

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ

Михлин Е.Ю.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент А.Ф.Копылов

Сибирский федеральный университет

Последовательный колебательный контур (далее по тексту – просто контур) является одним из основных элементов, используемых в радиотехнике в различных диапазонах длин волн для построения фильтров и иных частотоселективных структур. Основные частотные характеристики контуров, а также аналитические выражения, описывающие эти характеристики, широко известны и описаны в учебной литературе для случаев высокой добротности контуров (десятки и сотни единиц и более). Эти широко известные характеристики и выражения справедливы до тех пор, пока контур используется для частотной селекции и добротность его велика.

В то же время, в радиотехнике, в частности, в технике сверхвысоких частот (СВЧ), в ряде случаев возникают специфические задачи, при решении которых используют колебательные контуры не для целей частотной селекции, а для разрешения иных проблем. В частности, речь идет о таком использовании колебательных контуров, как коррекция амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) различных СВЧ устройств – таких, например, как усилители мощности СВЧ. В этом случае колебательный контур используется как корректор АЧХ и решает задачу внесения предыскажений на входе усилителя мощности для получения общей равномерной АЧХ в широком диапазоне частот. Это положение иллюстрируется рис. 1.

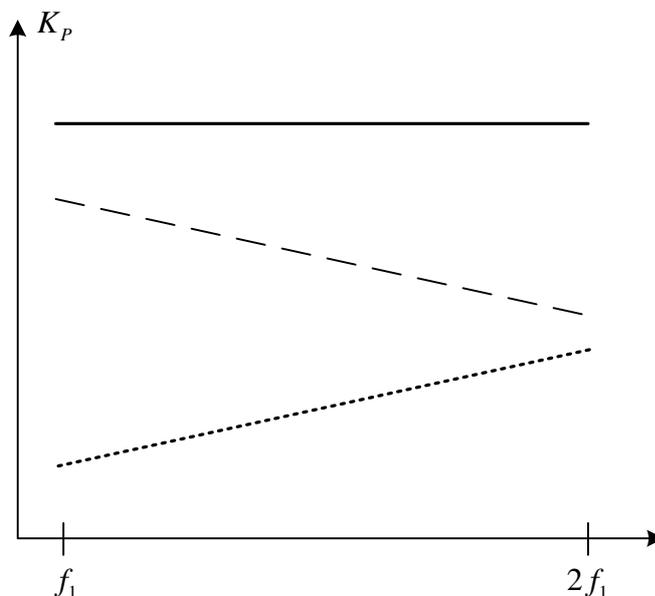


Рис. 1. Типовая АЧХ усилителя мощности СВЧ в октавной полосе частот без корректора (пунктирная кривая), АЧХ корректора (штриховая кривая), АЧХ системы корректор-усилитель (сплошная кривая)

На рис. 1 схематически показаны: пунктирной кривой – типовая АЧХ усилителя мощности СВЧ в октавной полосе частот, штриховой кривой – АЧХ контура-корректора, в качестве которого используется часть общей АЧХ контура ниже резонансной частоты, сплошной кривой – общая откорректированная АЧХ системы корректор-усилитель.

Как видно из решаемой задачи, угол наклона АЧХ контура-корректора должен быть невелик (от единиц до десятков дБ на октаву), что предполагает невысокую добротность используемого контура (от единиц до десятков). Однако, при такой низкой добротности контура-корректора широко известные выражения для его частотных характеристик, полученные в предположении высокой добротности контура, становятся весьма неточными.

В связи с тем, что наиболее часто выходное напряжение снимают с ёмкости последовательного колебательного контура (см.рис. 2), мы рассмотрим выражения для модуля коэффициента передачи по напряжению K_{U_c} при снятии выходного напряжения именно с ёмкости.

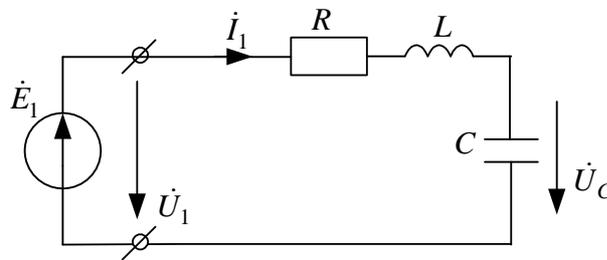


Рис. 2. Схема включения последовательного колебательного контура при снятии выходного напряжения с ёмкости контура

Выражение для величины АЧХ K_{U_c} можно получить из выражения для его комплексной частотной характеристики (КЧХ) \dot{K}_{U_c} :

$$\dot{K}_{U_c} = \frac{\dot{U}_c}{\dot{U}_1} = - \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{\omega C \left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]} - j \frac{R}{\omega C \left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]}, \quad (1)$$

$$K_{U_c} = \left| \dot{K}_{U_c} \right| = \frac{1}{\sqrt{(\omega CR)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}}. \quad (2)$$

Графически АЧХ величины K_{U_c} показана на рис. 3. На этом рисунке обозначены: Q – добротность контура; ω – круговая частота; ω_0 – резонансная частота контура; $2\Delta\omega_{K_{U_c}}$ – общая полоса пропускания контура; $\Delta\omega_{1K_{U_c}}$ – первая составляющая общей полосы пропускания контура $2\Delta\omega_{K_{U_c}}$ (она же – нижняя абсолютная расстройка контура); $\Delta\omega_{2K_{U_c}}$ – вторая составляющая общей полосы пропускания контура $2\Delta\omega_{K_{U_c}}$

(она же – верхняя абсолютная расстройка контура); $\omega_{B_{K_{UC}}}$ и $\omega_{H_{K_{UC}}}$ – верхняя и нижняя граничные частоты полосы пропускания контура, где коэффициент передачи K_{UC} уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным значением, равным Q ; $\frac{2Q^2}{\sqrt{4Q^2 - 1}}$ – максимальное значение коэффициента передачи K_{UC} ; $\omega_0 \sqrt{\frac{2-d^2}{2}}$ – частота, на которой достигается максимальное значение коэффициента передачи K_{UC} .

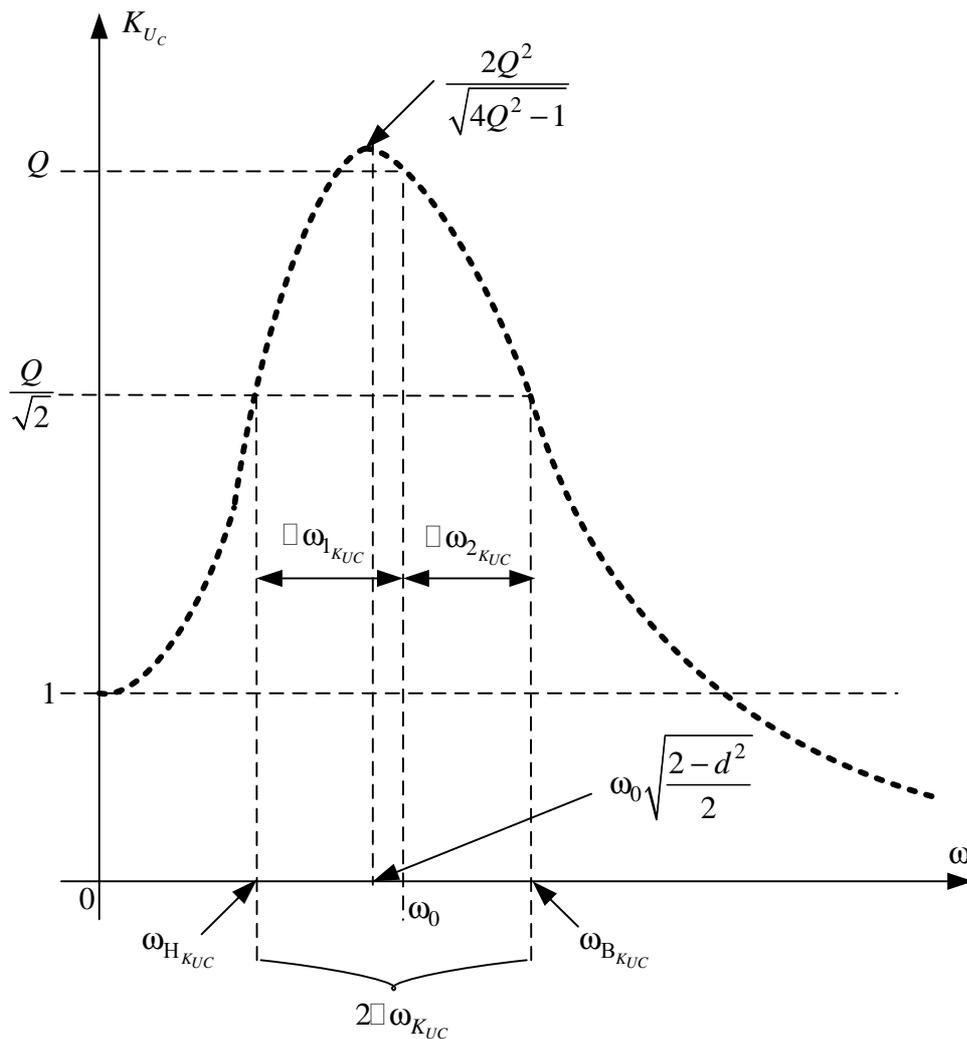


Рис.3. АЧХ коэффициента передачи по напряжению K_{UC} при снятии выходного напряжения с ёмкости контура

Из выражения (2) можно получить значения верхней $\omega_{B_{K_{UC}}}$ и нижней $\omega_{H_{K_{UC}}}$ граничных частот полосы пропускания контура:

$$\omega_{B_{K_{UC}}} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2} + \frac{1}{Q}}, \quad (3)$$

$$\omega_{H_{KUC}} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2} - \frac{1}{Q}}, \quad (4)$$

а также частоту ω_{U_C} , на которой величина K_{U_C} становится максимальной:

$$\omega_{U_C} = \omega_0 \sqrt{\frac{2-d^2}{2}}, \quad (5)$$

и равной:

$$K_{U_C} = \frac{2Q^2}{\sqrt{4Q^2 - 1}}. \quad (6)$$

Выражения (3), (4), (5) и (6) являются точными (строгими), но в случае высокой добротности контура величиной $\frac{1}{2Q^2}$ в выражениях (3), (4), величиной $d^2 = \frac{1}{Q^2}$ в выражении (5) и величиной 1 в выражении (6) пренебрегают и выражения (3), (4), (5) и (6) приобретают, соответственно, следующий вид:

$$\omega_{B_{KUC}} = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{1}{Q}}, \quad (7)$$

$$\omega_{H_{KUC}} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{Q}}, \quad (8)$$

$$\omega_{U_C} = \omega_0, \quad (9)$$

$$K_{U_C} = \frac{2Q^2}{\sqrt{4Q^2}} = Q. \quad (10)$$

Однако, указанные приближения справедливы для добротностей контура $Q = 20-100$ и более. Как мы убедились с помощью численных подстановок в группу точных формул (3) – (6) и в группу приближенных формул (7) – (10), при добротностях $Q = 10$ неточность выражений (7) – (10) по сравнению с выражениями (3) – (6) появляется уже в третьем знаке. Очевидно, что при более низких добротностях неточность выражений (7) – (10) станет неприемлемой и в качестве расчетных формул необходимо будет использовать строгие выражения (3) – (6), позволяющие рассчитывать АЧХ последовательных контуров с произвольным значением добротности.

Заметим, что использование строгих выражений (3) – (6) может оказаться также необходимо не только при расчетах параметров контуров с низкими значениями добротностей, но и в случаях расчета эквивалентных колебательных контуров на СВЧ, когда даже небольшие значения относительных погрешностей оказываются достаточно большими по своим абсолютным значениям.