

Тема 3. Объемные резонаторы

Лекция 16. Резонаторы неволноводного типа.

1. ТОРОИДАЛЬНЫЙ (КЛИСТРОННЫЙ) РЕЗОНАТОР

В качестве маломощных вспомогательных генераторов СВЧ - гетеродинов в радиолокационных станциях используются электровакуумные приборы, называемые клистроны. Их колебательная система представляет собой тороидальный резонатор неволноводного типа. Его можно синтезировать путем проведения логического эксперимента (рис. 1), когда колебательный контур трансформируется при переходе к СВЧ в сложную тороидальную конструкцию.

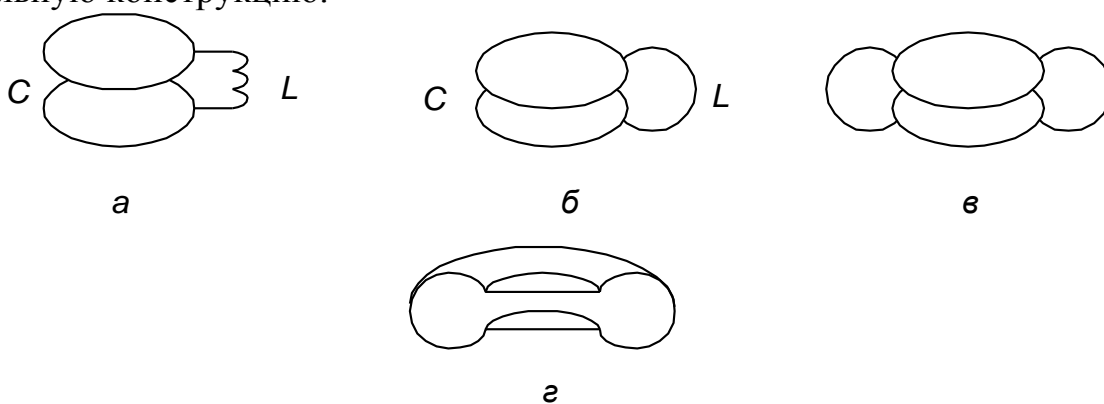


Рис. 1.

Форма сечения тороидальных резонаторов бывает различной. Наиболее широко применяются конструкции с прямоугольным сечением "тороидальной" части (рис. 2), которая выполняет функцию индуктивности, образуя один виток с развитой поверхностью. Емкость образована узким зазором между круглой пластинкой в центре и "донной" поверхностью.

Частоту собственных колебаний такого резонатора можно вычислить по формуле Томпсона

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (1)$$

Емкость найдем с помощью выражения для плоского конденсатора (краевым эффектом пренебрегаем)

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \pi r_0^2}{d}. \quad (2)$$

Для расчета индуктивности тороидальной части необходимо вначале определить магнитный поток в ней. С этой целью рассмотрим магнитную силовую линию с радиусом r , пронизывающую элементарную площадку шириной dr . Учитывая, что напряженность поля в любой точке силовой линии постоянна (т.к. конструкция симметрична), по закону полного тока запишем:

$$I = \oint H dl = 2H\pi r.$$

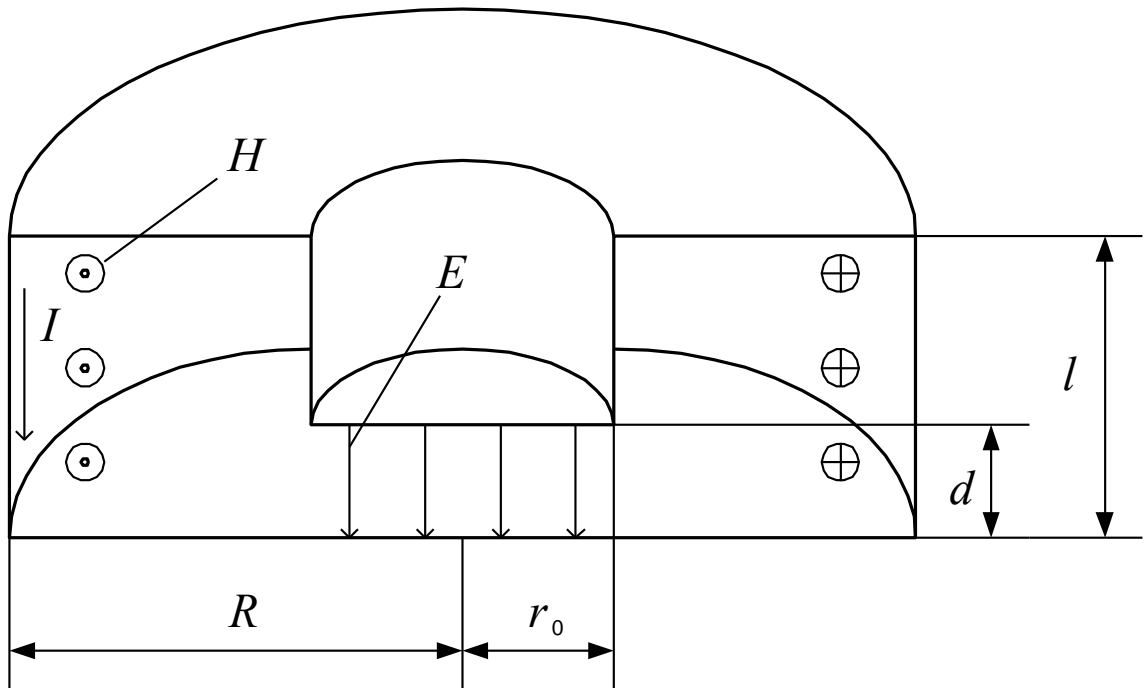


Рис. 2.

Магнитный поток, протекающий через элемент сечения тороида dr , вычисляется с помощью выражения:

$$d\Phi = \mu\mu_0 H ds = \mu\mu_0 \frac{Il}{2\pi r} dr.$$

Полный магнитный поток через тороидальную часть вычисляется путем интегрирования по всему поперечному сечению.

$$\Phi = \int_{r_0}^R \mu\mu_0 \frac{Il}{2\pi r} dr = \frac{\mu\mu_0 Il}{2\pi} \ln \frac{R}{r_0}.$$

Индуктивность тороидального витка находится по формуле

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{R}{r_0}. \quad (3)$$

Определим теперь резонансную частоту ω_0 , подставляя формулы (2) и (3) в выражение (1)

Для случая вакуумного заполнения $\varepsilon = \mu = 1$, а $\varepsilon_0 \mu_0 = 1/C^2$. С учетом этого получим окончательное выражение

$$\omega_0 = \frac{C}{r_0} \sqrt{\frac{2d}{l \ln \frac{R}{r_0}}}. \quad (4)$$

Таким образом, резонансная частота определяется только размерами резонатора.

Из анализа формулы (4) следует, что с уменьшением радиуса тороида R увеличивается ω_0 . Поэтому изменяя R путем ввертывания винтов в тороидальную часть (рис. 3), можно перестраивать резонатор, реализуя индуктивный способ.

Изменяя ширину зазора d с помощью мембраны (рис. 4), также можно изменять ω_0 емкостным способом.

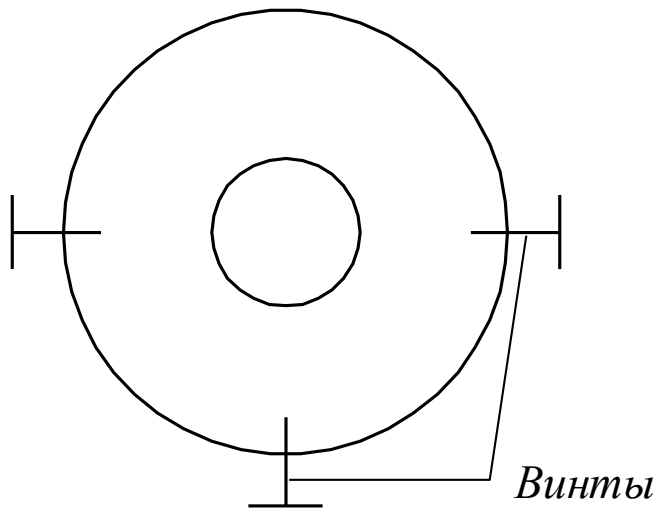


Рис. 3.

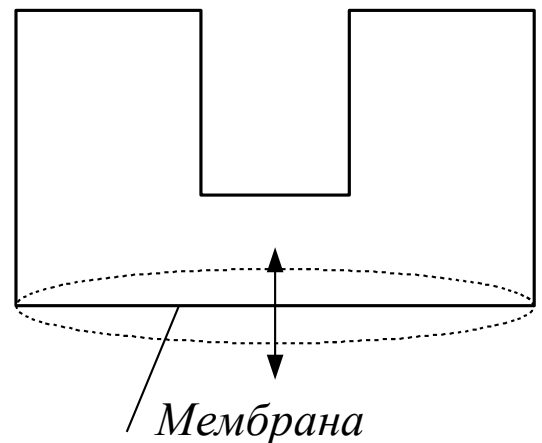


Рис. 4.

Диапазон перестройки клистронного резонатора составляет

$$\Delta f = (10-20\%)f_{cp}.$$

т.е. этот прибор относится к классу широкополосных.

Обычно стенки в зазоре d выполняются в виде сеток. Через них движется электронный поток от источника свободных носителей зарядов (катода) к приемнику (аноду). Поскольку в резонаторе возникают собственные колебания, то электроны, пролетая между сетками, попадают то в ускоряющее электрическое поле, то в замедляющее. Плотность электронного потока при этом изменяется с частотой собственных колебаний резонатора, и к аноду электронный поток приходит промодулированным по плотности сверхвысокой частотой (рис. 5).

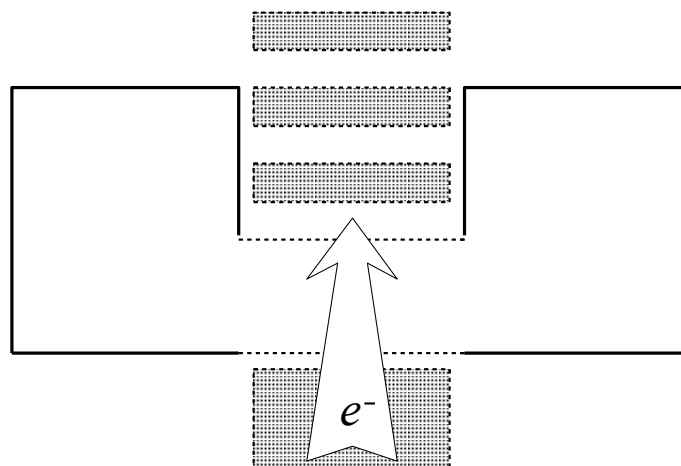


Рис. 5.

В практике построения клистронов встречаются и другие варианты взаимодействия электрического поля резонатора с электронным потоком. Например, если в клистроне используются два резонатора, стоящие один за другим, то один из них модулирует электронный поток по плотности, а пролетая через другой, этот поток отдает свою энергию полю резонатора. Такой прибор используется в качестве усилителя СВЧ-колебаний.

Вывод. В качестве маломощных вспомогательных генераторов СВЧ - гетеродинов в радиолокационных станциях используются электровакуумные приборы, называемые клистрономы. Их колебательная система представляет собой тороидальный резонатор неволноводного типа. Диапазон перестройки клистроны достигает до 20 %.

2. РЕЗОНАТОР МАГНЕТРОННОГО ТИПА

В радиолокационной аппаратуре в качестве мощных генераторов СВЧ-колебаний используются электровакуумные приборы - магнетроны. Особенность их колебательной системы заключается в том, что она состоит из множества резонаторов (рис. 6, а), которые представляют собой сочетание щели и цилиндрического отверстия (рис. 6, б). Такую конструкцию называют еще анодным блоком.

Щель выполняет функцию емкости, так как в ней сосредоточено электрическое поле. Индуктивность образуется отверстием цилиндрической формы. Для определения частоты собственных колебаний резонатора воспользуемся формулой Томпсона (1), для чего потребуется найти величины C и L .

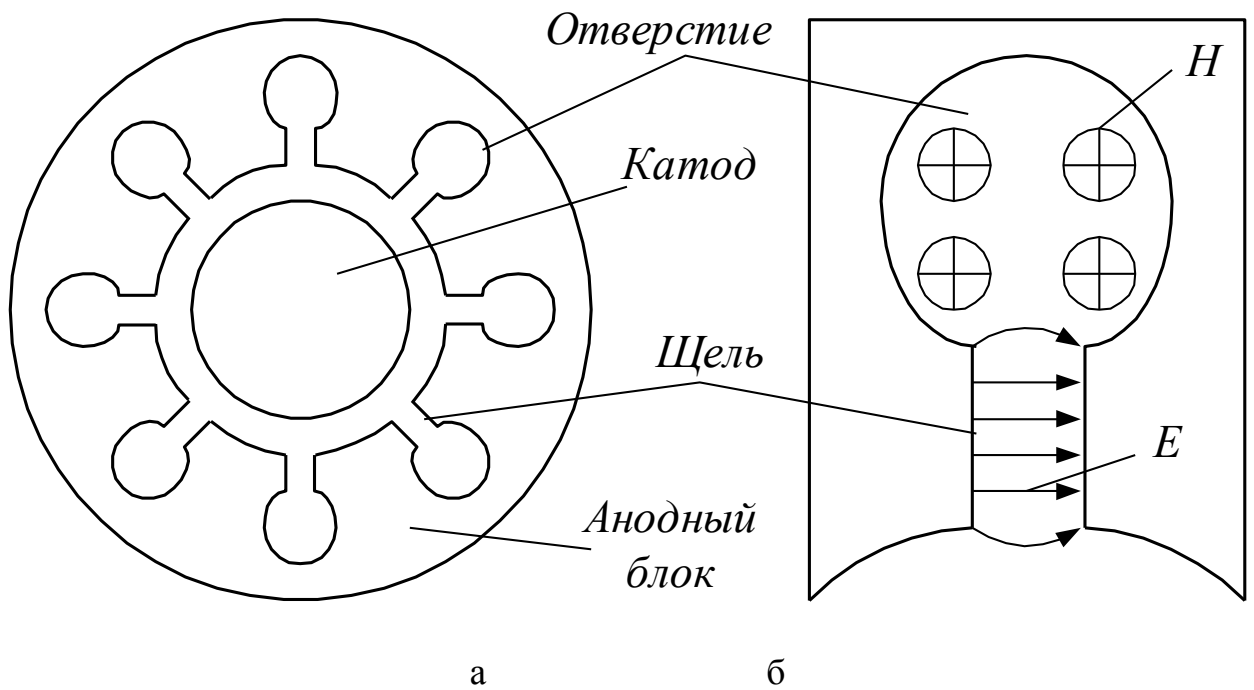


Рис. 6.

Электрическое поле в основном сосредоточено в щели резонатора (рис. 7), емкость которой вычисляется по формуле плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 l h}{d}. \quad (5)$$

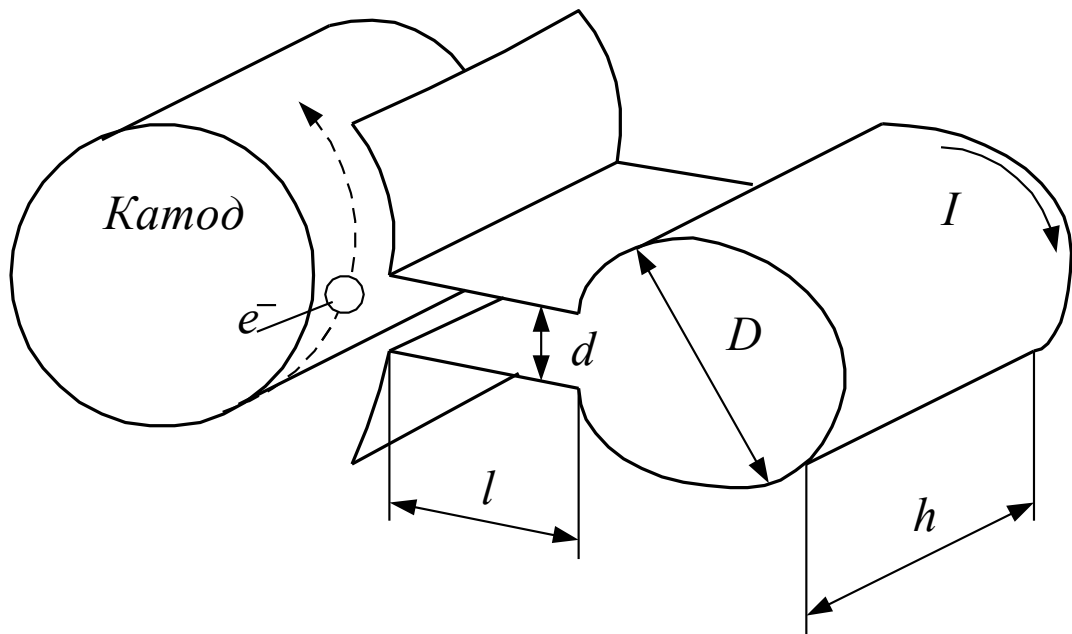


Рис. 7.

Однако, кроме щели, емкость образуют и стенки цилиндрического отверстия, и торцевые поверхности, разделенные щелью. Эта дополнительная емкость оценивается по формуле

$$C_{\text{тор}} + C_{\text{ц}} \approx 2\varepsilon_0 \frac{h}{\pi} \ln \frac{D}{d}. \quad (6)$$

Используя закон полного тока, найдем напряженность магнитного поля в цилиндре. При этом следует учесть, что магнитный поток замыкается через отверстия соседних резонаторов. Это можно проиллюстрировать на развернутом разрезе анодного блока (рис. 8). Рассматривая одну силовую линию магнитного поля, которая имеет длину около $(2h+D)$, необходимо учитывать, что причиной ее возникновения являются два тока в соседних резонаторах - $2I$.

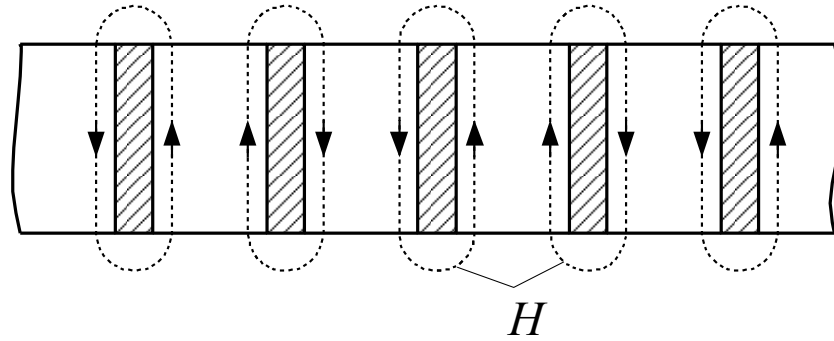


Рис. 8.

С учетом сделанных замечаний найдем напряженность магнитного поля в цилиндре

$$H(2h+D)=2I,$$

$$H=\frac{2I}{2h+D}.$$

Считая, что магнитный поток в цилиндрическом отверстии однороден, определим индуктивность $L_{\text{ц}}$:

$$L_{\text{ц}} = \frac{\Phi_{\text{ц}}}{I} = \frac{\mu_0 H S_{\text{ц}}}{I} = \frac{\mu_0 \pi D^2}{2(2h+D)}. \quad (7)$$

Силовые линии магнитного поля замыкаются не только через отверстия, но и через щели соседних резонаторов. Поэтому последние также обладают индуктивностью, которая убывает по линейному закону по мере перемещения от цилиндра к внутренней поверхности блока резонаторов. Среднее значение индуктивности щели вычисляется с помощью выражения

$$L_{\text{щ}} = \frac{\Phi_{\text{щ}}}{I} = \frac{\mu_0 2ld}{2(2h+D)} = \frac{\mu_0 ld}{2h+D}. \quad (8)$$

Теперь с помощью формулы Томпсона находим частоту собственных колебаний

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(L_{\text{ц}} + L_{\text{щ}})(C_{\text{щ}} + C_{\text{тор}} + C_{\text{ц}})}}. \quad (9)$$

Резонатор магнетронного типа находит широкое применение при построении мощных электровакуумных приборов СВЧ: магнетронов, амплитронов, ламп бегущей волны (ЛБВ) типа "М", ламп обратной волны (ЛОВ) типа "М" и т.д.

В перечисленных выше приборах электронный поток движется от катода к анодному блоку по траекториям, напоминающим спирали. При этом электроны, пролетая мимо щелей резонаторов, взаимодействуют с их электрическим полем. В один из полупериодов СВЧ-колебаний электроны ускоряются полем и отбирают у него энергию, а в другой полупериод - тормозятся и отдают свою энергию. За счет такого обмена в резонаторе поддерживаются незатухающие СВЧ-колебания. Более подробно работа магнетрона изучается в учебной дисциплине "Устройства формирования сигналов".

Перестройка магнетронного резонатора может осуществляться либо путем изменения индуктивности, либо емкости.

При индуктивной перестройке в цилиндрические отверстия резонатора вводятся металлические штыри, в зависимости от глубины погружения которых изменяется индуктивность. При емкостной перестройке изменяется емкость C_{top} за счет приближения к торцевой поверхности анодного блока металлического кольца.

Указанные виды перестройки обеспечивают изменение частоты СВЧ-колебаний в полосе $\Delta f = (5-10\%)f_{cp}$.

При комбинированном способе перестройки, когда одновременно изменяются и индуктивность и емкость резонатора, полоса частот перестройки достигает $\Delta f = 40\% f_{cp}$.

Вывод. В радиолокационной аппаратуре в качестве мощных генераторов СВЧ колебаний используются электровакуумные приборы - магнетроны. Особенность их колебательной системы заключается в том, что она состоит из множества резонаторов, которые представляют собой сочетание щели и цилиндрического отверстия. Существует возможность перестройки полосы частот магнетрона до 40%.