обладают способностью самовосстановления, но механизм при этом другой - температура в месте повреждения растет медленно. Поэтому танталовые конденсаторы самовосстанавливаются лучше в высокоимпедансных схемах, с ограничением быстрого нарастания тока через участок пробоя. Следовательно, необходимо проявлять осторожность при применении танталовых конденсаторов в схемах с большими токами.

Долговечность электролитических конденсаторов зависит от их герметичности. Электролит может просачиваться через уплотнения выводов. Эпоксидная герметизация лучше, чем резиновая, но при приложении напряжения обратной полярности либо при превышении напряжения она может привести к взрыву конденсатора.

2. РЕЗИСТОРЫ И ПОТЕНЦИОМЕТРЫ

Благодаря развитой технологии, выбор резисторов достаточно широк - углеродные композитные, углеродные пленочные, цельнометаллические, металлические пленочные, индуктивные и безындуктивные проволочные. Как на наиболее часто применяемый компонент, на резистор обращается мало внимания, как на источник погрешностей в высококачественных схемах. При неправильно выбранном типе резистора точность 12-разрядной схемы может существенно уменьшиться. Когда Вы в последний раз внимательно читали технические

характеристики резисторов? Вы будете удивлены, ознакомившись с ними.

Рассмотрим схему (рис. 4), которая усиливает входной сигнал 0...100 мВ в 100 раз для 12-разрядного аналого-цифрового преобразования с входным диапазоном 0...10 В. Для задания коэффициента усиления применены металлические прецизионные резисторы с точностью $\pm 0,001\%$ (10 ppm). В качестве альтернативы прецизионным резисторам, точность схемы может быть скорректирована калибровкой. Таким

образом, точность усиления схемы может быть установлена, в принципе, любой, но тем не менее она ограничена точностью средств калибровки.

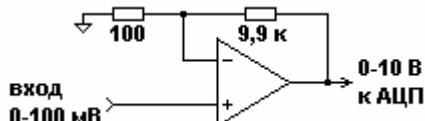
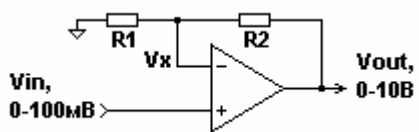


Рис. 4. Усилитель на ОУ

Изменения температуры ограничивают точность усиления несколькими способами. Абсолютный температурный коэффициент резисторов обычно не очень важен из-за малого влияния. Несмотря на это, углеродные композиционные резисторы с температурным коэффициентом около 1500 ppm/°C не будут обеспечивать точность прецизионной схемы. Даже если температурный коэффициент будет уменьшен до 15 ppm/°C, изменение температуры лишь на 8°C вызовет ошибку в половину МЗР (120 ppm).

Производители часто изготавливают металлические и металлические пленочные резисторы с температурным коэффициентом от ±1 до ±100 ppm/°C. Тем не менее, будьте осторожны: температурный коэффициент может сильно отличаться для резисторов разных партий изготовления. Для решения этой проблемы можно использовать согласованные резисторные пары с разностью температурных коэффициентов от 2 до 10 ppm/°C. Дешевые тонкопленочные наборы резисторов также хороши и широко применяются.

К сожалению, даже согласованные резисторные пары не могут полностью решить проблему, вызванную температурным эффектом. Рисунок 5а иллюстрирует отклонение параметров схемы, вызванное саморазогревом. Резисторы обладают одинаковыми температурными коэффициентами, но рассеивают существенно различное тепло в этой схеме. При тепловом сопротивлении 125 °C/Вт для примененных 1/4-ваттных резисторов температура резистора R1 возрастет на 0,0125 °C, в то время как температура резистора R2 - на 1,24 °C. При температурном коэффициенте 50 ppm/°C результирующая ошибка составит 62 ppm (0,006%).



$$R1=100 \text{ Ом, } \pm 0,001\%, +50 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$$

$$R2=9,9 \text{ кОм, } \pm 0,001\%, +50 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$$

$$q_{FA}=125 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$$

$$\text{При } V_{in}=0: V_{out}=0, V_x=0, P_{R1}=P_{R2}=0$$

$$\text{При } V_{in}=100 \text{ мВ: } V_{out}=10 \text{ В, } V_x=100 \text{ мВ,}$$

$$P_{R1}=0,1^2/100=0,1 \text{ мВт, } P_{R2}=9,9^2/9900=9,9 \text{ мВт.}$$

$$R1 \text{ нагреется на } 0,0125^\circ\text{C, } R2 \text{ нагреется на } 1,24^\circ\text{C.}$$

$$\text{Ошибка: } (1,24 \text{ }^\circ\text{C}) \times (50 \text{ ppm/}^\circ\text{C})=62 \text{ ppm}=0,006 \text{ \%}$$

Рис. 5а. Анализ нелинейности схемы

Что еще хуже, явление саморазогрева создает погрешности, связанные с нелинейностью. При половине максимального входного напряжения (50 мВ) результирующая ошибка будет равна лишь 15 ppm из-за меньшего разогрева. На рисунке 5б приведен график

передаточной характеристики схемы (рис. 5а). Но это еще не самый плохой пример: с меньшими размерами резисторов результаты будут еще хуже из-за большего теплового сопротивления.

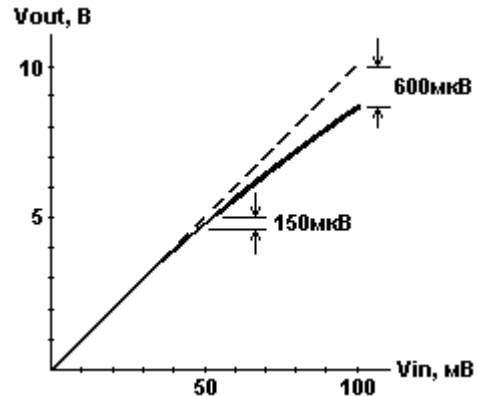


Рис. 5б. График нелинейности передаточной функции

Использование более мощных резисторов для таких устройств приводит к большему рассеиванию тепла, что может минимизировать эффекты, связанные с саморазогревом. Также может помочь использование наборов пленочных резисторов; ошибки, связанные с саморазогревом, уменьшаются, поскольку эти резисторы находятся в одном корпусе и их температура практически одинакова.

Часто не придают большого значения таким источникам погрешности, как температурный коэффициент сопротивления шин печатной платы, а также соединениям, которые могут увеличить суммарные погрешности схемы. Металлы используемые в печатных платах имеют высокий температурный коэффициент - 3900 ppm/°C. Прецизионный 10-омный, 10 ppm/°C проволочный резистор с сопротивлением выводов 0,1 Ом, например, легко превратится в обычный резистор с температурным коэффициентом 45 ppm/°C. Температурные коэффициенты соединений играют особую значимую роль в прецизионных гибридных схемах, при проектировании которых учитывается сопротивление тонкопленочных соединений.

И еще одно, последнее рассуждение, которое касается схем, работающих в широком температурном диапазоне окружающей среды. Это явление, известное как температурный возврат (temperature retrace), описывает изменения в сопротивлении, которые происходят после определенного количества циклов воздействия низкой и высокой температуры. Температурный возврат может повысить температурный коэффициент на 10 ppm даже для лучших металлопленочных компонентов.

Несколько правил при разработке резистивных схем с минимальными температурными погрешностями (в соответствии с их значимостью):

- **Применяйте резисторы с согласованными температурными коэффициентами;**
- **Используйте резисторы с малыми абсолютными температурными коэффициентами;**
- **Используйте резисторы с малыми тепловыми сопротивлениями;**
- **Используйте компактные резисторные сборки.**

Паразитные эффекты резисторов

В резисторах, особенно, на высоких частотах могут проявляться в значительной степени паразитные индуктивность и емкость. Производители часто объединяют эти паразитные явления в одно, называя его реактивной погрешностью и выражают в процентах или ppm. Определяется эта погрешность как относительная разность между сопротивлением на постоянном токе и сопротивлением на одной или нескольких частотах.

Особенно выделяются проволочные резисторы. Несмотря на то, что производители предлагают и нормальные проволочные резисторы, и безындуктивные, даже последние создают головную боль для дизайнеров. Эти резисторы в схемах ведут себя как небольшие индуктивности (порядка 20 мкГн) при значениях сопротивлений менее 10000 Ом. Безындуктивные проволочные резисторы, сопротивление которых превышает 10 кОм, обладают шунтирующей емкостью около 5 пФ.

Такие паразитные явления могут непоправимо ухудшить частотные характеристики скоростных схем.

Особое беспокойство вызывают схемы с значениями проволочных сопротивлений около 10 кОм. Нередко в таких схемах можно наблюдать дифференцирование сигналов и даже генерацию. Причем особенно заметным это становится на частотах килогерцового диапазона.

Даже в низкочастотных схемах паразитные эффекты проволочных резисторов могут создавать проблемы. Экспоненциально зависящее время установления до уровня 1 ppm может равняться 20-ти постоянным времени и более. Паразитные эффекты, связанные с неидеальностью проволочных резисторов, могут неприемлемо изменять время установления сигнала.

Паразитное реактивное сопротивление часто присутствует даже в непроволочных резисторах. Например, многие металло-пленочные резисторы имеют значительную межвыводную емкость, которая проявляется на высоких частотах. В этом случае лучшим выбором являются углеродные резисторы.

Термоэлектрические явления

Соединение между двумя разнородными металлами создает термо-ЭДС (*thermal EMF*). Часто этот эффект может легко создавать доминирующие ошибки в прецизионных схемах. В проволочных резисторах, например, в месте соединения резистивного проводника с выводом создается термо-ЭДС в 42 мкВ/°С (для изготовления выводов часто применяется Сплав 180, состоящий из 77% меди и 23% никеля). Если температуры обоих выводов резистора одинаковы, то термо-ЭДС нейтрализуется и не вносит ошибки. Однако, если резистор устанавливается вертикально (например, для более плотного монтажа), между верхом и низом может возникнуть температурный градиент из-за прохождения воздушного потока вдоль длинного вывода.

При разности температур всего лишь в 1 °С возникает ошибка, равная 42 мкВ, превышающая напряжение смещения типичного прецизионного операционного усилителя (около 25 мкВ). Это затруднение обходится при горизонтальном размещении резистора (рис. 6). В качестве альтернативы, некоторые производители по специальному заказу предлагают резисторы с лужеными медными выводами, у которых термо-ЭДС снижена до 2,5 мкВ/°С.

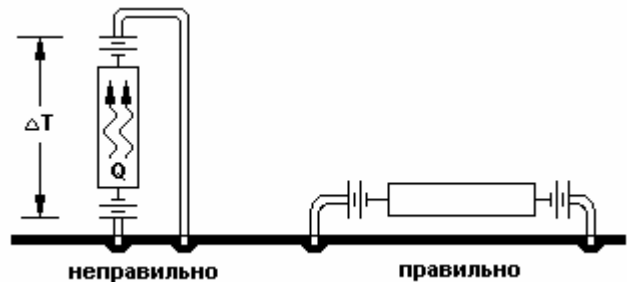


Рис. 6. Температурный градиент создает погрешности из-за термо-ЭДС

Вообще говоря, дизайнеры должны стараться избегать температурных градиентов в электронных схемах или вблизи них. Часто это означает тепловую изоляцию компонентов, рассеивающих значительное тепло. Турбулентция воздушных потоков, возникающая при больших температурных градиентах, может приводить также к динамическим ошибкам, похожим на низкочастотный шум.

Напряжение, отказы и старение

Параметры резисторов зависят от приложенного напряжения. Высокоомные компоненты с оксидным проводящим слоем особенно чувствительны; их коэффициент зависимости сопротивления от приложенного напряжения лежит в диапазоне от 1 до 200 ppm/V. Это еще одна причина проявлять особое внимание при разработке прецизионных схем, таких как высоковольтные делители.

Механизм отказов резисторов может также создавать трудности при работе схем, если он не тщательно продуман при разработке. Углеродные композиционные резисторы обратимо выходят из строя на некоторое время, демонстрируя внутренний обрыв. Часто в некоторых приложениях такие компоненты играют полезную второстепенную роль предохранителей. Замена таких резисторов на углеродные пленочные может

привести к повреждению схемы, поскольку отказ в этом случае будет выглядеть как уменьшение сопротивления вплоть до короткого замыкания. В металлизированных пленочных компонентах отказ проявляется в виде обрыва.

Все резисторы имеют тенденцию незначительно изменять величину своего сопротивления в течение времени. Производители специфицируют долговременную стабильность величиной ppm/год. Значения 50 или 75 ppm/год нередко встречаются среди металлизированных пленочных резисторов. Для особо ответственных применений металлизированные пленочные резисторы должны проходить тренировку в течение минимум одной недели при номинальной мощности. Во время этого процесса значение сопротивления может увеличиваться на величину 100-200

ppm. Для металлизированных пленочных резисторов может потребоваться 4000-5000 часов приработки для

полной стабилизации параметров.

Дробовой шум резисторов

Большинство разработчиков имеют некоторую осведомленность о тепловом шуме (или шуме Джонсона) резисторов, но значительно меньшая их часть имеет представление о другом шуме, называемом дробовым шумом (*excess noise*), который может создавать проблемы, главным образом, в схемах с прецизионными операционными усилителями и преобразователями. Дробовой шум проявляется только при протекании тока через резистор.

Тепловой шум является результатом хаотического движения зарядов в резисторе. Это движение тем интенсивнее, чем выше температура. Несмотря на то, что среднее значение напряжения теплового шума равно нулю, его мгновенные изменения создают шумовое напряжение на выводах резистора. Среднеквадратическое напряжение теплового шума

пропорционально квадратному корню из ширины полосы пропускания.

Дробовой шум возникает главным образом тогда, когда постоянный ток протекает в дискретном материале, т.е. материале, состоящем из микрогранул, например, в углеродной композиции. Ток протекает скачкообразно через прессованные углеродные гранулы, создавая микроскопические искрения между ними. Это явление имеет спектральное распределение мощности шума $1/f$. Естественно, этот шум некоррелированно (т.е. эти источники абсолютно независимы) добавляется к тепловому шуму. Общее напряжение (ток) шума от некоррелированных источников равно квадратному корню суммы квадратов соответствующих шумовых напряжений (токов).

Потенциометры

Подстроечные резисторы могут создавать еще большие проблемы. Разработчики должны быть готовы к возникновению дополнительных непредвиденных обстоятельств, присущих этим компонентам. Например, очень часто потенциометры негерметичны и могут выйти из строя при промывке платы растворителями, а также изменить свои параметры при повышении влажности окружающего воздуха. Вибрации и механические воздействия могут разрушить резистивный элемент и проволочные выводы.

Шум контакта, температурный коэффициент, паразитные эффекты и ограниченный диапазон регулировки могут препятствовать функционированию схемы. Более того, ограниченная точность регулировки проволочных типов потенциометров и скрытые ограничения металлокерамических и пластмассовых типов (гистерезис, несовместимые температурные коэффициенты, люфт) делают достижение и поддержание точных установок маловозможными. Правило: старайтесь использовать малый диапазон регулировки сигнала потенциометром.

3. ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

Печатные платы выступают в роли невидимых компонентов во всех прецизионных схемах. В то время, когда дизайнеры редко задумывались об электрических характеристиках печатных плат, характеристики схем оказывались хуже предполагаемых.

Результатами вредного воздействия характеристик платы на точностные характеристики схемы являются утечки, падения напряжения на проводниках (особенно на шинах общего провода), паразитные емкости, диэлектрическая абсорбция и др. В добавление к этому,

печатные платы гигроскопичны и меняют свои электрические характеристики при изменении влажности, усугубляя паразитные эффекты.

Эффекты, вносимые печатными платами, могут быть разделены на две категории:

- 1) влияние на характеристики схемы по постоянному току (статические воздействия),
- 2) влияние на характеристики схемы по переменному току (динамические воздействия).

Статические воздействия

Утечки являются доминирующим воздействием на характеристики печатных плат по постоянному току. Загрязнения на поверхности платы в виде остатков флюса, химикатов и т.п. могут создавать утечки между выводами компонентов и проводниками. Даже у хорошо очищенной платы нередко можно обнаружить утечку в 10 нА и более между двумя близко расположенными выводами с разностью потенциалов 15 В (к сожалению, у стандартных ОУ вывод питания располагается рядом с высокоомным неинвертирующим входом). Наноамперные токи утечек между чувствительными выводами могут создать достаточно большие ошибки, например, ток в 10 нА, протекающий через сопротивление 10 МОм, вызовет ошибку в 0,1 В.

Для определения чувствительных к токам утечки выводов попробуйте ответить на следующий вопрос: Если паразитный ток величиной несколько наноамперов или более будет втекать (вытекать) в этот вывод, то вызовет ли это какой-либо побочный эффект?

Существует несколько способов борьбы с проблемами, связанными с токами утечек. Существенную помощь может оказать тщательная отмывка печатной платы от загрязнений. Операции по очистке включают в себя энергичную отмывку платы изопропиловым спиртом с помощью мягкой щетки, промывку в деионизованной (в крайнем случае, дистиллированной) воде и сушку при температуре 85 °С в течение нескольких часов. Будьте внимательны при выборе растворителей для отмывки плат. Фреоновые растворители вместе с некоторыми водорастворимыми флюсами могут образовывать солевые отложения, приводящие к утечкам. Огромную помощь оказывает нанесение маски на поверхность платы - стеклотекстолит является хорошим сорбентом.

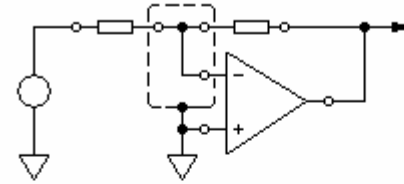
К сожалению, даже очень хорошая очистка чувствительных к токам утечки схем может дать лишь временный эффект. Проблемы вскоре возникают снова из-за новых загрязнений (отпечатки пальцев, например), воздействия окружающей среды и большой влажности.

Создание охранных областей (*guarding*) позволяет красиво и на длительное время защититься от проблем, связанных с токами утечек. Хорошо расположенные охранные кольца могут устранить такие проблемы даже для схем, работающих в жестких промышленных условиях.

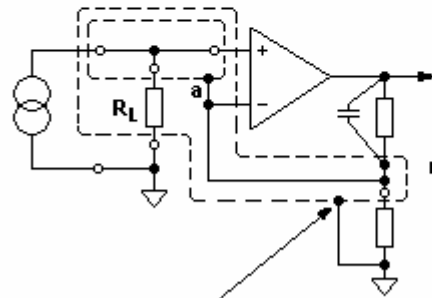
Основы создания охранных областей просты: окружение чувствительных выводов проводниками, уменьшающими паразитные токи и поддерживающими точный потенциал этих выводов. Потенциал охранной области должен быть возможно более близким к потенциалу защищаемого вывода, иначе защита будет сама являться источником большого паразитного тока. Например, для того, чтобы ток утечки между охранным кольцом и выводом был менее пикоампера (полагая сопротивление утечки равным 1000 МОм), необходима разность потенциалов между ними не более 1 милливольт. Рисунок 7а иллюстрирует способы построения охранных областей для инвертирующей и неинвертирующей схем включения операционного усилителя.

На рисунке 7б показана разводка защитного кольца на печатной плате. Необходимо помнить, что защита будет работать эффективно только в том случае, когда охранный элемент располагается на обеих сторонах печатной платы. Элементы охранных областей лучше располагать в самом начале разводки потому, что впоследствии обычно не хватает места для их оптимального размещения.

охранное кольцо окружает только проводники защищаемого вывода



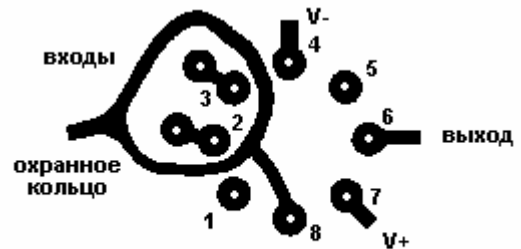
охранное кольцо окружает все защищаемые проводники, включая сигнальный вывод источника



низкоомные резисторы

использование экранирования или буфера, включенного в разрыв проводника "а"

Рис. 7а. Охранные области для ОУ



Охранное кольцо должно быть расположено на обеих сторонах платы

Рис. 7б. Разводка охранного кольца на печатной плате

Динамические воздействия

В отличие от статических воздействий, которые могут изменяться с изменением влажности или загрязнений платы, динамические воздействия на схему обычно относительно постоянны. Как недостаток для новых разработок, они не могут быть устранены достаточно просто, например, очисткой. Динамические воздействия печатных плат могут постоянно и неблагоприятно воздействовать на качественные характеристики изделия.

Проблемы паразитной емкости, возникающей из-за взаимовлияния проводников и контактных площадок компонентов, хорошо понимаются большинством дизайнеров. Правильная ориентация компонентов и прокладка проводников по оптимальному пути достигаются в процессе обучения и в данной статье не рассматриваются.

Диэлектрическая абсорбция причиняет большую головную боль и, как и в случае с конденсаторами, недостаточно понимаема. Эффект диэлектрической абсорбции печатной платы может быть смоделирован расположенными рядом друг с другом, последовательно соединенными резистором и конденсатором (рисунок 8). Этот эффект имеет обратную зависимость от расстояния

между проводниками и напрямую зависит от длины проводников. Емкость конденсатора диэлектрической абсорбции лежит в диапазоне от 0,1 до 2,0 пФ, а сопротивление резистора - от 50 до 500 МОм (типичные значения - 0,5 пФ и 100 МОм). Поэтому диэлектрическая абсорбция печатных плат оказывает большее влияние на высокоимпедансные схемы.

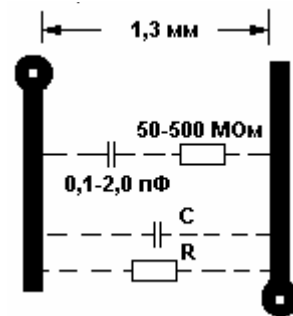


Рис. 8. Диэлектрическая абсорбция ухудшает динамические характеристики

Диэлектрическая абсорбция печатных плат оказывает значительное влияние на динамические

характеристики схемы, например, на время установления сигнала. В отличие от утечки, этот эффект редко зависит от влажности или других факторов окружающей среды, но очень часто является функцией диэлектрических характеристик платы. Химические процессы, связанные с изготовлением металлизированных отверстий обостряют проблему. Если Ваша схема не соответствует поставленным требованиям по переходным

характеристикам, то это может быть следствием диэлектрической абсорбции печатной платы.

К счастью, имеются решения этой проблемы. Как и в случае диэлектрической абсорбции конденсаторов, для компенсации этого явления используются внешние компоненты. Защитные области, изолирующие чувствительные выводы часто полностью устраняют проблему. Еще раз, защитные области должны располагаться на обеих сторонах платы.

4. НЕ УПУСТИТЕ ЧТО-НИБУДЬ

Если Ваша схема с прецизионным ОУ или преобразователем данных не отвечает поставленным при проектировании требованиям, проверьте, не упустили ли Вы что-нибудь. Проанализируйте работу всех пассивных и активных компонентов и попробуйте определить то, что осталось незамеченным. Проверяйте и проверяйте. Не принимайте все на веру.

Простой пример. При перемещениях кабеля происходит смещение проводника относительно окружающего его диэлектрика. Это смещение может создавать накапливающиеся статические заряды,

приводящие к помехам особенно в высокоимпедансных схемах. В этом случае может помочь жесткое закрепление кабеля или использование дорогостоящих малозумящих кабелей с фторопластовой изоляцией.

Так как все большее количество прецизионных операционных усилителей и многозарядных преобразователей становится доступным, а системы становятся все более скоростными и точными, полное понимание источников погрешностей и ошибок, описанных в этой статье, становится все более важным.