

# Емкости и конденсаторы

Часто возникает необходимость выбора того или иного типа конденсатора для конкретного применения, но не совсем понятны преимущества и недостатки различных типов. Выбор правильного типа конденсатора для конкретного применения в действительности не так уж сложен.

## Паразитные эффекты в конденсаторах

Часто возникает необходимость выбора того или иного типа конденсатора для конкретного применения, но не совсем понятны преимущества и недостатки различных типов. Выбор правильного типа конденсатора для конкретного применения в действительности не так уж сложен. Вообще говоря, большинство конденсаторов по назначению можно разделить на следующие четыре основные категории:

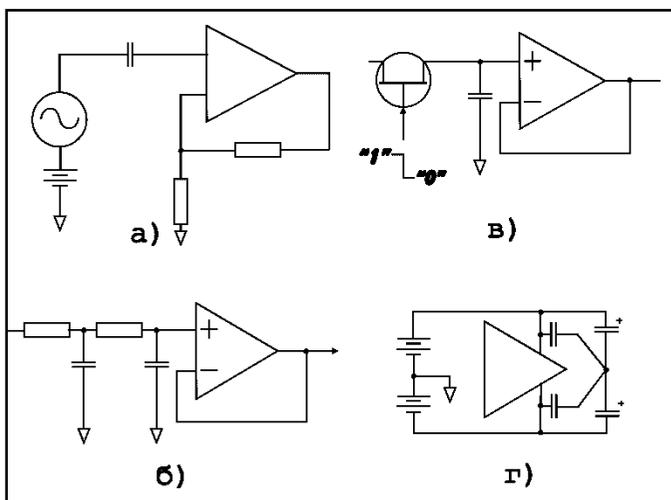


Рис.1. Примеры использования конденсаторов

- для связи по переменному току, включая шунтирование (передача переменного сигнала с фильтрацией постоянной составляющей) (рис. 1а);
- блокировочные ( фильтрация переменного сигнала, наложенного на постоянный, или фильтрация высоких частот, наложенных на сигнал низкой частоты в сигнальных схемах, контурах опорного напряжения или питания) (рис. 1в);
- активные/пассивные RC фильтры и частотно — избирательные схемы (рис. 1б);
- аналоговые интеграторы и схемы выборки — хранения (накопление и хранение заряда) (рис. 1г).

Даже если существует около дюжины наиболее распространенных типов конденсаторов, включая поликристаллические, пленочные, керамические, электролитические и т. д., вы обнаружите, что только один или два типа будут наиболее приемлемы для конкрет-

ного применения, поскольку использование других типов конденсаторов вызовет паразитные эффекты.

В отличие от идеальной модели конденсатора реальный конденсатор обладает дополнительными паразитными компонентами (или неидеальным поведением), которые проявляются в форме резистивных и индуктивных элементов, нелинейности и диэлектрической памяти. Характеристики конденсатора, обусловленные наличием этих компонентов, обычно указываются в спецификации изготовителя. Чтобы правильно выбрать тип

конденсатора для каждого конкретного применения, необходимо понимать последствия, связанные с паразитными компонентами конденсатора.

Самыми распространенными паразитными эффектами конденсатора являются утечка заряда конденсатора (параллельное сопротивление —  $R_L$ ), эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС —  $R_{ESR}$ ), эквивалентная последовательная индуктивность (ЭПИ —

$R_{ESL}$ ) и диэлектрическая абсорбция (память —  $R_{DA}$ ,  $C_{DA}$ ). Утечка заряда конденсатора ( $R_L$ ) является важным параметром при использовании конденсаторов для связи по переменному току и в приложениях, связанных с хранением заряда, таких как аналоговые интеграторы и схемы выборки-хранения, а также при использовании конденсаторов в высокоимпедансных цепях.

У идеального конденсатора (рис. 3 а), заряд  $Q$  изменяется только в соответствии с задаваемым внешним током. Однако, в реальном конденсаторе (рис. 3 б) заряд может стекать через сопротивление утечки со скоростью, определяемой постоянной времени R-C-цепочки.

Конденсаторы электролитического типа (танталовые и алюминиевые), отличающиеся высокой емкостью, имеют очень большой ток утечки (обычно порядка 5–20 нА/1 мкФ) из-за плохого сопротивления изоляции и потому не

пригодны для применения в схемах хранения заряда и связи по переменному току.

Для этих целей лучше выбрать тефлон (политетрафторэтилен) и другие поликристаллические типы конденсаторов (полипропилен, полистирол и т. д.)

Под эквивалентным последовательным сопротивлением (ЭПС,  $R_{ESR}$ ) подразумевают сопротивление выводов конденсатора последовательно с эквивалентным сопротивлением пластин конденсатора. Наличие ЭПС приводит к рассеянию энергии на конденсаторе (и, следовательно, снижению производительности) при протекании по нему больших переменных токов. Это может иметь серьезные последствия при использовании конденсаторов в высокочастотных схемах или при блокировке питания, когда через конденсатор текут значительные пульсирующие токи. Однако в прецизионных высокоимпедансных низкоуровневых аналоговых схемах маловероятно проявление этого эффекта.

Наименьшим ЭПС обладают слюдяные и пленочные конденсаторы.

Эквивалентная последовательная индуктивность (ЭПИ,  $R_{ESL}$ ) конденсатора представляет собой индуктивность выводов конденсатора последовательно с эквивалентной индуктивностью пластин конденсатора. Подобно ЭПС, ЭПИ также может создать проблемы на высоких частотах, даже если сами прецизионные схемы работают на низких частотах или при постоянном напряжении. Причина в том, что транзисторы, используемые в прецизионных аналоговых схемах, могут иметь коэффициент усиления больше единицы в полосе частот (F), определяемой сотнями мегагерц или даже единицами гигагерц. На таких частотах наличие даже малой индуктивности может повлечь усиление резонанса в цепи. Поэтому важно, чтобы выводы питания таких схем были соответствующим образом развязаны на высоких частотах.

Электролитические, бумажные или пластиковые пленочные конденсаторы не обеспечивают должной развязки на высоких частотах. Они состоят из двух полос металлической фольги, разделенной слоями бумажного или пластикового диэлектрика и свернутой в рулон. Такая структура обладает значительной собственной индуктивностью и уже на частотах в несколько мегагерц ведет себя скорее как катушка индуктивности, а не как конденсатор.

Наиболее уместны для развязки на высоких частотах монолитные керамические конденсаторы, обладающие очень малой последовательной индуктивностью. Такие конденсаторы представляют собой многослойную структуру из металлических пластин и керамического диэлектрика. Эти пластины соединены между собой параллельно двумя электрическими шинами, а не свернуты в рулон.

Некоторым недостатком керамических конденсаторов является то, что они могут быть чувствительны к вибрациям (микрофонный эффект). Некоторые типы могут даже быть саморезонансными с относительно высокой добротностью  $Q$ , поскольку наряду с низкой индуктивностью они обладают малым последовательным сопротивлением. С другой стороны, дисковые

керамические конденсаторы иногда обладают значительной индуктивностью, хотя и стоят они дешевле.

В таблицах выбора типа конденсатора иногда встречается термин «фактор рассеяния». Поскольку указать в отдельности характеристики эквивалентной последовательной индуктивности, эквивалентного последовательного сопротивления и утечки конденсатора достаточно сложно, многие производители объединяют утечку, ЭПС и ЭПИ единым термином — «фактор рассеяния» (dissipation factor — DF), который, по существу, описывает неэффективность конденсатора. Фактор рассеяния определяется как отношение энергии, рассеиваемой на кон-

ротности конденсатора, Q, которая иногда включается в спецификацию производителя.

Монолитные керамические конденсаторы могут прекрасно служить для развязки на высоких частотах, но они обладают значительной диэлектрической абсорбцией ( $R_{DA}, C_{DA}$ ), что делает их непригодными для хранения заряда в усилителях выборки — хранения. Диэлектрическая абсорбция представляет собой гистерезисоподобное внутреннее распределение заряда. Если заряженный конденсатор быстро разрядить, а затем разомкнуть его цепь, наличие диэлектрической абсорбции приведет к частичному восстановлению заряда конденсатора (рис. 4). Количество восстановленного заряда конденсатора зависит от предыдущего заряда конденсатора. В сущности, этот эффект является зарядовой памятью конденсатора и вызовет ошибки в любом усилителе выборки-хранения, где такой конденсатор используется для хранения заряда.

Для таких приложений лучше использовать конденсаторы поликристаллических типов, о которых упоминалось ранее, то есть полистирольные, полипропиленовые или тефлоновые. Эти конденсаторы обладают очень малой диэлектрической абсорбцией (обычно  $<0,01\%$ ).

В табл. 1 дается общее сравнение характеристик различных типов конденсаторов.

Чтобы быть уверенным в том, что аналоговый контур развязан соответствующим образом как на высоких, так и на низких частотах, лучше всего устанавливать параллельно конденсатор электролитического типа и монолитный керамический конденсатор. Такая комбинация будет иметь высокую емкость на низких частотах,

и сохранит ее на достаточно высоких частотах. Вообще говоря, нет необходимости устанавливать на каждую интегральную микросхему отдельный танталовый конденсатор, за исключением некоторых критических случаев. Если расстояние между каждой микросхемой и конденсатором не превышает 10 см, вполне возможно использовать один танталовый конденсатор на несколько ИС.

Другой немаловажный момент, который не следует забывать при развязке на высоких частотах, — это физическое расположение конденсатора (рис. 5). Даже короткий отрезок провода обладает значительной индуктивностью, поэтому монтаж конденсаторов необходимо проводить как можно ближе к корпусу ИС и ис-

пользовать достаточно широкие и короткие дорожки печатной платы.

Идеальным вариантом для развязки на высоких частотах являются конденсаторы для поверхностного монтажа. Их использование позволяет избежать влияния индуктивности выводов конденсатора. Однако может подойти и обычный конденсатор с проволочными выводами при условии, что длина выводов не превышает 1,5 мм.

Вот основные рекомендации по использованию развязывающих конденсаторов:

- используйте конденсаторы, обладающие низкой индуктивностью (монолитные керамические);
- располагайте конденсатор как можно ближе к ИС;
- используйте конденсаторы для поверхностного монтажа;
- используйте короткие, широкие дорожки печатной платы.

### Паразитная емкость

Только что мы обсудили паразитные эффекты, которыми обладает конденсатор как конструктивный элемент схемы. Поговорим теперь о так называемой паразитной емкости. Подобно обычному конденсатору, образованному двумя параллельными пластинами, паразитная емкость образуется всякий раз, когда два проводника расположены близко друг к другу (особенно если они параллельны) и при этом не соединены между собой, а также не разделены друг от друга экраном Фарадея (рис. 6):

где  $C$  — емкость в пФ,  
 $E_R$  — диэлектрическая постоянная для воздуха (диэлектрическая проницаемость),

$$C = 0.0085 * E_R * \frac{A}{d}$$

$A$  — площадь параллельного проводника в мм<sup>2</sup>,

$d$  — расстояние между проводниками в миллиметрах.

Паразитная емкость обычно образуется между параллельными дорожками печатной платы (рис. 7а) или между дорожками и полигонами на противоположных сторонах печатной платы (рис. 7б). К сожалению, проявление и следствия паразитной емкости — особенно на высоких частотах — наблюдаются чаще всего при непосредственном моделировании схемы и могут вызвать серьезные проблемы уже тогда, когда плата системы собрана и запрограммирована. В качестве примеров нарушений работы схемы, вызванных паразитной емкостью, можно привести повышенный уровень шума, снижение частотного диапазона работы устройства и даже нестабильность.

Вычислим емкость, возникающую между дорожками на противоположных сторонах печатной платы, по приведенной выше формуле. Для стандартного материала, из которого изготавливаются платы ( $E_R=4,7$ ,  $d=1,5$  мм), емкость между проводниками, расположенными на противоположных сторонах печатной платы, составляет около 3 пФ/см<sup>2</sup>. На частоте 250 МГц емкость в 3пФ будет обладать реактивностью в 212,2 Ом!

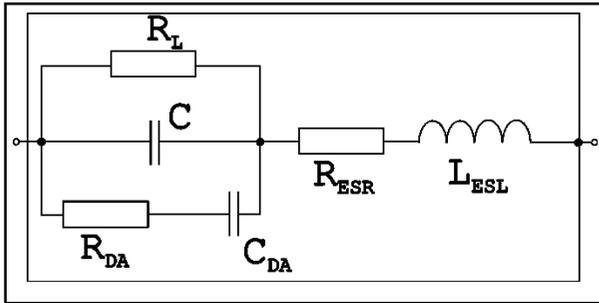


Рис. 2. Эквивалентная схема реального конденсатора

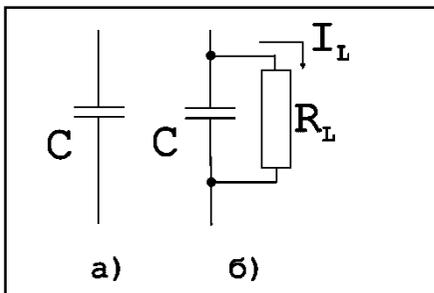


Рис. 3. Идеальный конденсатор и модель утечки

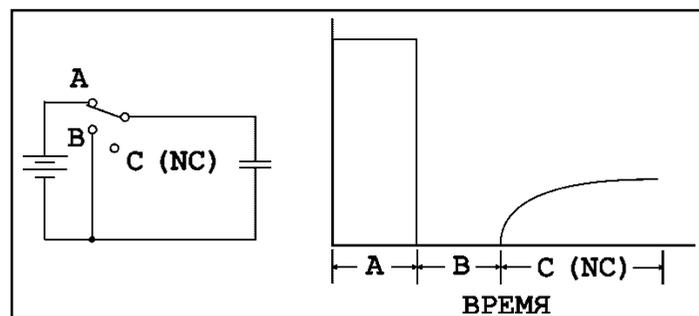


Рис. 4. Восстановление заряда конденсатором

денсаторе за один такт, к энергии, сохраненной за этот такт. Поскольку на высоких частотах потери энергии на конденсаторе моделируются, главным образом, как последовательное сопротивление, фактор рассеяния можно оценить как отношение эквивалентного последовательного сопротивления, ЭПС, к общей реактивности конденсатора:

$$DF \approx w R_{ESR} C$$

Оказывается, фактор рассеяния эквивалентен обратной величине доб-

Строго говоря, полностью устранить паразитную емкость невозможно. Единственный верный способ — предпринять соответствующие меры, чтобы свести этот эффект к минимуму.

Один из возможных способов снижения влияния паразитной емкости — использование экрана Фарадея. Экран Фарадея представляет собой обычный заземленный проводник, расположенный между источником воздействия и контуром, который необходимо экранировать. Ниже, на рис. 8, изображена эквивалентная схема, на которой показано как источник высокочастотного шума  $V_N$  через паразитную емкость  $C$  влияет на общий импеданс цепи  $Z_1$ . Если возможности по управлению источником шума  $V_N$  или расположением цепи  $Z_1$  ограничены или отсутствуют вообще, введение экрана

Фарадея будет наилучшим решением.

$$V_{\text{coupled}} = V_N * \left( \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)$$

Как показано ниже (рис. 9а), экран Фарадея разрывает связующее электрическое поле. Обратите внимание на то, что шумы и токи наводки замыкаются экраном на сам источник, исключая их влияние на  $Z_1$  (рис. 9б).

Еще одним примером может служить емкостная связь в керамических корпусах интегральных схем (рис. 10). В некоторых таких корпусах к металлизированному ободу, расположенному в верхней части корпуса, припаивается крышка из кобальт-никелевого сплава. Производители корпусов предлагают только два варианта: металлизированный ободок может соединиться с одним из угловых выводов корпуса

или же может остаться в подвешенном состоянии. В большинстве логических микросхем в одном из углов корпуса располагается вывод заземления, и тем самым крышка оказывается за-

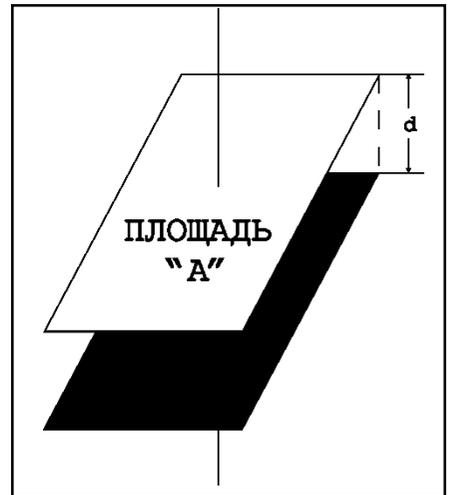


Рис. 6.

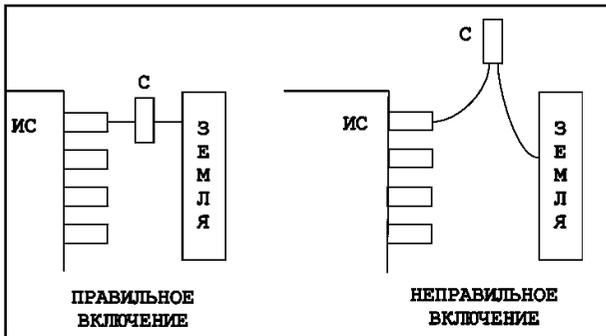


Рис. 5. Примеры включения конденсатора

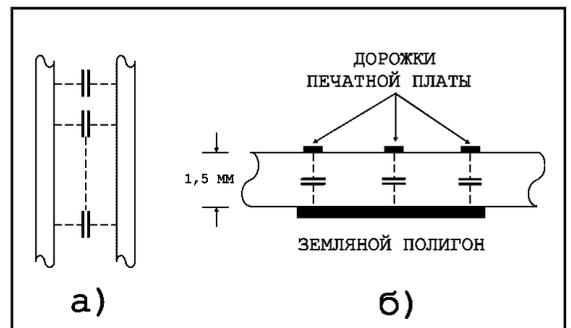


Рис. 7.

Таблица 1. Сравнительные характеристики типов конденсаторов

Тип НРО	Диэлектрическая абсорбция (ДА)	Преимущества	Недостатки
керамические	< 0,1 %	Малый размер корпуса Невысокая стоимость Хорошая стабильность Широкий выбор номиналов Много поставщиков Низкая индуктивность	ДА обычно мала, но может не указываться в спецификации
Полистирол	0,001 %–0,02 %	Недорогие Самый низкий ДА Широкий выбор номиналов Хорошая стабильность	Повреждается при температуре выше +85 °С Большие размеры корпуса Высокая индуктивность
Полипропилен	0,001 %–0,02 %	Недорогие Самый низкий ДА Широкий выбор номиналов	Повреждается при температуре выше +105 °С Большие размеры корпуса Высокая индуктивность
Тефлон	0,003 %–0,02 %	Самый низкий ДА Хорошая стабильность Работа при температуре выше +125 °С Широкий выбор номиналов	Относительно дорогие Большие размеры Высокая индуктивность
МОП	0,1 %	Хорошая стабильность Низкая цена Работа при температуре выше +125 °С Низкая индуктивность	Доступны только малые номиналы емкости
Поликарбонат	0,1 %	Хорошая стабильность Низкая цена Широкий диапазон температур	Большие размеры ДА ограничивает применение только до восьмиразрядных приложений Высокая индуктивность
Полиэфир	0,3 %–0,5 %	Приемлемая стабильность Низкая цена Широкий диапазон температур Низкая индуктивность	Большие размеры ДА ограничивает применение только до восьмиразрядных приложений Высокая индуктивность
Монолитные керамические Слюдяные	> 0,2 % > 0,003 %	Низкая индуктивность Широкий выбор номиналов Малые потери на ВЧ Низкая индуктивность Высокая стабильность Номиналы доступны с точностью 1 % и выше	Низкая стабильность Плохая ДА Слишком большие размеры Малые номиналы (< 10 нФ) Дорогие
Электролитические (алюминий)	Высокая	Большие номиналы Большие токи Высокие напряжения Малые размеры	Значительная утечка Обычно поляризованные Плохая стабильность Плохая точность Достаточно индуктивны
Электролитические (тантал)	Высокая	Малые размеры Большие номиналы Умеренная индуктивность	Очень большая утечка Обычно поляризованные Дорогие Плохая стабильность Плохая точность

земленной. Однако это не касается аналоговых микросхем, многие из которых не имеют вывода заземления в углу корпуса. В этом случае крышка остается в подве-

вешенном состоянии. Существуют такие типы микросхем, в которых крышка соединена с питанием, а не с землей!

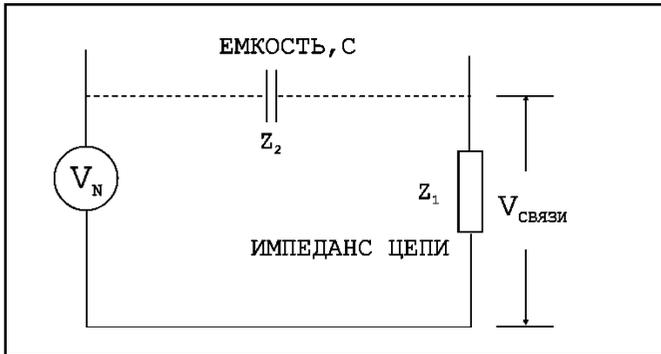


Рис. 8.

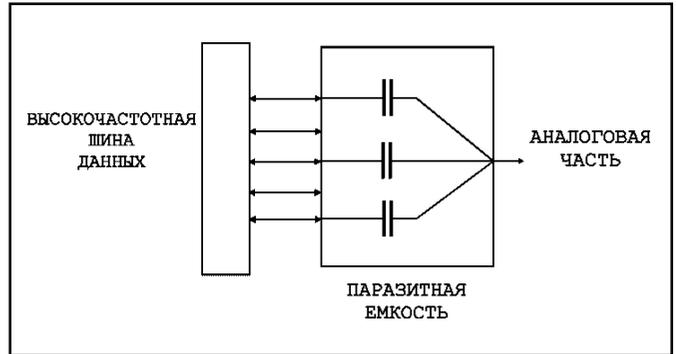


Рис. 12.

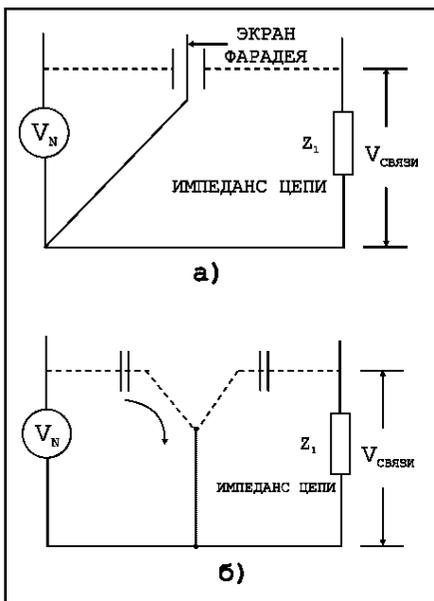


Рис. 9.

шенном состоянии. Оказывается, такие микросхемы гораздо более уязвимы к воздействию электрического поля, чем та же самая схема в неэкранированном пластиковом DIP-корпусе.

В любом случае, независимо от уровня электрических наводок, лучше самостоятельно заземлять крышку корпуса керамической микросхемы там, где это не сделано самим производителем. Для заземления можно использовать обычный проводник, припаянный к крышке

К сожалению, экран Фарадея оказывается непрактичен для устранения паразитной емкости между вывода-

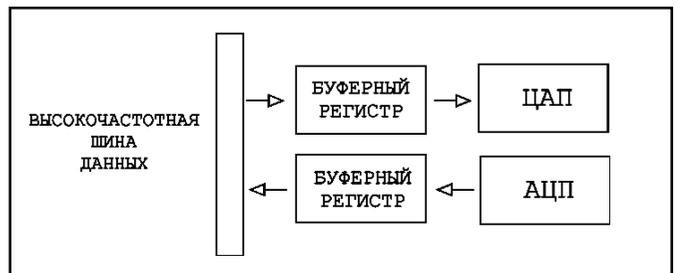


Рис. 13.

ми корпуса интегральной микросхемы (рис. 11). Это имеет важные последствия. Паразитная емкость между двумя выводами и связанной с ними выводной рамкой обычно составляет порядка 0,2 пФ. Реально наблюдаемая величина лежит в пределах 0,05–0,6 пФ.

Рассмотрим преобразователь (АЦП или ЦАП) с высокой разрешающей способностью, подключенный к высокоскоростной шине данных (рис. 12). Каждая линия шины, которая переключается со скоростью 2–5 В/нс, способна через паразитную емкость воздействовать на аналоговый порт преобразователя. В результате проникающие в аналоговую часть преобразователя цифровые фронты снизят производительность преобразователя в целом.

Эта проблема может быть решена, если между цифровой шиной и преобразователем поместить буферный регистр (рис. 13). Несмотря на то что такой способ требует дополнительных элементов, которые занимают место на плате, увеличивают потребление устройства в целом, а также повышают его стоимость, он может значительно улучшить соотношение сигнал-шум преобразователя.

*Сергей Груздев, Москва*

*По материалам фирмы Analog Devices*



Рис. 10.

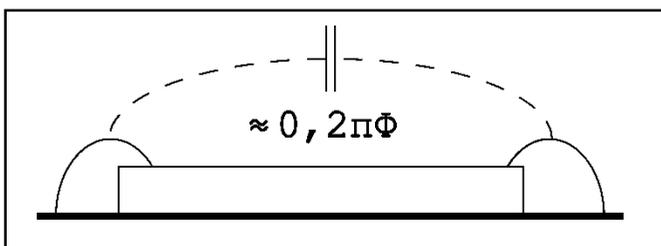


Рис. 11.

(это не повредит микросхему, так как сама схема термически и электрически изолирована от крышки корпуса). Там, где пайка неприемлема, можно использовать проводящую краску или зажим из фосфористой бронзы. Никогда не пытайтесь заземлить крышку корпуса, предварительно не проверив, что она находится в под-

**ОТЛАДОЧНЫЕ СРЕДСТВА  
ВНУТРИСХЕМНЫЕ ЭМУЛЯТОРЫ  
для микропроцессоров:**

DALLAS	DS87C520/530, DS80C320
ATMEL	AT89C51/52/55, AT89C2051
INTEL	80C31/32, 80C85, 80C86
PHILIPS	80C552/562
TEXAS Inst.	TMS320C10

**НПФ «АСАН»  
тел: (095) 286-8475  
E-mail: asgor @ orc.ru**