

II. 1 Элементы электронных устройств

1. Классификация линий связи и их элементов

В большинстве случаев, как мы увидим позже, электромагнитные помехи передаются посредством паразитных реактивных элементов – емкостей и индуктивностей. Паразитные наводки – это не предусмотренная электрической схемой и конструкцией передача напряжения, тока или мощности от одного радиотехнического устройства к другому или одной части электронной системы в другую. Наводки возникают вследствие паразитных связей между ними или их частями. Паразитные связи невозможно указать на принципиальной электрической схеме, т.к. они зависят от конструкции, компоновки элементов и РЭС в целом и почти не поддаются расчету. Здесь мы рассмотрим основные свойства элементов электронных схем и их эквивалентные схемы, включающие паразитные элементы.

При группировке элементов по узлам и блокам между ними образуется большое число электрических связей, которые можно разделить на электрически “короткие” и “длинные”.

Электрически “**короткой**” называют линию связи, время распространения сигнала в которой много меньше величины переднего фронта, передаваемого по линии импульса. Сигнал, отраженный от несогласованных нагрузок в этой линии связи, достигает источника раньше, чем успеет существенно измениться входной импульс. Свойства такой линии можно описать сосредоточенными сопротивлениями, емкостью, индуктивностью.

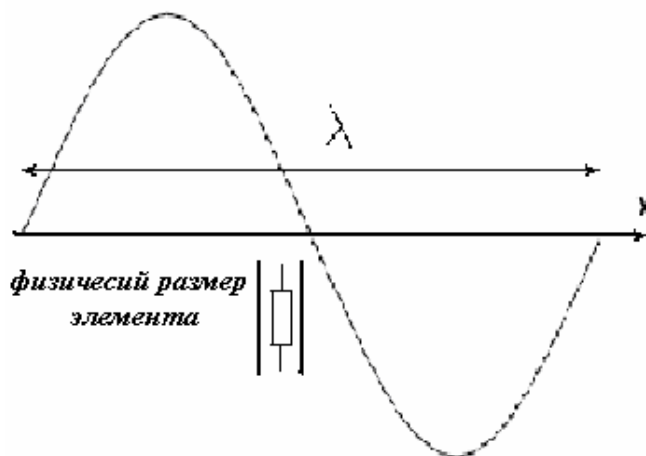
Электрически “**длинная**” линия связи характеризуется временем распространения сигнала, много большим фронта импульса. В этой линии сигнал, отраженный от ее конца, приходит к ее началу после окончания фронта импульса и искажает его форму. Это линии с распределенными параметрами. В пределах ячеек и модулей связи линии, как правило, “короткие”.

В современных радиоэлектронных устройствах наиболее часто встречаются следующие элементы: резисторы с сопротивлением R , конденсаторы с емкостью C , катушки индуктивности с индуктивностью L , полупроводниковые диоды и транзисторы, ИМС. В радиоэлектронной аппаратуре широко используются и электронно-вакуумные приборы - диоды, триоды, тетроды, пентоды и т. п. Однако в настоящее время они используются чаще всего в генераторах большой мощности.

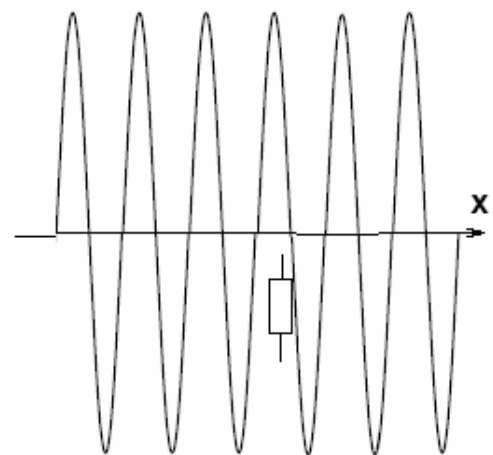
Когда размеры элементов и цепей много меньше длины электромагнитной волны λ (длина волны в метрах равна $300/f$ [МГц]), то токи и напряжение в таких цепях зависят только от времени, но не зависят от координаты X , так как при малых размерах цепи координаты всех элементов достаточно точно описываются одним и тем же значением координаты X .

Такие элементы называются **сосредоточенными**, а цепи—цепями с **сосредоточенными параметрами**. Эти цепи описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями. Примером такой цепи является любая цепь, содержащая дискретные элементы, резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы и т. д.

Если же размеры элементов с параметрами R, C, L сравнимы с длиной волны λ , элементы являются не сосредоточенными, а **распределенными** по цепи, и так как время прохождения сигнала по цепи сравнимо с периодом колебаний, то токи и напряжение в разных точках цепи зависят не только от времени, но и от координаты x . Примером этой цепи является телевизионный кабель, связывающий телевизионную антенну с входом телевизионного приемника. Такие цепи называются **цепями с распределенными параметрами**. Они описываются уравнениями в частных производных.



Цепь со сосредоточенными параметрами



Цепь с распределенными параметрами

Критерии характера цепи

2. Сосредоточенные элементы цепей

Элементы делятся на линейные и нелинейные. Если параметры R, L, C не зависят от значений токов и напряжений, то соответствующие элементы и цепи, содержащие эти элементы, являются линейными. В силу этого ток, напряжение и их производные связаны линейными зависимостями

$$u_R = i_R(t)R, i_C(t) = C \frac{du}{dt}, u_L = L \frac{di}{dt}$$

где u_R, u_C, u_L - напряжения на резисторе, конденсаторе и индуктивности, а i_R, i_C, i_L - токи через эти элементы.

Если же параметры R, L, C зависят от токов и напряжений, то соответствующие элементы, цепи и соотношения между токами, напряжениями и их производными являются **нелинейными**.

Напомним кратко свойства сосредоточенных элементов цепей (рис.).

Переменный ток $i_R = i_0 \sin \omega t$, протекающий по **активному сопротивлению** R , по закону Ома вызывает падение напряжения $u = i_R R = i_0 R \sin \omega t$. Сдвига фаз между током i_R и напряжением u_R на активном сопротивлении R нет.

Заряд конденсатора связан с током формулой $i_C(t) = \frac{dq}{dt}$. Ток

$$i = i_0 \sin \omega t, \text{ т.е. заряд } q = \int i dt = i_0 \int \sin \omega t dt = -\frac{i_0}{\omega} \cos \omega t$$

Напряжение **на конденсаторе** равно

$$U = \frac{q}{C} = -\frac{i_0}{\omega C} \cos \omega t = \frac{i_0}{\omega C} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

Сдвиг фаз между I и U на емкости: напряжение отстает от тока на угол $\pi/2$. Заряд на конденсаторе (т.е. напряжение) накапливается (уходит) с задержкой по отношению к току.

Для амплитуд по закону Ома $i_0 = \frac{U}{R_c}$, где $R_c = \frac{1}{\omega C}$ - емкостное сопротивление.

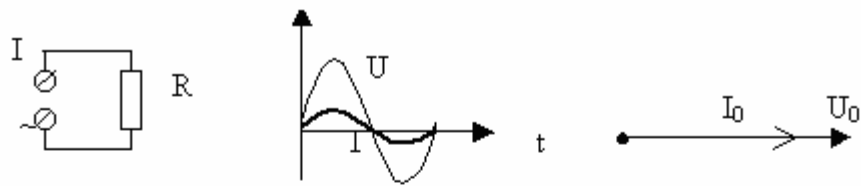
В **цепи с индуктивностью** по закону Ома для неоднородной цепи с э.д.с. U справедливо $u = iR - \varepsilon$, (где ε - э.д.с. самоиндукции). С учетом того,

что $\varepsilon = -L \frac{di}{dt}$, получим при $R \rightarrow 0$

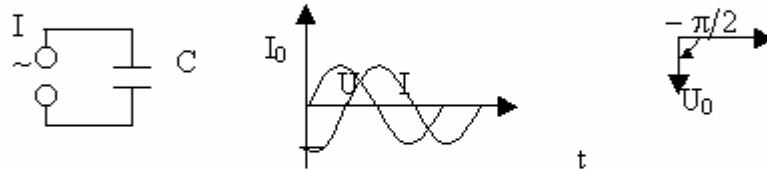
$$U = L \frac{di}{dt} = Li_0 \omega \cos \omega t = i_0 \omega L \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

Сдвиг фаз между I и U на индуктивности: напряжение опережает ток на угол $\pi/2$. (из-за экстратока самоиндукции) $u = i_0 R_L$, где $R_L = \omega L$ - индуктивное сопротивление. Приведенные выше соотношения справедливы для идеальных элементов. Реальные элементы имеют отличные от идеальных свойства.

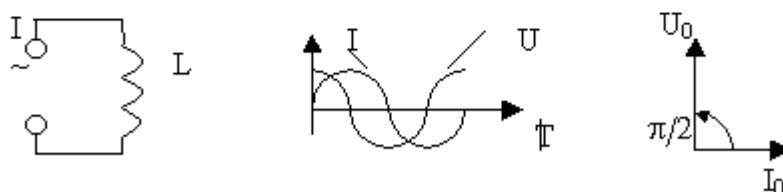
Линейные и нелинейные *резисторы часто называют безынерционными элементами*, так как они не накапливают заряд или магнитный поток, и ток через этот элемент мгновенно изменяется при изменении напряжения. Линейные и нелинейные *конденсаторы и индуктивности являются инерционными элементами*, поскольку в результате накопления заряда или возникновения магнитного потока напряжения или токи через эти элементы не могут мгновенно измениться. Эти элементы могут накапливать энергию. Соответственно безынерционными или инерционными называют цепи, содержащие эти элементы.



Активное сопротивление в цепи переменного тока



Емкость в цепи переменного тока



Индуктивность в цепи переменного тока

2. 1 Мощность в элементах электрических цепей

Выражение для мгновенного значения мощности в электрических цепях имеет вид:

$$p = ui$$

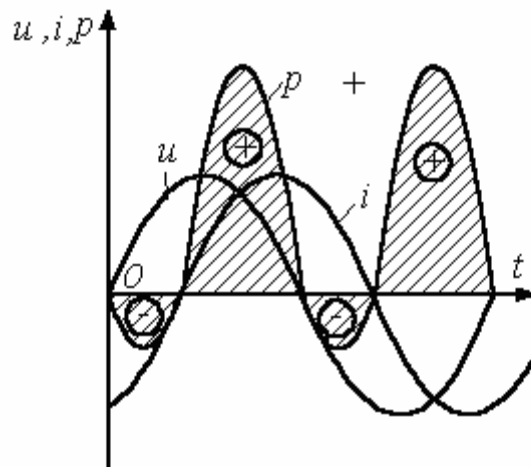
Приняв начальную фазу напряжения за нуль, а сдвиг фаз между напряжением и током за $-\varphi$, получим:

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) \end{aligned}$$

Итак, мгновенная мощность имеет постоянную составляющую и гармоническую составляющую, угловая частота которой в 2 раза больше угловой частоты напряжения и тока.

Когда мгновенная мощность отрицательна, а это имеет место (см. рис.), когда u и i разных знаков, т.е. когда направления напряжения и тока в двухполюснике противоположны, энергия возвращается из двухполюсника источнику питания. Такой возврат энергии источнику происходит за счет того, что энергия периодически запасается в магнитных и электрических полях соответственно индуктивных и емкостных элементов, входящих в состав

двухполюсника. Энергия, отдаваемая источником двухполюснику в течение времени t равна $\int_0^t p dt$.



Мгновенная мощность

Среднее за период значение мгновенной мощности называется **актив-**

ной мощностью

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \text{ (Вт)}$$

Принимая во внимание, что $\int_0^T \cos(2\omega t - \varphi) dt = 0$, из (3) получим:

$$P = UI \cos \varphi$$

Активная мощность, потребляемая пассивным двухполюсником, не может быть отрицательной (иначе двухполюсник будет генерировать энергию), поэтому $\cos \varphi \geq 0$, т.е. на входе пассивного двухполюсника $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$.

Случай $P=0$, $\varphi = \left| \frac{\pi}{2} \right|$ теоретически возможен для двухполюсника, не имеющего активных сопротивлений, а содержащего только идеальные индуктивные и емкостные элементы.

2.1.1 Резистор (идеальное активное сопротивление).

Здесь напряжение и ток (см. рис. 2) совпадают по фазе ($\varphi = 0$), поэтому мощность $p = ui$ всегда положительна, т.е. резистор потребляет активную мощность

$$P = UI \cos \varphi = |\cos 0 = 1| = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}.$$

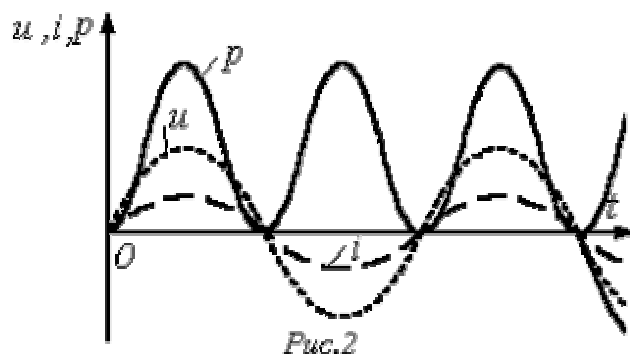


Рис.2

2.1.2 Катушка индуктивности (идеальная индуктивность)

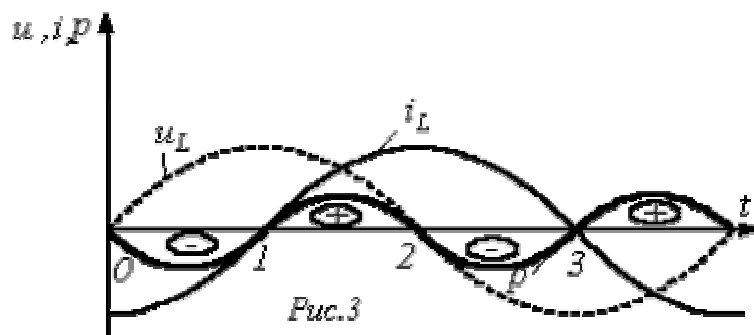


Рис.3

При идеальной индуктивности ток отстает от напряжения по фазе на $\frac{\pi}{2}$. Поэтому в соответствии с (3) можно записать

$$p = U_L I_L \cos \frac{\pi}{2} - U_L I_L \cos \left(2\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -U_L I_L \sin 2\omega t.$$

Участок 1-2: энергия $\frac{Li^2}{2}$, запасаемая в магнитном поле катушки, нарастает.

Участок 2-3: энергия магнитного поля убывает, возвращаясь в источник.

2.1.3. Конденсатор (идеальная емкость)

Аналогичный характер имеют процессы и для идеальной емкости. Здесь

$\varphi = -\frac{\pi}{2}$. Поэтому из (3) вытекает, что $p = U_C I_C \sin 2\omega t$.

Таким образом, в катушке индуктивности и конденсаторе активная мощность не потребляется ($P=0$), так как в них не происходит необратимого преобразования энергии в другие виды энергии. Здесь происходит только циркуляция энергии: электрическая энергия запасается в магнитном поле ка-

тушки или электрическом поле конденсатора на протяжении четверти периода, а на протяжении следующей четверти периода энергия вновь возвращается в сеть. В силу этого катушку индуктивности и конденсатор называют реактивными элементами, а их сопротивления X_L и X_C , в отличие от активного сопротивления R резистора, – реактивными.

Интенсивность обмена энергии принято характеризовать наибольшим значением скорости поступления энергии в магнитное поле катушки или электрическое поле конденсатора, которое называется **реактивной мощностью**.

В общем случае выражение для реактивной мощности имеет вид:

$$Q = UI \sin \varphi$$

Она положительна при отстающем токе (индуктивная нагрузка- $\varphi > 0$) и отрицательна при опережающем токе (емкостная нагрузка- $\varphi < 0$). Единицу мощности в применении к измерению реактивной мощности называют **вольт-ампер реактивный (ВАр)**.

В частности для катушки индуктивности имеем:

$$Q_L = UI \sin \varphi = UI, \text{ так как } \varphi = \frac{\pi}{2}.$$

$$Q_L = UI = \omega L I^2 = \omega L \frac{I_m^2}{2} = \omega \left[\frac{L I_m^2}{2} \right].$$

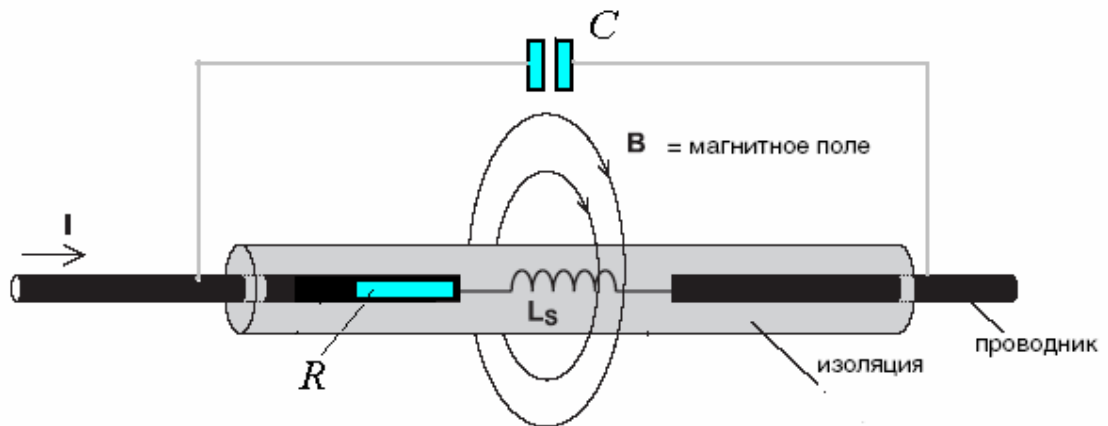
Из последнего видно, что реактивная мощность для идеальной катушки индуктивности пропорциональна частоте и максимальному запасу энергии в катушке. Аналогично можно получить для идеального конденсатора:

$$|Q_C| = \omega \left[\frac{C I_m^2}{2} \right].$$

Радиоэлектронные цепи делятся на пассивные и активные. Если к цепи не подключен источник энергии - источник питания по постоянному току, то согласно закону сохранения энергии мощность колебаний в такой системе меньше или равна мощности генератора переменного тока на входе цепи. В такой цепи не происходит усиления по мощности или генерации колебаний, и она называется пассивной. Примерами пассивной цепи является любая цепь, содержащая резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности с параметрами R , C , L и источник переменного тока. В активных цепях осуществляется преобразование энергии источника питания по постоянному току в энергию колебаний переменного тока и обеспечивается или усиление или генерация колебаний.

3. Элементы электрических цепей как неидеальные элементы

При протекании тока через проводник вокруг него образуется электромагнитное поле. Если ток станет меняться, то магнитная компонента этого поля станет противодействовать изменению тока, т.е. проводник будет действовать как индуктивность. А выводы проводника, имеющие разные потенциалы, будут представлять собой емкость. Таким образом, проводник с током представляет собой сочетание таких элементов цепи как сопротивление, индуктивность и емкость (рис.).

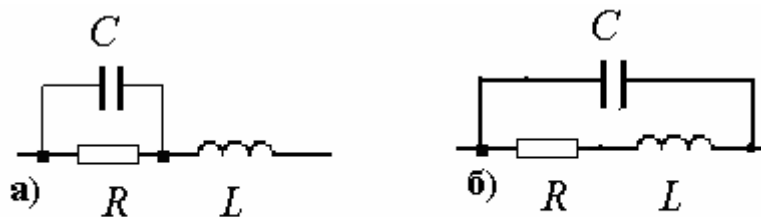


Элементы схем в проводнике с током:

R сопротивление, C паразитная емкость, L_s паразитная индуктивность

С ростом частоты пассивные компоненты электронных систем ведут себя далеко не так, как предполагается. Они приобретают новые свойства.

Резистор. Различают три категории сопротивлений – проволочные, пленочные и углеродные композитные. Эквивалентная схема резистора, как и конденсатора, в разных книгах рисуется немного по разному и ее варианты представлены на **рис.**



Эквивалентные схемы резистора

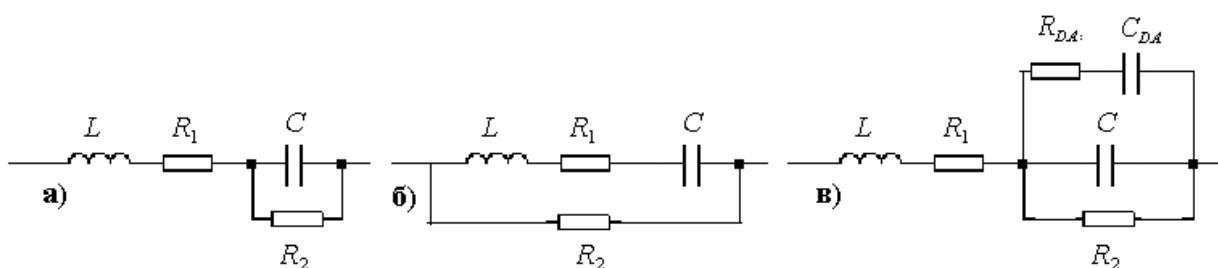
Вариант б) имеет много общего с резонансным параллельным контуром, а вариант а) имеет много общего с последовательным контуром. Но резисторы в качестве контуров ни на каких частотах не используются. Величина паразитной емкости составляет 0.1-0.5 пФ. Индуктивность создается выводами. Самую большую индуктивность имеют проволочные резисторы, поэтому на высоких частотах они не используются.

Легко понять, как *проволочный резистор* может превращаться в индуктивность, поскольку он представляет собой катушку с проводом из высоко-

омного металла. Большинство разработчиков электронных устройств не имеют понятия о внутренней структуре *пленочных резисторов*, которые также представляют собой катушку, правда, из металлической пленки. Поэтому пленочные резисторы также обладают индуктивностью, которая меньше, чем у проволочных резисторов. Пленочные резисторы с сопротивлением не более 2 кОм можно свободно использовать в высокочастотных схемах. Выводы резисторов параллельны друг другу, поэтому между ними существует заметная емкостная связь. Для резисторов с большим сопротивлением межвыводная емкость будет уменьшать полный импеданс на высоких частотах. В общем случае любой проводник или токовая дорожка в печатной плате должна быть представлена приведенной выше эквивалентной схемой, содержащей и реактивные элементы – емкость и индуктивность.

Конденсатор никогда не ведет себя как идеальная емкость. Конденсаторы одной емкости, но разных типов не эквивалентны и не взаимозаменяемы. На высоких частотах конденсатор может вести себя как индуктивность. 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. На высоких частотах его эквивалентная схема может быть представлена в виде, приведенном на **рис. а, б, в**. (Такое обилие схем для простого конденсатора встречается в литературе).

На всех рисунках емкость C является собственно емкостью конденсатора, индуктивность L представляет собой индуктивность выводов конденсатора, сопротивление R_1 - это сопротивление выводов, и сопротивление R_2 - это собственно сопротивление диэлектрика между пластинами конденсатора.



Эквивалентные схемы конденсатора

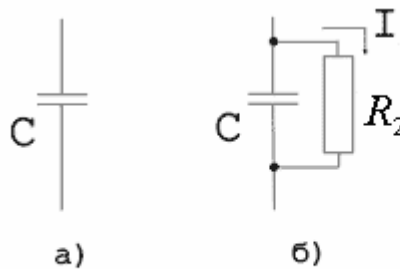
Для каждого конкретного применения, необходимо понимать последствия, связанные с паразитными компонентами конденсатора. Сами величины паразитных элементов конденсатора зависят от материалов, используемых при его изготовлении.

Поскольку на определенной частоте из-за индуктивности в конденсаторе может возникнуть резонанс, то конденсатор характеризуется некоей мак-

симальной частотой. С ростом частоты импеданс конденсатора из-за последовательной индуктивности растет.

Самыми распространенными паразитными эффектами конденсатора являются утечка заряда конденсатора (параллельное сопротивление R_2), эквивалентное последовательное сопротивление (R_1), эквивалентная последовательная индуктивность (L) и диэлектрическая абсорбция (DA память — R_{DA}, C_{DA}) (рис. в).

Утечка заряда конденсатора (R_2) 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. 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. (В схеме на рис. б сопротивление утечки между обкладками R_2 включено между выводами конденсатора, что, возможно, менее точно).

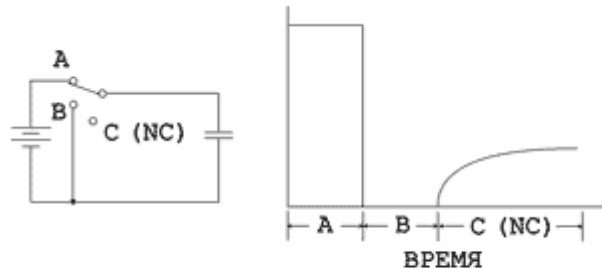


Идеальный конденсатор и модель утечки

Под эквивалентным последовательным сопротивлением R_1 подразумевают *сопротивление выводов конденсатора последовательно с эквивалентным сопротивлением пластин конденсатора*. Наличие последовательного сопротивления 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 когда через конденсатор текут значительные пульсирующие токи. Наименьшим R_1 обладают слюдяные и пленочные конденсаторы.

Эквивалентная последовательная индуктивность L конденсатора представляет собой *индуктивность выводов конденсатора последовательно с эквивалентной индуктивностью пластин конденсатора*. Подобно сопротивлению R_1 , индуктивность L также может создать проблемы на высоких частотах (сотни мегагерц или единицы гигагерц). На таких частотах наличие даже малой индуктивности может повлечь усиление резонанса в цепи.

Диэлектрическая абсорбция представляет собой внутреннее распределение заряда. Если заряженный конденсатор быстро разрядить, а затем разомкнуть его цепь, наличие диэлектрической абсорбции приведет к частичному восстановлению заряда конденсатора (рис.). Количество восстановленного заряда 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



Восстановление заряда конденсатором

для хранения заряда.)

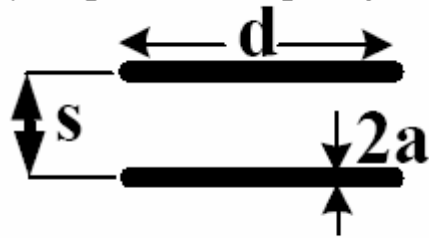
Иногда встречается термин «фактор рассеяния». Поскольку указать в отдельности характеристики эквивалентной последовательной индуктивности, эквивалентного последовательного сопротивления и утечки конденсатора достаточно сложно, многие производители объединяют их все единым термином — «*фактор рассеяния*» (*dissipation factor* — **DF**), который, по существу, описывает неэффективность конденсатора. Фактор рассеяния определяется как отношение энергии, рассеиваемой на конденсаторе 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), в нашем случае R_2 к общей реактивности конденсатора:

$$DF = \omega R_2 C$$

Для малых значений емкости важно оставлять длину выводов короткой. Сочетание паразитных индуктивности и емкости может создать резонансный контур. Полагая, что выводы имеют индуктивность порядка 8 нГн на один сантиметр длины, конденсатор емкостью 0,01 мкФ с выводами длиной по одному сантиметру будет иметь резонансную частоту около 12,5 МГц. Этот эффект был известен инженерам, которые десятилетия назад разрабатывали электронные вакуумные приборы.

Две проводящие металлические поверхности всегда образуют конденсатор. Два параллельных провода тоже создают конденсатор. Конструкция такого конденсатора и формула для его емкости приведены на рис.

Два проводника радиусом a''



$$C = \frac{\pi \epsilon d}{\cosh^{-1}(s / 2a)}$$

Емкость двух параллельных проводников

Печатная плата

Сама печатная плата обладает характеристиками рассмотренных выше пассивных компонентов, правда, не столь очевидными.

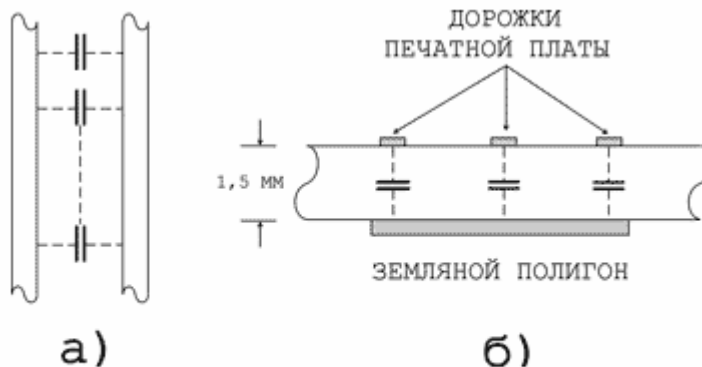
Рисунок проводников на печатной плате может быть как источником, так и приемником помех. Хорошая разводка проводников уменьшает чувствительность аналоговой схемы к излучению источников.

Печатная плата восприимчива к излучению, поскольку проводники и выводы компонентов образуют своеобразные антенны.

Мы рассмотрели конденсатор как конструктивный элемент схемы. Но возможны и паразитные емкости. Паразитная емкость образуется всякий раз, когда два проводника расположены близко друг к другу (особенно если они параллельны) и при этом не соединены между собой

Паразитная емкость обычно образуется между параллельными дорожками печатной платы (рис. а) или между дорожками и полигонами на противоположных сторонах печатной платы (рис. б). Для стандартного материала, из которого изготавливаются платы ($\epsilon = 4.7$, $d = 1,5$ мм), емкость между проводниками, расположенными на противоположных сторонах печатной платы, составляет около 3 пФ/см². На частоте 250 МГц емкость в 3 пФ будет обладать реактивностью в 212,2 Ом!

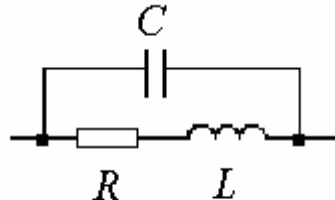
Строго говоря, полностью устранить паразитную емкость невозможно. Единственный способ — предпринять соответствующие меры, чтобы свести этот эффект к минимуму.



Паразитные емкости в печатной плате

Индуктивность зависит от сердечника, на который намотана обмотка. Сердечник, в свою очередь, бывает замкнутый или в виде стержня. Эквивалентная схема индуктивности имеет следующий вид (рис.).

В целом индуктивность с воздушным сердечником или сердечником в виде стержня создает больше помех окружающим электронным системам, чем сердечник с замкнутым магнитопроводом, поскольку в первом случае силовые линии магнитного поля дальше простираются от индуктивности.



Эквивалентная схема индуктивности

Природу возникновения паразитного сопротивления легко понять - витки катушки выполнены из провода, обладающего некоторым сопротивлением на единицу длины. Паразитная емкость возникает оттого, что следующий виток катушки расположен вплотную к предыдущему, и между близко расположенными проводниками возникает емкостная связь. Паразитная емкость ограничивает верхнюю рабочую частоту. Небольшие проволочные индуктивности начинают становиться неэффективными в диапазоне 10...100 МГц.

Аналогично тому, что два параллельных проводника обладают взаимной емкостью, два проводника обладают и взаимной индуктивностью. Индуктивность определяется как отношение магнитного потока к протекающему в замкнутом контуре току, который и создает этот магнитный поток. Необходимым условием существования индуктивности является наличие замкнутого контура с током.

Два проводника радиусом a "

$$L \equiv \frac{\mu d}{\pi} \cosh^{-1}(s / 2a)$$

Индуктивность двух параллельных проводников

Взаимная индуктивность возрастает с ростом площади петли тока и уменьшается, если уменьшается размер проводников. Кроме этого, чтобы вычислить взаимную индуктивность двух проводников, надо знать магнитную проницаемость среды:

$$L = \frac{\mu d}{\pi} \cosh^{-1}(s/2a) \approx \frac{\mu d}{\pi} \ln(s/a)$$

Эта формула определяет взаимную индуктивность двух параллельных бесконечно длинных проводников на единицу длины. Если расстояние между проводниками “ s ” много меньше радиуса проводников “ a ”, то гиперболический косинус можно аппроксимировать функцией $\ln$. Чтобы уменьшить индуктивность надо уменьшить длину проводников и расстояние между ними и увеличить сечение проводников.

Напомним еще раз, чтобы развеять бытующее заблуждение, что индуктивность отдельного проводника не существует, поскольку он не создает с замкнутую петлю тока.

4. Индуктивно связанные цепи

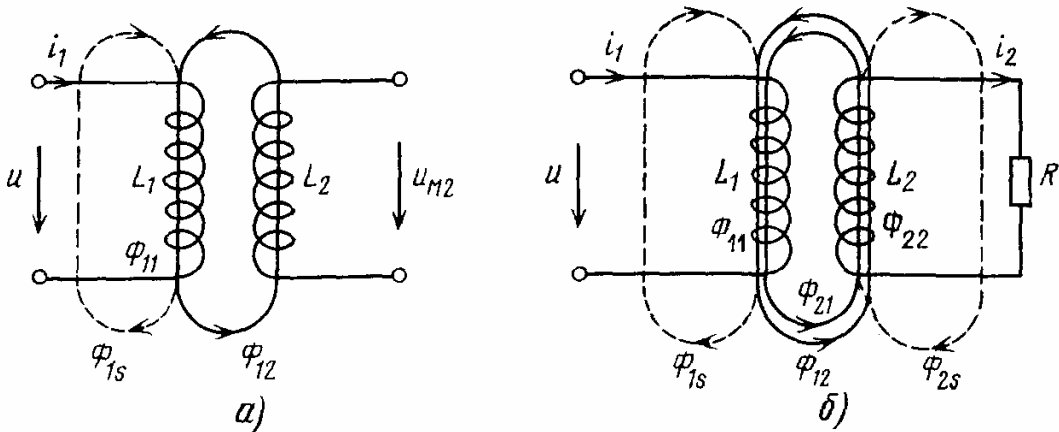
При протекании тока i_1 в катушке индуктивности с параметром L_1 в окружающем пространстве согласно закону электромагнитной индукции создается магнитный поток Φ_{11} (рис. , а). Если какая-либо часть этого потока Φ_{12} пронизывает витки другой катушки с L_2 , то в последней наводится ЭДС взаимной индукции, определяемая законом Максвелла—Фарадея:

$$e_{M_2} = -M_{12} \frac{di_1}{dt} \quad (1)$$

где коэффициент M_{12} носит название *взаимной индуктивности* катушек L_1 и L_2 .

Напряжение взаимоиндукции на зажимах катушки индуктивности L_2

$$U_{M_2} = -e_{M_2} = M_{12} \frac{di_1}{dt}$$



Если напряжение U приложено к катушке индуктивности L_2 , то под действием тока i_2 в катушке L_1 также будет наведена ЭДС взаимной индукции:

$$e_{M_1} = -M_{21} \frac{di_2}{dt}$$

В соответствии с принципом взаимности для линейных цепей $M_{12} = M_{21}$.

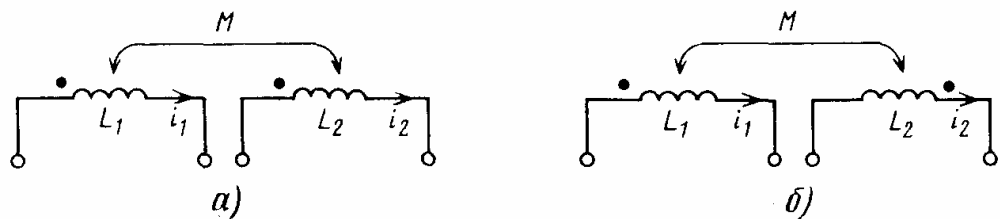
При замыкании катушки L_2 на конечное сопротивление R (рис. ,б) в последней под воздействием U_{M_2} потечет индукционный ток i_2 , который, в свою очередь, вызовет в первой катушке L_1 ЭДС взаимоиндукции e_{M_1} . Таким образом, установится двухсторонняя индуктивная связь катушек L_1 и L_2 . При этом каждая из катушек будет пронизываться двумя магнитными потоками: самоиндукции, вызванным собственным током, и взаимоиндукции, вызванным током другой катушки. Следовательно, в катушке L_1 индуцируется ЭДС

$$e_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt} - M_{21} \frac{di_2}{dt},$$

а в катушке L_2 ЭДС

$$e_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} - M_{12} \frac{di_1}{dt}$$

Взаимное направление потоков само- и взаимоиндукции зависит как от направления токов в катушках, так и от их взаимного расположения.



Если катушки включаются таким образом, что потоки само- и взаимоиндукции складываются, то такое включение называется *согласным* (рис 1.а). Если же потоки само- и взаимоиндукции вычитаются, то такое включение принято называть *встречным* (рис. ,б).

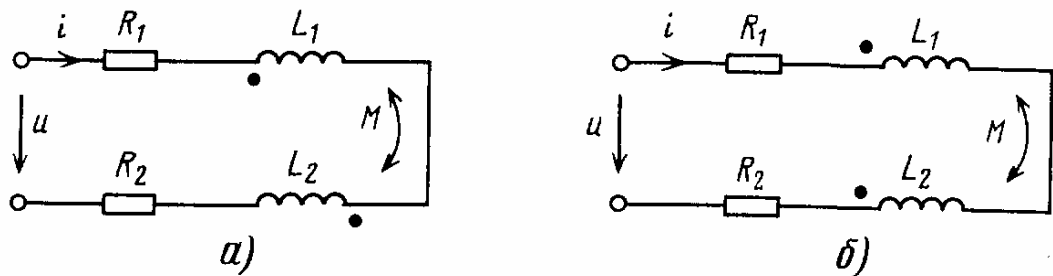
Степень связи между L_1 и L_2 . принято характеризовать *коэффициентом связи k* :

$$k = M / \sqrt{L_1 L_2},$$

где $M = M_{12} = M_{21}$.

Значение k изменяется в пределах от 0 (отсутствие связи) до 1 (сильная связь). Индуктивная связь существенным образом зависит от потоков рассеяния Φ_{1s} и Φ_{2s} - чем они больше, тем слабее связь.

Для компактности и удобства изображения схем электрических цепей с взаимной индуктивностью вводят понятие *одноименных зажимов*. Последними принято называть узлы, относительно которых одинаково ориентированные токи создают складывающиеся потоки само- и взаимоиндукции.



На рис. показано схематичное изображение одноименных зажимов для случая согласного (а) и встречного (б) включений катушек. Следовательно, для определения вида включения L_1 и L_2 на схеме достаточно определить, как ориентированы токи i_1 и i_2 относительно одноименных зажимов (на рис. 2 обозначены точкой): при одинаковой ориентации имеем согласное (рис. 2, а), а при разной - встречное включение (рис. 2, б).

Например, если в цепи протекает гармонически изменяющийся ток $i = I_m \sin \omega t$, то в первой катушке при согласном включении (рис. а) индуцируется ЭДС

$$e_1 = -L_1 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} = -(\omega L_1 + \omega M) I_m \cos \omega t$$

а во второй –

$$e_2 = -L_2 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} = -(\omega L_2 + \omega M) I_m \cos \omega t$$

т.е. ЭДС само- и взаимоиндукции складываются.

Для определения тока в цепи на рис. 2а запишем

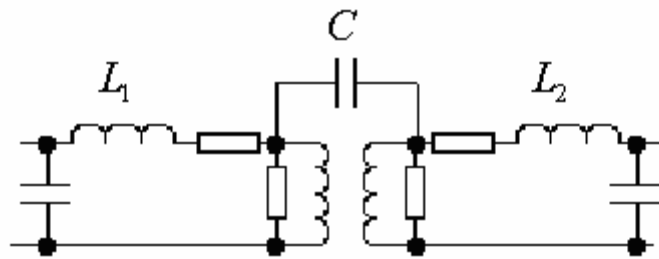
$$\dot{U} + \dot{E}_1 + \dot{E}_2 = \dot{U} + \dot{E}_{1L} + \dot{E}_{1M} + \dot{E}_{2L} + \dot{E}_{2M} = \dot{U} - j\omega(L_1 + L_2 + 2M)\dot{I} = (R_1 + R_2)\dot{I}$$

Откуда

$$I = \frac{U}{(R_1 + R_2) + j\omega(L_1 + L_2 + 2M)}$$

5. Трансформатор

Эквивалентная схема трансформатора имеет вид, приведенный на рис.



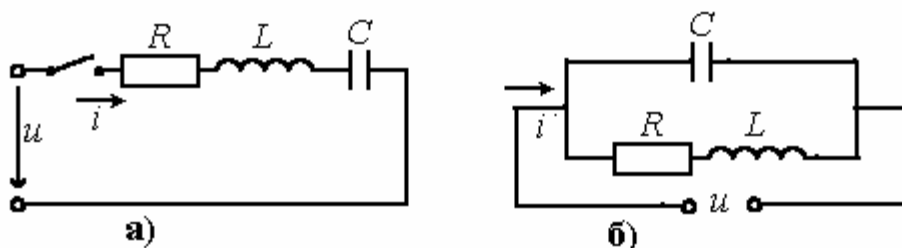
Эквивалентная схема трансформатора

Паразитными элементами трансформатора являются межвитковая емкость C , индуктивности утечки первичной и вторичной обмоток L_1 и L_2 , а также некоторые другие паразитные сопротивления и емкости, приведенные на рисунке. Межвитковая емкость нарушает изоляцию обмоток трансформатора и через нее может проходить помеха. Индуктивность утечки и паразитная емкость создают резонансный контур. В этом контуре возникают осцилляции, когда пульсирующий ток проходит через трансформатор. Поскольку паразитные емкости и индуктивности малы, то осцилляции имеют высокую частоту.

6. Резонансы в электрических цепях

Часто ЭМП возникают на частотах, близких к резонансным частотам схем, кабелей или корпусов. В этих случаях возникают очень большие токи (а значит магнитное поле) или напряжения (электрическое поле). Большие поля, создаваемые при резонансе в сочетании с плохим экранированием или другими способами защиты могут привести к серьезным проблемам с ЭМС. Мы уже видели, что в некоторых случаях и дискретные элементы цепей могут являться резонансными контурами. Напомним в этой связи основные свойства резонансных контуров.

Простейшей колебательной системой устройств радиоэлектроники является колебательный LCR -контур. Различают *последовательный и параллельный колебательные контуры*. (рис.) .. В подавляющем числе случаев специальный резистор в контур не включается, но активные потери энергии в контуре всегда имеют место, так как реальные катушки индуктивности и конденсаторы кроме реактивного сопротивления обладают еще и активным.



Последовательный а) и параллельный б) колебательные контуры

6.1 Последовательный колебательный контур

Контур называют последовательным, если его элементы R , L и C включены последовательно генератору (рис., а).

Под действием эдс U генератора в контуре возникают вынужденные колебания. Напряжения на элементах контура связаны с эдс генератора и током через элементы контура соотношением:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ,$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ полное сопротивление последовательного колебательного контура.

Как только частота эдс генератора совпадет с собственной частотой контура, его полное сопротивление Z станет минимальным, чисто активным и равным полному сопротивлению R потерь. При этом ток в контуре

$I_p = \frac{U}{R}$ будет максимальным, а напряжения на реактивных элементах - в Q раз больше эдс генератора

$$U_{Lp} = I_p \omega L = \frac{U}{R} \rho = QU, \quad U_{Cp} = I_p / \omega C = QU$$

Q - добротность контура, которая показывает, во сколько раз на частоте f_0 напряжения на его реактивных элементах больше, чем на активном:

Затухание колебаний оценивается

$$Q = \frac{U_L}{U_R} = \frac{\rho I}{RI} = \frac{\rho}{R},$$

где I — ток в контуре. Добротность – безразмерная величина.

У реальных контуров характер изменения колебаний (тока через индуктивность или напряжения на емкости) будет определяться законом

$$i(t) = I e^{-\frac{t\pi}{QT}} \sin \omega_0 t$$

Можно получить другую формулу для добротности

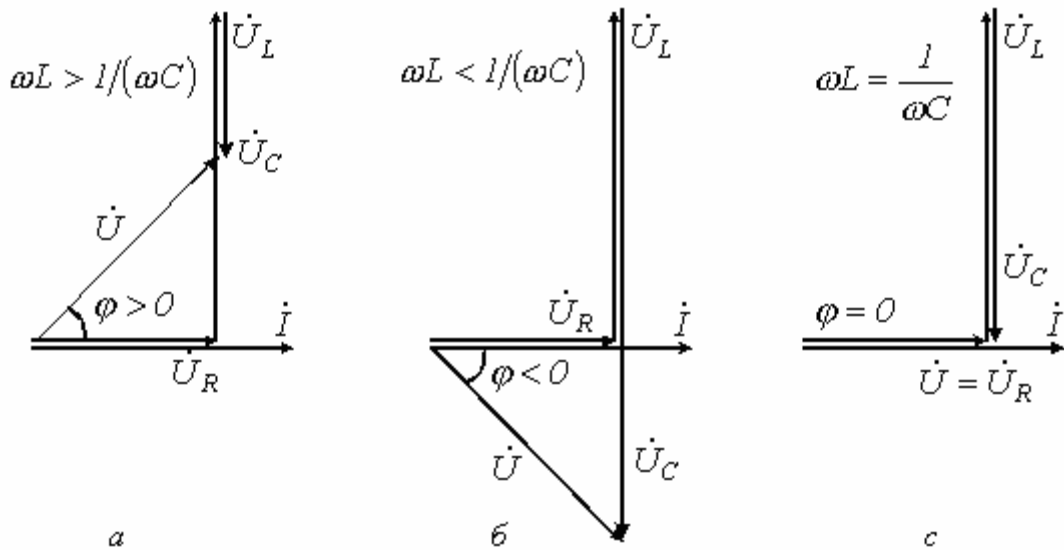
$$Q = \frac{2\pi}{T} \frac{W_L}{P}$$

где W_L - реактивная энергия колебательного процесса, а P мощность потерь активной энергии за один период T .

Величину, обратную добротности, называют *затуханием*:

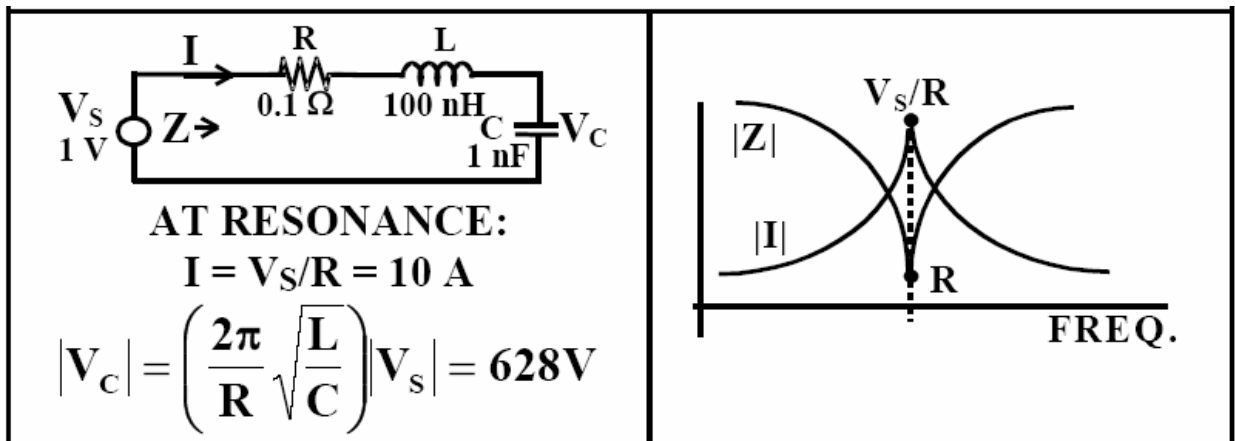
$$\delta = 1/Q$$

Рассмотренное только что явление называют *резонансом напряжений*, а частоту, на которой его наблюдают, - *частотой резонанса* f_p .



Векторная диаграмма последовательного RLC контура

При резонансе напряжений или режимах, близких к нему, ток в цепи резко возрастает. В теоретическом случае при $R=0$ его величина стремится к бесконечности. Соответственно возрастанию тока увеличиваются напряжения на индуктивном и емкостном элементах, которые могут во много раз превысить величину напряжения источника питания. На рис. приведен пример резонанса в последовательном контуре.



При расстройке частоты генератора f относительно резонансной частоты f_p , сопротивление контура увеличивается, а ток уменьшается.

Полосу частот, в пределах которой колебательный процесс в контуре поддерживается на определенном уровне, называют *полосой пропускания*. Принято считать, что на границах полосы пропускания ток I контура уменьшается в $\sqrt{2}$ раз, а сопротивление Z_0 соответственно увеличивается относительно значения на частоте резонанса. При этих условиях полоса пропускания

$$\Pi = 2 \Delta f = f_p / Q$$

Последовательные колебательные контуры используют в качестве частотно избирательных цепей, пропускающих только токи, частоты которых находятся в пределах полосы пропускания.

6.2 Параллельный колебательный контур

Колебательный контур называют параллельным, если его элементы L и C включены параллельно генератору (рис. б). Активная составляющая сопротивления контура обычно сосредоточена в его индуктивной ветви, так как именно катушка вносит большую часть потерь.

Проводимость контура равна

$$\underline{Y} = j\omega C + \frac{1}{R + j\omega L} = j\omega C + \frac{R - j\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} = \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} + j\left(\omega C - \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2}\right)$$

Поскольку в режиме резонанса мнимая часть $\underline{Y}$ должна быть равна нулю, то условие резонанса имеет вид

$$C = \frac{L}{R^2 + \omega_p^2 L^2},$$

откуда, в частности, находится резонансная частота.

На резонансной частоте f_p сопротивление контура становится максимальным и чисто активным. Это сопротивление называют также *эквивалентным* и рассчитывают по формуле

$$R_{\text{экв}} = \rho^2 / R = Q\rho$$

На резонансной частоте f_p между током генератора и его эдс фазового сдвига нет. Соотношения между током генератора I_0 и токами I_L в индуктивной ветви контура и I_C в емкостной на частоте f_p рассчитывают по формулам

$$I_0 = E / R_{\text{экв}}; \quad I_L = E / X_{Lp} = E / \rho; \quad I_C = E / X_{Cp} = E / \rho$$

используя которые, получают

$$I_L / I_0 = R_{\text{экв}} / \rho = Q, \quad I_C / I_0 = Q$$

Отсюда следует, что при совпадении частоты генератора с собственной частотой контура происходит *резонанс токов*, т. е. ток в контуре достигает максимального значения, а ток генератора становится минимальным.

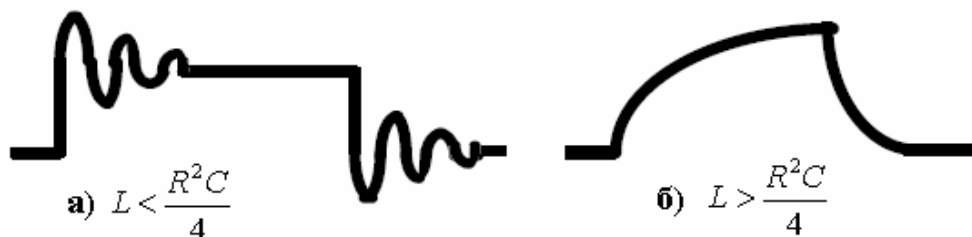
6.3 Условия осцилляций и плавного изменения импульсного сигнала

С учетом этого многие импульсные схемы цепей с сосредоточенными параметрами могут быть представлены в виде (рис.).



Эквивалентная схема импульсного источника, короткой линии передачи и нагрузки при высоких частотах

При рассматриваемом включении на нагрузке возможны два вида сигналов (рис.). Источник импульсного сигнала имеет последовательное сопротивление, линия передачи включает индуктивность и емкость, а типичная нагрузка в виде логического элемента имеет параллельно включенные сопротивление и емкость. На высоких частотах можно предположить, что суммарное емкостное сопротивление кабеля и нагрузки ($1/\omega C$) много меньше, чем сопротивление нагрузки (R_L). Тогда сопротивлением нагрузки R_L можно пренебречь и получается цепь последовательно включенных сопротивления, индуктивности и емкости.



Осциллограммы напряжения на нагрузке последовательного RLC контура

Условием существования затухающих колебаний в данной цепи будет неравенство

$$L < \frac{R^2 C}{4}$$

Напротив, условием плавного нарастания напряжения на нагрузке будет неравенство

$$L > \frac{R^2 C}{4}$$

Часто для того, чтобы вызвать “дребезг” необходима совсем маленькая индуктивность. Наличие “дребезга” показывает, что в линии передачи есть индуктивность. Эта излишняя индуктивность может быть вызвана большой площадью контура тока. И наоборот, плавное нарастание напряжения показывает, что в последовательном RLC контуре заметное значение имеет емкость

КАТЕГОРИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Выбор конструкции печатной платы является важным фактором, определяющим как механические характеристики электронного устройства, так и его ЭМС. Для изготовления печатных плат используются материалы различного уровня качества. Основные параметры материала печатной платы, которые необходимо знать разработчику – это удельное сопротивление и диэлектрическая постоянная. Но часто необходимо знание и других параметров, таких как воспламеняемость, высокотемпературная стабильность и коэффициент гигроскопичности. Эти параметры может знать производитель компонентов, используемых при производстве печатных плат.

Слоистые материалы обозначаются индексами FR (*flame resistant, сопротивляемость к воспламенению*) и G. Материал с индексом FR-1 обладает наибольшей горючестью, а FR-5 - наименьшей. Материалы с индексами G10 и G11 обладают особыми характеристиками. Материалы печатных плат приведены в табл. 1.

Печатные платы категории FR-1 более похожи на картон. И есть много примеров использования печатных плат FR-1, на которых имеются повреждения от теплового воздействия мощных компонентов. Печатную плату этой категории лучше не использовать.

FR-4 часто используется при изготовлении промышленного оборудования, в то время, как FR-2 используется в производстве бытовой техники. Эти две категории стандартизованы в промышленности, и печатные платы FR-2 и FR-4 часто подходят для большинства приложений. Но иногда неидеальность характеристик этих категорий заставляет использовать другие материалы. Например, для очень высокочастотных приложений в качестве материала печатных плат используются фторопласт и даже керамика.

При выборе материала печатной платы следует обращать особое внимание на его гигроскопичность, поскольку этот параметр может оказать сильный негативный эффект на такие важные характеристики платы как поверхностное сопротивление, утечки, высоковольтные изоляционные свойства (пробои и искрения) и механическую прочность. Также следует обращать внимание на рабочую температуру. Участки с высокой температурой могут встречаться в неожиданных местах, например, рядом с большими цифровыми интегральными схемами, переключения которых происходят на высокой частоте.

После того, как материал печатной платы выбран, необходимо определить толщину фольги печатной платы. Этот параметр в первую очередь выбирается исходя из максимальной величины протекающего тока. По возможности, лучше избегать применения очень тонкой фольги.

Категория	Компоненты, комментарии
FR-1	бумага, фенольная композиция: прессование и штамповка при комнатной температуре, высокий коэффициент гигроскопичности
FR-2	бумага, фенольная композиция: применимый для односторонних печатных плат бытовой техники, невысокий коэффициент гигроскопичности
FR-3	бумага, эпоксидная композиция: разработки с хорошими механическими и электрическими характеристиками
FR-4	стеклоткань, эпоксидная композиция: прекрасные механические и электрические свойства
FR-5	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокая прочность при повышенных температурах, отсутствие воспламенения
G10	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокие изоляционные свойства, наиболее высокая прочность стеклоткани, низкий коэффициент гигроскопичности
G11	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокая прочность на изгиб при повышенных температурах, высокая сопротивляемость растворителям

КОЛИЧЕСТВО СЛОЕВ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Количество слоев печатной платы определяется общей сложностью схемы и качественными требованиями разработчика.

Однослойные печатные платы

Очень простые электронные схемы выполняются на односторонних платах с использованием дешевых фольгированных материалов (FR-1 или FR-2) и часто имеют много перемычек, напоминая двухсторонние платы. Такой способ создания печатных плат рекомендуется только для низкочастотных схем. Ниже мы увидим, что **односторонние печатные платы в большой степени восприимчивы к наводкам**. Хорошую одностороннюю печатную плату достаточно сложно разработать по многим причинам.

В односторонних печатных платах для трассировки пересекающихся цепей используются перемычки, выполняемые из проволоки (обычно из медной, лужено одножильной). Они представляют собой элементы конструкции, поэтому показываются на чертежах, записываются в спецификации.

Односторонние печатные платы обеспечивают самую большую точность выполнения проводящего рисунка и совмещения его с отверстиями и при этом являются наиболее дешевым классом печатных плат. Надежность печатной платы и механическая прочность крепления элементов также не вы-

сока. Во избежание отслоения печатных проводников все элементы следует монтировать без зазоров между корпусом элемента и печатной платой. Для повышения прочности крепления элементов возможно изготовления односторонних печатных плат с металлизацией отверстий, но стоимость печатных плат будет сопоставима с двухсторонними. Установка элементов на поверхность практикуется обычно в любительских или макетных конструкциях. Весь электрический монтаж осуществляется на одном слое. Односторонние печатные платы, благодаря их дешевизне, используются преимущественно в бытовой аппаратуре

Двухслойные печатные платы

На следующем уровне стоят двухсторонние печатные платы, которые в большинстве случаев используют в качестве материала подложки FR-4, хотя иногда встречается и FR-2. Применение FR-4 предпочтительнее, поскольку в печатных платах из этого материала отверстия получаются лучшего качества. Схемы на двухсторонних печатных платах разводятся гораздо легче, т.к. в двух слоях проще осуществить разводку пересекающихся трасс. Однако для аналоговых схем пересечение трасс выполнять не рекомендуется. Где возможно, нижний слой (*bottom*) необходимо отводить под полигон земли, а остальные сигналы разводить в верхнем слое (*top*). Использование полигона в качестве земляной шины дает несколько преимуществ:

- общий провод является наиболее часто подключаемым в схеме проводом; поэтому резонно иметь "много" общего провода для упрощения разводки.

- увеличивается механическая прочность платы.

- уменьшается сопротивление всех подключений к общему проводу, что, в свою очередь, уменьшает шум и наводки.

- увеличивается распределенная емкость для каждой цепи схемы, помогая подавлять излучаемый шум.

- полигон, являющийся экраном, подавляет наводки, излучаемые источниками, располагающимися со стороны полигона.

Двухсторонние печатные платы, несмотря на все свои преимущества, не являются лучшими, особенно для малосигнальных или высокоскоростных схем. В общем случае, толщина печатной платы, т.е. расстояние между слоями металлизации, равняется 1,5 мм, что слишком много для полной реализации некоторых преимуществ двухслойной печатной платы, приведенных выше. Распределенная емкость, например, слишком мала из-за такого большого интервала.

Известны две разновидности двухсторонних ПП (ДПП): без металлизации и с металлизацией сквозных отверстий. Платы без металлизации по многим параметрам соответствуют односторонним платам. Но из-за наличия еще одного слоя повышается трассировочная способность ПП и в определенной степени плотность компоновки элементов. Серьезная проблема таких плат - обеспечение электрических переходов между слоями, для чего применяются заклепки, проволочные перемычки или пайка выводов элементов с двух сто-

рон ПП. Все это резко усложняет монтаж и в целом повышает стоимость устройства. Платы такой разновидности обычно используются в любительских и макетных устройствах.

Платы с металлизацией переходных отверстий имеют высокую трассировочную способность, обеспечивают высокую плотность монтажа элементов и хорошую механическую прочность их крепления. Эти ПП допускают монтаж элементов на поверхности и являются наиболее распространенными в производстве радиоэлектронных устройств.

Многослойные печатные платы

Для ответственных схемотехнических разработок требуются многослойные печатные платы (МПП). Некоторые причины их применения очевидны:

такая же удобная, как и для шины общего провода, разводка шин питания; если в качестве шин питания используются полигоны на отдельном слое, то довольно просто с помощью переходных отверстий осуществить подводку питания к каждому элементу схемы;

сигнальные слои освобождаются от шин питания, что облегчает разводку сигнальных проводников;

между полигонами земли и питания появляется распределенная емкость, которая уменьшает высокочастотный шум.

Кроме этих причин применения многослойных печатных плат существуют другие, менее очевидные. Прежде всего – это лучшее подавление электромагнитных (*EMI*) и радиочастотных (*RFI*) помех благодаря эффекту отражения (*image plane effect*). *Когда проводник размещается близко к плоской проводящей поверхности, большая часть возвратных высокочастотных токов будет протекать по плоскости непосредственно под проводником. Направление этих токов будет противоположно направлению токов в проводнике. Таким образом, отражение проводника в плоскости создает линию передачи сигнала* (дать рисунок). Поскольку токи в проводнике и в плоскости равны по величине и противоположны по направлению, создается некоторое уменьшение излучаемых помех. Эффект отражения эффективно работает только при неразрывных сплошных полигонах (ими могут быть как полигоны земли, так и полигоны питания). Применение МПП может снизить уровень излучаемых помех на 20 дБ по сравнению с двухслойными платами. Но любое нарушение целостности будет приводить к уменьшению подавления помех.

Многослойные ПП отличаются очень высокой трассировочной способностью и плотностью монтажа элементов. Они почти не имеют ограничений по устанавливаемым элементам (микросхемы любой степени интеграции, поверхностно монтируемые элементы и т.д.). Имеется много вариантов изготовления МПП – 4-х, 6-и, 8 –и и более многослойные. Данные платы теоретически обладают неограниченной трассировочной способностью и позволяют монтировать любые элементы с одной или двух сторон. А посредством

чередования экранных и функциональных слоев внутри платы удастся получить проводники (цепи) с определенными электрическими параметрами, например с нормированным волновым сопротивлением.

Стоимость МПП очень высока и зависит от количества слоев. Такие платы применяются в быстродействующих устройствах с микросхемами высокой степени интеграции. На практике это микросхемы в корпусах с 64 и более выводами.

Порядок следования слоев

Часто серьезной проблемой является оптимальный порядок следования слоев печатной платы. Возьмем для примера, какой порядок следования слоев лучший в 4-слойной плате, содержащей два сигнальных слоя и два полигонных слоя - слой земли и слой питания? Сигнальные слои между полигонами, которые будут служить экранами? Или же сделать полигонные слои внутренними, чтобы уменьшить взаимовлияние сигнальных слоев?

При решении этого вопроса важно помнить, что часто расположение слоев не имеет особого значения, поскольку все равно компоненты располагаются на внешних слоях, а шины, подводящие сигналы к их выводам, порой проходят через все слои. Поэтому любые экранные эффекты представляют собой лишь компромисс. В данном случае лучше позаботиться о *создании большой распределенной емкости между полигонами питания и земли*, расположив их во внутренних слоях. Другим преимуществом расположения сигнальных слоев снаружи является доступность сигналов для тестирования, а также возможность модификации связей. *Для печатных плат с более, чем четырьмя слоями, существует общее правило располагать высокоскоростные сигнальные проводники между полигонами земли и питания, а низкочастотным отводить внешние слои.*