

**ПАЗАЗИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТАХ**

Р.А. Луцук

Т.А. Новиков

А.О. Якимов

lra20u222@student.bmstu.ru

nta20u673@student.bmstu.ru

yakimovao@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Аннотация**

При выборе электронных компонентов радиоизделий практически всегда необходимо учитывать специфику их применения, вследствие чего придется принимать во внимание паразитные индуктивности и емкости, а также собственные шумы. Идеальная модель пассивных компонентов значительно отличается от реальных моделей, что особенно заметно при работе на высоких частотах. Паразитные эффекты зависят также от внешних факторов, например температуры. В работе рассмотрены основные паразитные эффекты в таких электронных компонентах, как резисторы, диоды, транзисторы, конденсаторы, а также механизмы и условия их проявления. Описаны конструктивные и схемотехнические методы борьбы с ними, даны рекомендации по правильному выбору элементной базы в зависимости от условий работы и эксплуатации конечных устройств.

**Ключевые слова**

Электроника, микроэлектроника, электронные компоненты, электрическая емкость, паразитные эффекты, индуктивность, диод, транзистор

Поступила в редакцию 28.03.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

**Введение.** Работа посвящена исследованию паразитных эффектов в электронных компонентах. Многие современные электронные устройства работают на сверхвысоких частотах. В электрических цепях паразитным элементом называется элемент цепи (резистор, индуктивный элемент или конденсатор), свойством которого обладает электрический радиоэлемент, но наличие которого нежелательно для него по прямому назначению. Например, резистор рассчитан на сопротивление, но также будет иметь нежелательную паразитную емкость. Также при условии отсутствия погрешностей и паразитных эффектов отпадает принципиальная надобность в тактировании устройств, что, конечно же, невозможно, но уменьшение влияния паразитных эффектов позволит увеличить тактовую частоту современных вычислительных средств.

Целью данной работы является анализ и систематизация знаний о механизмах появления и современных методах устранения нежелательных эффектов в электронном радиоизделии на конструктивном и схемотехническом уровне, выявление сильных и слабых сторон этих методов.

Перед рассмотрением каждого компонента по отдельности визуализируем общие методы борьбы с паразитными эффектами, используя ментальную карту (рис. 1).

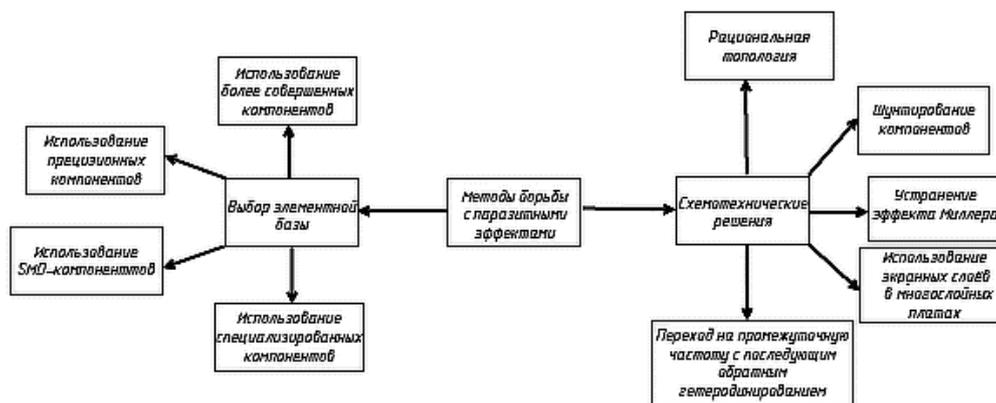


Рис. 1. Общие методы борьбы с паразитными эффектами [1]

Все методы борьбы можно подразделить на две большие группы — схемотехнические решения и выбор элементной базы. К первым относятся методы, реализуемые на этапе проектирования схемы. Поскольку не все компоненты являются идеальными, необходимо уменьшить возможное паразитное воздействие. На этапе выбора элементной базы уже выбирают компоненты с нужным частотным диапазоном, необходимыми паразитными параметрами и возможными шумами.

**Анализ методов борьбы с паразитными эффектами в резисторах.** Резистор — пассивный элемент электрической цепи, обладающий определенным значением электрического сопротивления. В основном резистор используется для преобразования силы тока в напряжение и обратно, управления силой тока и в качестве делителя напряжения. Резистор по праву считается самым распространенным компонентом.

В зависимости от назначения, конструкции и других параметров резисторы классифицируют:

- по характеру изменения сопротивления: постоянные и переменные;
- по материалу резистивного элемента: проволочные, пленочные; металлофольговые, композиционные;
- по способу монтажа: для навесного, для печатного, для микросхем и микромодулей;
- по виду ВАХ: линейные, нелинейные, специальные;
- по назначению: общего назначения, высокочастотные, высокоомные, высоковольтные, прецизионные.

Основными параметрами резистора являются его номинальное сопротивление, максимальная рассеиваемая мощность, допустимое отклонение сопротивления и температурный коэффициент. Но также резисторы обладают и паразитными эффектами, о которых пойдет речь далее.

Для начала рассмотрим схему замещения резистора (рис. 2).

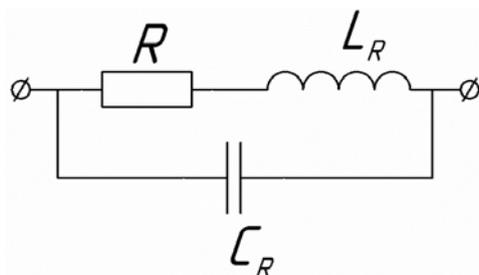


Рис. 2. Схема замещения резистора

На низких частотах реальный резистор можно представить одним резистивным элементом  $R$ . Однако на высоких частотах помимо активного сопротивления присутствуют и реактивные. Их значения рассчитывают по формулам

$$Z_C = -jX_C;$$

$$Z_L = jX_L,$$

где  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ ;  $X_L = 2\pi fL$  ( $X_C$  и  $X_L$  — реактивные сопротивления конденсатора и катушки соответственно;  $f$  — частота, Гц).

Рассчитаем получившиеся комплексные сопротивления. Для последовательно включенной катушки справедлива формула

$$Z = R + jX_L,$$

где  $|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}$ . Соответственно, с ростом частоты импеданс увеличивается.

Для параллельно включенного конденсатора комплексное сопротивление будет иметь вид

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} - \frac{1}{jX_C},$$

$$\text{где } |Z| = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_C^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + (2\pi fC)^2}}.$$

Из полученных выше уравнений видно, что емкость приводит к снижению импеданса, а индуктивность, напротив, способствует увеличению [2]. В результате на частотах выше нескольких МГц импеданс существенно изменяется. Данное обстоятельство иллюстрируется на рис. 2.

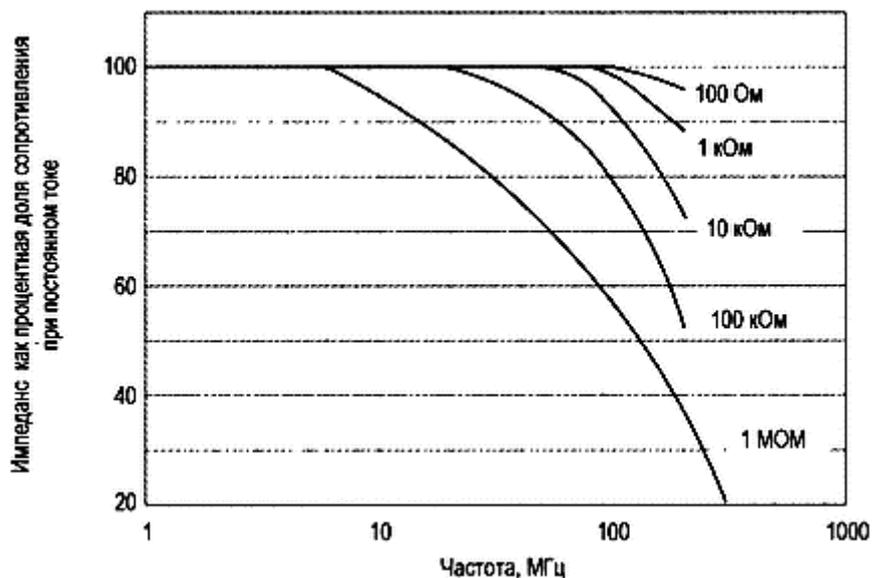


Рис. 3. Зависимость импеданса фольгового резистора от частоты прилагаемого напряжения [2]

**Паразитная индуктивность** у резистора возникает по двум причинам: первая и наиболее существенная — конструкция из проволоки с высоким удельным сопротивлением, которая фактически является катушкой индуктивности, и вторая — индуктивность выводов. Поэтому все проволочные и спиральные резисторы по сравнению с непроволочными гораздо менее высокочастотны и применение их без принятия специальных мер ограничивается областью постоянного тока и диапазоном звуковых частот.

В некоторых случаях заметить наличие индуктивной составляющей у резистора можно невооруженным глазом, по наличию спиральной канавки, которая разрывает токопроводящий слой резистора, превращая его в катушку индуктивности (рис. 4).

У резисторов других типов паразитная индуктивность существенно меньше благодаря отсутствию проволочной составляющей в корпусе. Наименьшую собственную индуктивность имеют SMD-резисторы (англ. surface mount technology — технология поверхностного монтажа), поскольку помимо отсутствия проволоки у них также нет и выводов. В целом SMD-компоненты отличаются от классических проволочных компонентов тем, что монтаж происходит на

поверхности печатной платы, а не через отверстия. Именно поэтому они и получили свое название.

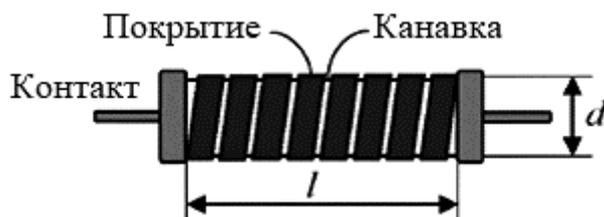


Рис. 4. Спиральная канавка у резистора [3]

Паразитная индуктивность влияет следующим образом: при большом значении частоты напряжения или самой индуктивности фактическое сопротивление увеличено. Это приводит к непредсказуемости работы электрической цепи или выходу ее из строя. Например, короткие импульсные сигналы будут пропущены. Также возникают паразитные магнитные поля, которые приводят к самовозбуждению контура и последующей поломке цепи.

Для борьбы с паразитной индуктивностью рекомендуется:

- использовать бифилярную намотку (рис. 5);
- соединить несколько резисторов параллельно;
- уменьшить размеры резистора.

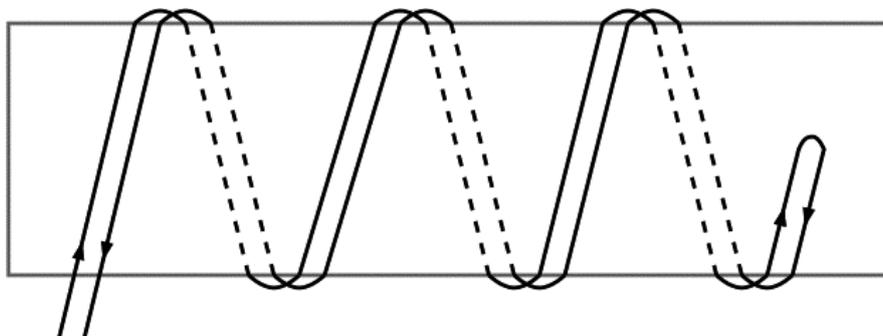


Рис. 5. Бифилярная намотка

**Паразитная емкость** менее вредоносна, однако также важна при выборе резистора для той или иной схемы. У всех резисторов независимо от конструкции она образуется между контактными площадками (выводами) и другими частями схемы. В композиционных резисторах емкости создаются множеством проводимых частиц, удерживаемых вместе связующим диэлектрическим веществом. Также стоит отметить емкость резистора по отношению к земле, которая зависит по большей части от площади резистора и параметров подложки.

Паразитная емкость, как и индуктивность, негативно влияет на работу всей схемы. Она может вызвать в цепи переменного тока нежелательные связи между системными блоками или стать причиной задержки сигнала на высоких частотах. Наиболее чувствительны к емкости схемы высокочастотных усилителей, тактовые генераторы гигагерцовой частоты и микроволновые схемы.

Таким образом, для снижения паразитной емкости необходимо использовать резисторы с короткими выводами, а также маленькими размерами.

**Шумы в резисторах.** Любой резистор создает электрические помехи, называемые шумом, в виде небольших составляющих переменного тока даже при отсутствии приложенного напряжения. Шум достаточно трудно измерить, и он не влияет на сопротивление, но при этом оказывает негативное воздействие на низкоуровневые сигналы и различные усилители. Собственные шумы резистора складываются из теплового шума (шума Джонса) и токового шума [2].

**Тепловой шум** присущ всем видам резисторов, но по значению меньше токового. Тепловой шум характеризуется непрерывным, широким, практически равномерным спектром. Поэтому иногда шум Джонса еще называют белым шумом. Он зависит от сопротивления, температуры и полосы пропускания. Напряжение теплового шума  $U_{\text{дейст}}$  описывается формулой

$$U_{\text{дейст}} = \sqrt{4kRT\Delta f},$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $R$  — сопротивление, Ом;  $T$  — температура, К;  $\Delta f$  — диапазон частот, в котором измеряется энергия шума, Гц.

Тепловой шум одинаков для резисторов с равным сопротивлением независимо от материала резистора. Его можно уменьшить, лишь понизив значение сопротивления или температуры [4].

**Токовый шум** возникает в резисторе при протекании через него тока вследствие эффекта флуктуации контактных сопротивлений между проводниками. При протекании тока возникают местные перегревы, в результате которых изменяются контакты между отдельными частицами токопроводящего слоя и, следовательно, флуктуирует (изменяется) значение сопротивления, что ведет к появлению между выводами резистора ЭДС токовых шумов  $E_i$ . Токовый шум так же, как и тепловой, имеет непрерывный спектр, но интенсивность его увеличивается в области низких частот. Токовый шум описывается формулой

$$E_i = K_i U,$$

где  $E_i$  — максимальное напряжение шума, мкВ;  $U$  — напряжение, при котором проводится измерение, В;  $K_i$  — коэффициент, зависящий от конструкции резистора, свойств резистивного слоя и полосы частот, мкВ/В.

Значение коэффициента  $K_i$  лежит в пределах 0,2...20 мкВ/В. Чем однороднее структура, тем меньше токовый шум. У металлопленочных и углеродистых

резисторов  $K_i < 1,5$  мкВ/В, у композиционных поверхностных  $K_i < 40$  мкВ/В, у композиционных объемных  $K_i < 45$  мкВ/В. У проволочных резисторов токовый шум отсутствует [5].

Помимо перечисленных выше шумов в переменных резисторах имеются так называемые механические шумы, возникающие при работе подвижных контактов.

Таким образом, тонкопленочные, металлофольговые и проволочные резисторы обладают лучшими шумовыми характеристиками. Поэтому их часто используют в усилителях с низким уровнем шума. Композиционные резисторы — одни из худших типов из-за своей конструкции и материалов.

Любой шум во входном сигнале будет усилен на полную мощность. Поэтому очень важно выбрать малошумящий резистор на первом этапе, а также низкое значение сопротивления.

Таким образом, паразитные свойства, возникающие в резисторах, практически полностью зависят от их конструкции. Поэтому на этапе проектирования схемы стоит учитывать номинал, материал, тип корпуса и другие факторы, чтобы выбрать подходящий резистор.

**Анализ методов борьбы с паразитными эффектами в конденсаторах.** Конденсатор представляет собой двухполюсный электрический компонент, который используется для хранения электрического заряда и электрической энергии в виде электрического поля.

Конденсатор состоит как минимум из двух электрических проводников, разделенных расстоянием. Пространство между конденсаторами может быть просто вакуумом, и в этом случае конденсатор называется вакуумным. Однако это пространство обычно заполнено изоляционным материалом, известным как диэлектрик.

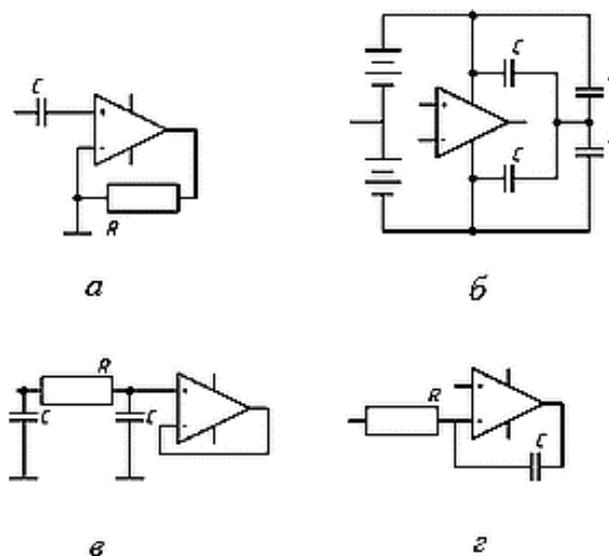
Отношение заряда на одной из пластин конденсатора к напряжению между пластинами называется емкостью и измеряется в фарадах (Ф) [6]:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

Наряду с резисторами и катушками индуктивности конденсаторы — одни из самых основных пассивных компонентов, которые мы используем в схемотехнике.

Перед проектировщиком электронных схем всегда стоит задача правильно подобрать тип конденсатора. Можно обнаружить, что большинство конденсаторов применяются в четырех категориях (рис. 6):

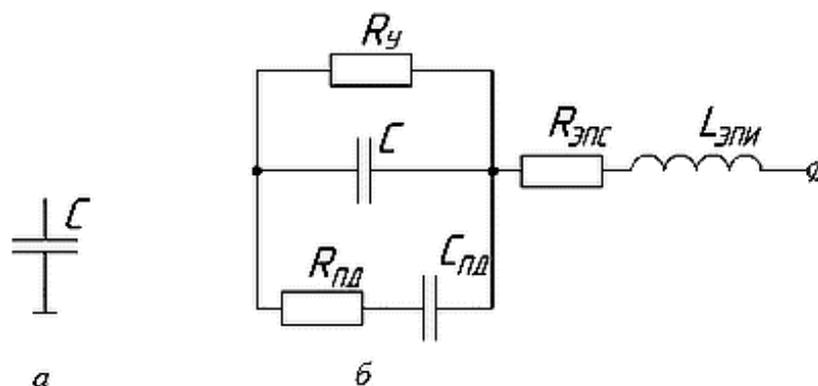
- 1) развязка по переменному току;
- 2) фильтрация цепей постоянного тока;
- 3) активные или пассивные RC-фильтры и частотно-избирательные цепи;
- 4) аналоговые интеграторы и цепи выборки-хранения.



**Рис. 6.** Различные категории применения конденсаторов [7]:  
 а — развязка по переменному току; б — Фильтры цепей переменного тока;  
 в — RC-фильтры; г — аналоговые интеграторы

Существуют десятки распространенных типов конденсаторов (дисковые, пленочные, керамические, электролитические и т. д.), но только один или два лучше всего подходят для конкретного применения. В основном это связано с тем, что реальные конденсаторы,

в отличие от моделей идеальных конденсаторов, имеют дополнительные паразитные характеристики, влияющие на общие характеристики устройства (рис. 7).



**Рис. 7.** Модель реального и идеального конденсатора [2]:  
 а — идеальная модель; б — реальная модель ( $R_y$  — сопротивление утечки;  $R_{элс}$  — эквивалентное последовательное сопротивление;  $R_{пд}$  — сопротивление поглощения диэлектрика;  $C_{пд}$  — емкость поглощения диэлектрика;  $L_{эпи}$  — эквивалентная последовательная индуктивность)

На характеристики конденсаторов влияют:

- 1) утечка, или параллельное сопротивление (parallel resistance);
- 2) эквивалентное последовательное сопротивление (equivalent series resistance, *ESR*);
- 3) эквивалентная последовательная индуктивность (equivalent series inductance, *ESL*);
- 4) микрофонный эффект (sensitive to vibration);
- 5) диэлектрическая абсорбция (dielectric absorption).

**Утечка (параллельное сопротивление).** В идеальном конденсаторе заряд  $Q$  будет изменяться только в ответ на протекание внешнего тока, но в реальном конденсаторе сопротивление утечки будет разряжать конденсатор со скоростью, определяемой постоянной времени  $R_{\gamma}C$ . Электролитические конденсаторы (танталовые и алюминиевые), известные своей высокой емкостью, имеют очень высокие токи утечки (обычно около 5,20 нА/мкФ) из-за низкого сопротивления изоляции, что делает их непригодными для цепей хранения и развязки. Лучшим выбором для развязки цепей переменного тока и цепей накопления заряда является тефлоновые и полипропиленовые, полистирольные.

**Эквивалентное последовательное сопротивление (*ESR*)  $R_{\text{ЭПС}}$**  — суммарное сопротивление конденсатора, включенного последовательно с основным конденсатором и выводами его обкладок. Это сопротивление при протекании больших переменных токов приводит к расходу мощности. Это может иметь серьезные последствия при высоких частотах и больших импульсных токах. Конденсаторы пленочного типа и со слюдяным диэлектриком имеют самые низкие значения эквивалентного последовательного сопротивления.

**Эквивалентная последовательная индуктивность (*ESL*)  $L_{\text{ЭПИ}}$**  — индуктивность выводов конденсатора и его обкладок, включенных последовательно с основным конденсатором. Эквивалентная последовательная индуктивность может вызвать серьезные проблемы на высоких и низких частотах и даже на постоянном токе. Причина заключается

в том, что транзисторы, используемые в прецизионных аналоговых схемах, усиливают резонансные явления, связанные с малой паразитной индуктивностью, которая может быть высокочастотной.

Более подходящими для высокочастотных развязок являются монолитные керамические конденсаторы с низкой эквивалентной последовательной индуктивностью. Они представляют собой многослойные структуры из металлических пленок и керамического диэлектрика.

Электролитические, бумажные и им подобные не очень подходят для высокочастотных цепей развязки. По сути, они представляют собой две скрученные ленты металлической фольги, разделенные диэлектриком. Эти структуры имеют большую собственную индуктивность и ведут себя скорее как индукторы, чем как конденсаторы на частотах выше нескольких мегагерц.

**Тангенс угла диэлектрических потерь.** Поскольку часто бывает трудно отдельно определить сопротивление утечки, эквивалентное последовательное сопротивление и эквивалентную последовательную индуктивность, многие производители объединяют эти параметры вместе и называют тангенсом угла диэлектрических потерь (dissipation factor,  $DF$ ), который описывает неэффективность конденсатора. Этот параметр определяется отношением рассеиваемой энергии к накопленной за один цикл. На практике он равен коэффициенту мощности для диэлектрика. Если рассеяние на высоких частотах в основном определяется последовательным сопротивлением, отношение  $ESR$  к общему реактивному сопротивлению дает достаточно точный результат.

$$DF = \omega R_{\text{ЭПС}} C.$$

Тангенс угла диэлектрических потерь эквивалентен также обратной величине добротности конденсатора  $Q$ , которую иногда указывает производитель.

**Микрофонный эффект.** Недостаток монолитных керамических конденсаторов — микрофонный эффект (т. е. чувствительность к вибрациям). В этом случае может возникнуть собственный резонанс из-за высокой добротности  $Q$ , соответствующий малому значению последовательного сопротивления и малому значению последовательной индуктивности.

**Диэлектрическая абсорбция (dielectric absorption, RDA, CDA).** Монолитные керамические конденсаторы служат отличными компонентами высокочастотной развязки, но из-за большого коэффициента диэлектрической абсорбции их не применяют в качестве элементов фиксации в усилителях выборки-хранения (SHA). Эффект диэлектрического поглощения ведет себя как гистерезис внутреннего заряда. Это происходит, когда конденсатор быстро разряжается и часть заряда восстанавливается при отключении клемм (рис. 8). Поскольку количество восстановленного заряда является функцией начального заряда, и использование таких конденсаторов в схемах выборки и хранения сопряжено с ошибками. Для таких применений рекомендуется использовать фторопластовые, полипропиленовые и полистирольные конденсаторы, коэффициент диэлектрической абсорбции которых очень мал (обычно менее 0,01 %).

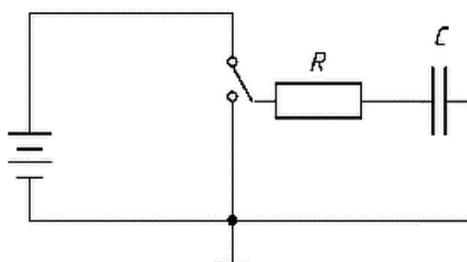


Рис. 8. Зарядка и разрядка конденсатора [2]

Отметим, что при производстве разных конденсаторов используют различные материалы. Из этого следует, что у разных материалов различные свойства, именно поэтому конденсаторы распределяются по типам. Исходя из этого мы вправе утверждать, что паразитные свойства, которые есть у этого пассивного элемента, появляются у него на основе материалов, из которых он сделан. Благодаря этому главной проблемой при выборе конденсаторов для электронных схем является знание их дополнительных компонентов. Понимание влияния паразитных компонентов поможет сделать правильный выбор типа конденсатора для каждого конкретного приложения. Для простоты и удобства разработчиков и обычных радиолюбителей производители, как правило, специфицируют результирующие характеристики конденсаторов.

**Заключение.** Отметим, что на данный момент выработаны эффективные методы борьбы со всеми основными паразитными эффектами, поэтому схемотехникам необходимо уметь грамотно их использовать и верно подбирать элементную базу. Перспективным представляется усовершенствование технологического процесса производства электронных компонентов и общее повышение качества их производства, а не разработка новых методов конструктивного или схемотехнического устранения нежелательных эффектов. Также возможна разработка методов практического применения некоторых паразитных эффектов для создания новых устройств со специфичными свойствами, как, например, барьерная емкость в диодах послужила основой создания нового электронного прибора — варикапа.

### Литература

- [1] Журавлева Л.В., Власов А.И. Визуализация творческих стратегий с использованием ментальных карт. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*, 2013, № 1 (21), с. 133–140.
- [2] Монк С., Шерц П. *Электроника. Теория и практика*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2018, 1170 с.
- [3] Кашкаров А. *Электронные самоделки*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2007, 304 с.
- [4] Фрумкин Г.Д. *Расчет и конструирование радиоаппаратуры*. Москва, Высшая школа, 1989, 466 с.
- [5] Никулин Н.В., Назаров А.С. *Радиоматериалы и радиокомпоненты*. Москва, Высшая школа, 1986, 211 с.
- [6] Хоровиц П., Хилл У. *Искусство схемотехники*. Москва, Бином, 2014, 704 с.
- [7] Джонс М. *Электроника — практический курс*. Москва, Техносфера, 2006, 512 с.

**Луцук Ренат Александрович** — студент кафедры «Проектирование и технология производства ЭА», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Новиков Тимофей Александрович** — студент кафедры «Проектирование и технология производства ЭА», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Якимов Артем Олегович** — студент кафедры «Проектирование и технология производства ЭА», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Луцук Р.А., Новиков Т.А., Якимов А.О. Паразитные эффекты в электронных компонентах. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 04 (81).

<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-4-889>

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN METHODS OF SOLDERING PRINTED CIRCUIT BOARDS

R.A. Lutsuk  
T.A. Novikov  
A.O. Yakimov

lra20u222@student.bmstu.ru  
nta20u673@student.bmstu.ru  
yakimovao@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

Often, when choosing electronic component, it is necessary to pay attention to the specifics of their application, as a result of which it is necessary to pay attention to parasitic inductances and capacitances, as well as intrinsic noise. The ideal model of passive components differs significantly from real models, that is especially noticeable when operating at high frequencies. Parasitic effects also depend on external factors, such as temperature. The work contains the main parasitic effects in such electronic components as: resistors, diodes, transistors, capacitors, as well as the mechanisms and conditions for their appearance. Constructive and circuitry methods of dealing with them, recommendations for the correct choice of the element base, depending on the conditions of working and using of the end devices are given.

### Keywords

Electronics, microelectronics, parasitic effects, capacitance, inductance, diode, transistor, resistor

Received 28.03.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

---

### References

- [1] Zhuravleva L.V., Vlasov A.I. Visualization of creative strategies using mental maps. *Prikladnyy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*, 2013, no. 1 (21), pp. 133–140. (In Russ.).
- [2] Scherz P., Monk S. *Practical electronics for inventors*. N.Y., McGraw-Hill Education, 2013, 1040 p. (Russ. ed.: Scherz, P., Monk, S. *Elektronika. Teoriya i praktika*. St. Petersburg: BHV-Peterburg Publ., 2018, 1168 p.).
- [3] Kashkarov A. *Elektronnye samodelki* [Electronic homemade products]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2007, 304 p. (In Russ.).
- [4] Frumkin G.D. *Raschet i konstruirovaniye radioapparatury* [Calculation and design of radio equipment]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989, 466 p. (In Russ.).
- [5] Nikulin N.V., Nazarov A.S. *Radiomaterialy i radiokomponenty* [Radio materials and radio components]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986, 211 p. (In Russ.).
- [6] Horowitz P., Hill W. *The art of electronics*. Cambridge, CUP Publ., 2006. 975 p. (Russ. ed.: Horowitz P., Hill W. *Iskusstvo skhemotekhniki*. Moscow, Mir, Binom Publ., 209. 704 p.).
- [7] Johns M.H. *A practical introduction to electronic circuits*. Cambridge, CUP Publ., 1996. 548 p. (Russ. ed.: Johns M.H. *Elektronika — prakticheskiy kurs*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013. 512 p.).

**Lutsuk R.A.** — Student of Department “Design and production technology of EA”, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Novikov T.A.** — Student of Department “Design and production technology of EA”, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Yakimov A.O.** — Student of Department “Design and production technology of EA”, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Lutsuk R.A., Novikov T.A., Yakimov A.O. Comparative analysis of modern methods of soldering printed circuit boards. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 04 (81). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-4-889>