

ФИЛЬТРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Часть 2. Другие типы фильтров

С.Н. Песков, зам. директора по науке ГК «Полюс-С», к.т.н.,
Н.Н. Иванча, нач. проектного отдела ГК «Полюс-С»

В настоящей части рассматриваются другие типы фильтров: полосно-заграждающие фильтры (ПЗФ), фильтры нижних частот (ФНЧ) и фильтры верхних частот (ФВЧ). Даются практические советы по их построению и использованию.

Полосно-заграждающие фильтры (ПЗФ) наиболее часто используются для подавления какого-либо нежелательного сигнала. ПЗФ также именуют фильтром-пробкой или режекторным фильтром. ПЗФ являются дуальными по отношению к ППФ. Простейшие одноконтурные ПЗФ представлены на рис.1, а их АЧХ и $K_{ст.У}$ – на рис.2. Коэффициент подавления, как и во всех других фильтрах, зависит от реализуемой добротности колебательных контуров. Избирательность всех фидов фильтров обеспечивается за счет сильного рассогласования в нерабочей полосе частот. Для идеальных фильтров коэф-

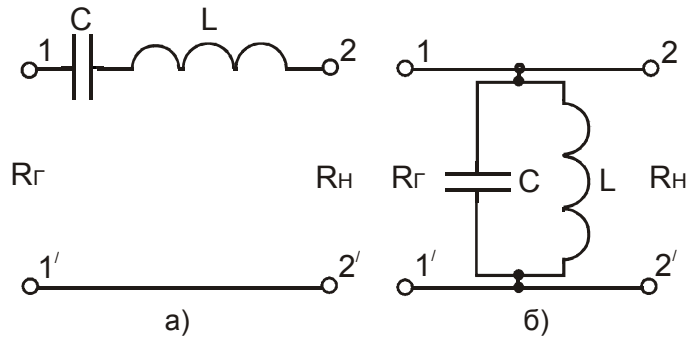


Рис.1

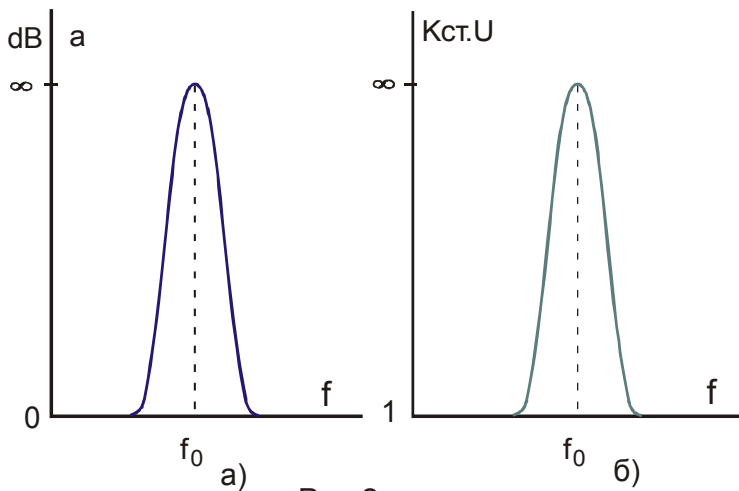


Рис.2

фициент отражения в рабочей полосе частот равен 0, а в нерабочей – 1 (полное отражение, за счет чего и обеспечивается подавление нежелательных сигналов). Для ПЗФ же рабочей областью является диапазон частот, в котором подавляются нежелательные сигналы.

Для реализации большего коэффициента подавления в низкоомных цепях ($R_0 \leq 100 \dots 300$ Ом) целесообразно использовать схему рис.1а, а в высокоомных – схему рис.1б. Основным недостатком таких простейших одноконтурных ПЗФ является резко выраженная зависимость коэффициента подавления a от полосы заграждения (аналогично одноконтурным ППФ). Так, для подавления какого-либо ТВ канала, такие ПЗФ в большинстве случаев являются непригодными. Значительно большее применение находят многоконтурные ПЗФ, конфигурация и формулы по расчету которых представлены в табл.1.

Для оценки реализуемых величин элементов приведем численный пример расчета.

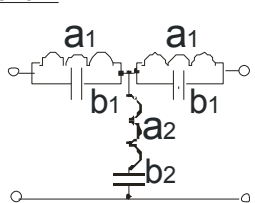
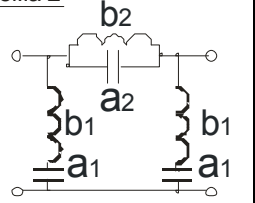
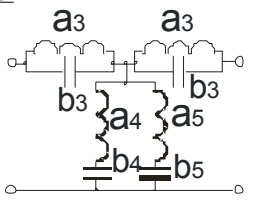
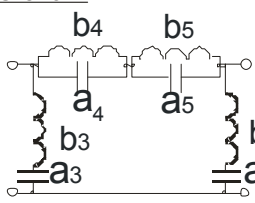
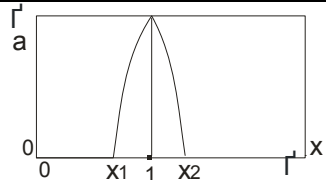
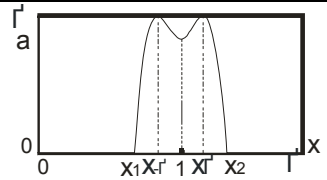
Пример 1. Требуется рассчитать ПЗФ для подавления в кабельной сети ($R_0 = 75$ Ом) диапазона УКВ (66 – 74 МГц). Добротность используемых элементов $Q_{эл}=100$.

Решение.

1. Выбираем простейшую схему 1 табл.1 и рассчитываем нормированные параметры (все условные обозначения аналогичны принятым в [1]):

$$f_o = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = \sqrt{66 \cdot 74} = 69,89 \text{ МГц};$$

Таблица 1

Звенья частотно-симметричных заграждающих фильтров			
<p>Схема 1</p> 	<p>Схема 2</p> 	<p>Схема 3</p> 	<p>Схема 4</p> 
Характеристическое затухание			
			
Значения элементов схемы (нормированные)			
$\alpha_1 = W; \quad \beta_1 = \frac{1}{W};$ $\alpha_2 = \frac{1}{2W}; \quad \beta_2 = 2W;$	$\alpha_3 = mW; \quad \beta_3 = \frac{1}{mW};$ $\alpha_4 = \frac{1+x_\infty^2}{2mW}; \quad \beta_4 = \frac{2mW}{1+x_\infty^2};$ $\alpha_5 = \frac{1+x_\infty^2}{2mW}; \quad \beta_5 = \frac{2mW}{1+x_\infty^2};$		
Коэффициент m			
<p>_____</p>	$m = \sqrt{1 - \frac{1+x_\infty^2}{W^2 x_\infty^2}}$		
Характеристическое затухание на частоте бесконечного затухания			
<p>_____</p>	$\alpha_{\pm\infty} = 20 \lg \left[\frac{4m^2 Q(x_\infty - x_{-\infty})}{1 - m^2(x_\infty + x_{-\infty})} \right]$		
Единичные индуктивность и емкость			
$L_o = \frac{R_o}{2\pi f_o}$	$C_o = \frac{1}{2\pi f_o R_o}$		
Характеристическое затухание			
$\alpha = 20 \lg \frac{1+q}{1-q};$ $q = \frac{1}{\sqrt{1-y^2}};$ $y = \frac{1}{W} \left(x - \frac{1}{x} \right);$	$\alpha = 20 \lg \frac{1+mq}{1-mq};$ $q = \frac{1}{\sqrt{1-y^2}};$ $y = \frac{1}{W} \left(x - \frac{1}{x} \right);$		

$$W = \frac{f_2 - f_1}{f_o} = x_2 - x_1 = \frac{74 - 66}{69,89} = 0,114$$

$$a_1 = W = 0,114; \quad \beta_1 = \frac{1}{W} = 8,736;$$

$$a_2 = \frac{1}{2}W = 4,368; \quad \beta_2 = 2W = 0,229.$$

2. Рассчитываем номиналы элементов схемы (рис.3):

$$\alpha = 20 \lg \frac{1+q}{1-q}; \quad \alpha = 20 \lg \frac{1+mq}{1-mq};$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{1-y^2}}; \quad q = \frac{1}{\sqrt{1-y^2}};$$

$$y = \frac{1}{W} \left(x - \frac{1}{x} \right); \quad y = \frac{1}{W} \left(x - \frac{1}{x} \right);$$

$$L_1 = \frac{R_o}{2\pi f_o} \cdot a_1 = \frac{75}{2\pi \cdot 69,89 \cdot 10^6} \cdot 0,114 = 19,5 \text{ нГн};$$

$$L_2 = \frac{R_o}{2\pi f_o} \cdot a_2 = \frac{75}{2\pi \cdot 69,89 \cdot 10^6} \cdot 4,368 = 746 \text{ нГн};$$

$$C_1 = \frac{R_o}{2\pi f_o R_o} \cdot \beta_1 = \frac{75}{2\pi \cdot 69,89 \cdot 10^6 \cdot 75} \cdot 8,736 = 265 \text{ пФ};$$

$$C_2 = \frac{R_o}{2\pi f_o R_o} \cdot \beta_2 = \frac{75}{2\pi \cdot 69,89 \cdot 10^6 \cdot 75} \cdot 0,229 = 6,95 \text{ пФ};$$

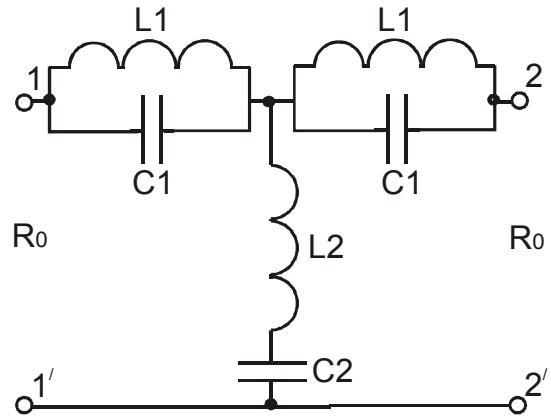


Рис.3

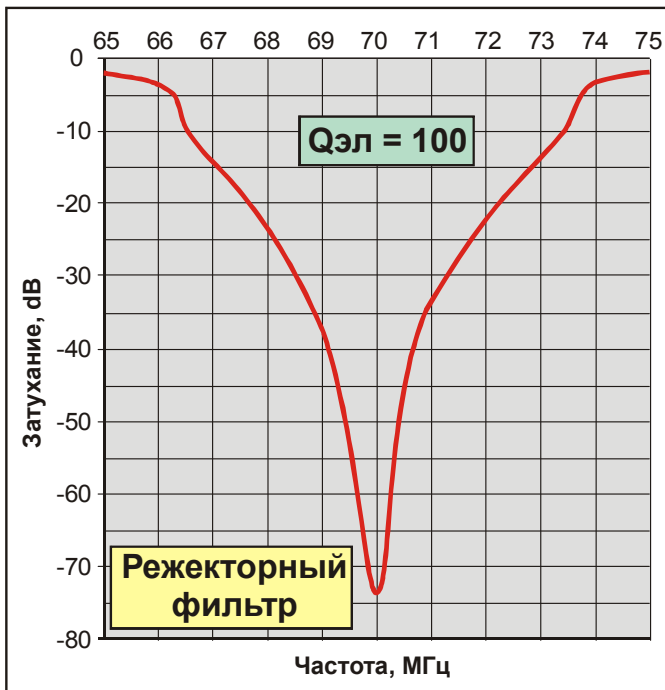


Рис.4

Реализуемая форма АЧХ, построенная по формулам табл.1, показана на рис.4. Из рисунка видно, что при такой широкой полосе заграждения (66-74 МГц) глубина режекции на краях полосы является незначительной, в силу чего контура расстраивают по частоте относительно друг друга. При этом глубина режекции снижается до 20-30 дБ, а форма коэффициента подавления приближается к прямоугольной.

Фильтры нижних частот (ФНЧ) находят наибольшее применение в частотных диплексерах (например, при формировании прямого и реверсного каналов в усилителях). Типовая форма АЧХ ФНЧ представлена на рис.5а. В пределах полосы прозрачности (от нулевой частоты $f = 0$ до частоты среза f_c) ФНЧ обладает характеристическим сопротивлением, равным

сопротивлению тракта передачи (в нашем случае 75 Ом). Типовая частотная зависимость ко-

эфициента стоячей волны по напряжению $K_{cm.U}$ представлена на рис.5б. Для увеличения крутизны скатов и введения частот бесконечного затухания в полосу задерживания, одно из плеч ФНЧ представляют в виде колебательного контура, обладающего нулевым или бесконечным сопротивлением на резонансной частоте.

Формулы по расчету звеньев ФНЧ (на практике используются многосвязные фильтры) представлены в табл.2.

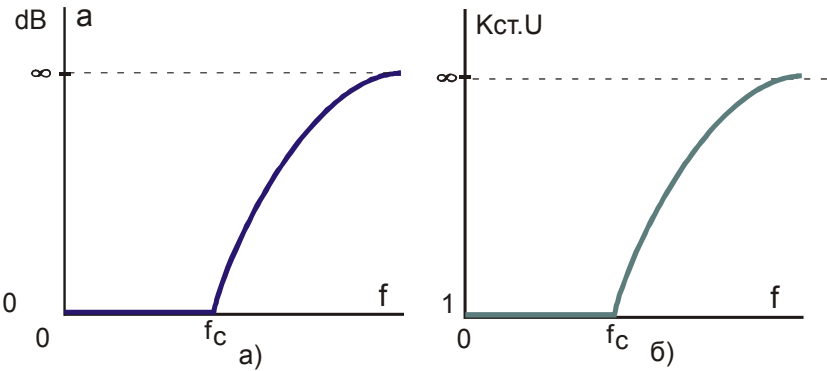


Рис.5

Таблица 2

Звенья фильтров нижних частот					
Схема 1 	Схема 2 	Схема 3 	Схема 4 	Схема 5 	Схема 6
Характеристическое затухание					
Значения элементов схемы (нормированные)					
$\alpha_1 = 1;$ $\beta_1 = 2;$	$\alpha_2 = W;$ $\alpha_3 = \frac{1-m^2}{2m};$ $\beta_3 = 2m;$		$\alpha_2 = m;$ $\beta_2 = \frac{1-m^2}{m};$ $\beta_3 = 2m;$		
Коэффициент m					
_____			$m = \frac{\sqrt{x_\infty^2 - 1}}{x_\infty};$		
Характеристическое затухание на частоте бесконечного затухания					
_____			$\alpha_{x_\infty} = 20 \lg \frac{4m^2}{1-m^2} Q;$		
Единичные индуктивность и емкость					
$L_o = \frac{R_o}{2\pi f_o};$		$C_o = \frac{1}{2\pi f_o R_o};$			
Характеристическое затухание					

$$\alpha = 20 \lg \frac{1+q}{1-q};$$

$$q = \frac{x}{\sqrt{x^2-1}};$$

$$x = \frac{f}{f_c};$$

$$\alpha = 20 \lg \frac{1+mq}{1-mq};$$

$$q = \frac{x}{\sqrt{x^2-1}};$$

$$x = \frac{f}{f_c};$$

Для оценки значений элементов приведем численный пример расчета.

Пример 2. Требуется рассчитать одно звено частотного диплексера с частотой среза ФНЧ в 30 МГц. Частота бесконечного затухания должна соответствовать частоте $f_a = 47$ МГц. Добротность используемых элементов $Q = 100$.

1. Выбираем схему б в табл.2 и рассчитываем нормированные параметры:

$$x_a = \frac{f_a}{f_c} = \frac{47}{30} = 1,567 ;$$

$$m = \frac{\sqrt{x_a^2-1}}{x_a} = \frac{\sqrt{1,567^2-1}}{1,567} = 0,77 ;$$

$$\alpha_2 = m = 0,77 ;$$

$$\beta_2 = \frac{1-m^2}{m} = 0,53 ;$$

$$\beta_3 = 2m = 1,54 ;$$

$$L_0 = \frac{R_0}{2\pi f_c} = \frac{75}{2\pi \cdot 30 \cdot 10^6} = 398 \text{ нГ};$$

$$C_0 = \frac{1}{2\pi f_c R_0} = \frac{1}{2\pi \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 75} = 70,7 \text{ пФ}.$$

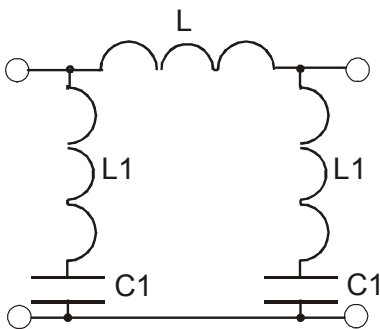


Рис.5

$$L_1 = L_0 \cdot \beta_2 = 398 \cdot 0,53 = 211 \text{ нГ};$$

$$C_1 = C_0 \cdot \alpha_2 = 70,7 \cdot 0,77 = 54,5 \text{ пФ};$$

$$L_2 = L_0 \cdot \beta_3 = 398 \cdot 1,54 = 613 \text{ нГ}.$$

3. Вычисляем коэффициент подавления на частоте бесконечного затухания $f_a = 47$ МГц:

$$a_{xa} = 20 \lg \frac{4m^2}{1-m^2} \cdot Q = 20 \lg \left(\frac{4 \cdot 0,77^2}{1-0,77^2} \cdot 100 \right) = 54,3 \text{ дБ}.$$

4. Строим АЧХ ФНЧ в полосе задерживания по формулам табл.2:

2. Рассчитываем номиналы элементов схемы (рис.5):

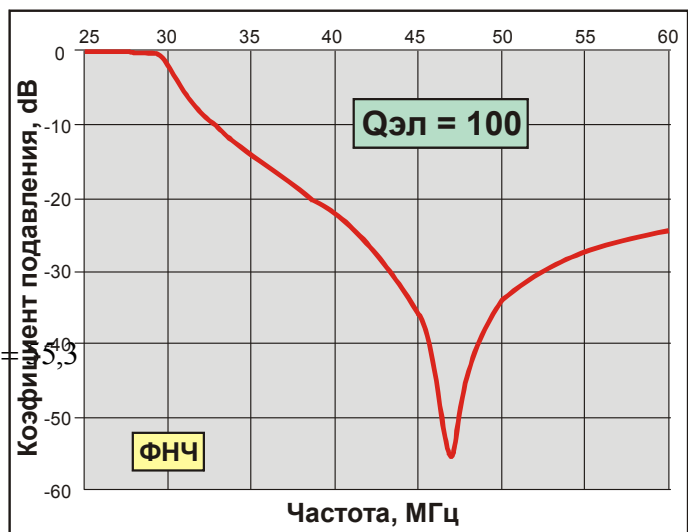


Рис.6

$$a = 20 \lg \left| \frac{1+mq}{1-mq} \right|; \quad q = \frac{x}{\sqrt{x^2-1}}.$$

Рассчитанная АЧХ вблизи частоты среза $f_c = 30$ МГц представлена на рис.6. На практике, в целях реализации более высокого коэффициента подавления в более широком диапазоне частот, применяют многосвязные ФНЧ с расстроенными частотами бесконечного затухания в интересующем диапазоне частот. Потери в полосе прозрачности при этом суммируются.

Фильтры верхних частот (ФВЧ), как и ФНЧ, наибольшее применение находят в частотных диплексах. Типовая форма АЧХ ФВЧ представлена на рис.7а. В пределах полосы пропускания (от частоты среза f_c до $f = \infty$) ФВЧ обладает характеристическим сопротивлением, равным сопротивлению тракта передачи (75 Ом). Частотный закон изменения $K_{cm,U}$, как и для всех других фильтров, повторяет закон затухания (все фильтры работают на отражение) и представлен на рис.7б.

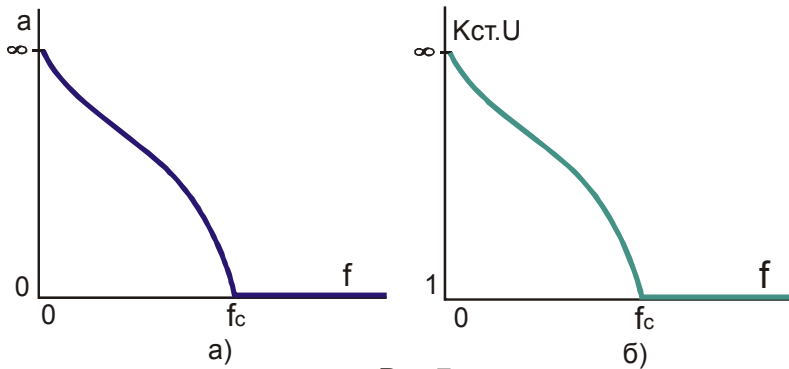


Рис.7

Формулы по расчету звеньев ФВЧ представлены в табл.3. Приведем численный пример расчета звена ФВЧ.

Таблица 3

Звенья фильтров верхних частот					
Схема 1 	Схема 2 	Схема 3 	Схема 4 	Схема 5 	Схема 6
Характеристическое затухание					
Значения элементов схемы (нормированные)					
$\alpha_1 = 1;$ $\beta_1 = 2;$	$\alpha_3 = \frac{1}{2m};$ $\beta_2 = \frac{1}{m};$ $\beta_3 = \frac{2m}{1-m^2};$		$\alpha_2 = \frac{m}{1-m^2};$ $\alpha_3 = \frac{1}{2m};$ $\beta_2 = \frac{1}{m};$		
Коэффициент m					
_____			$m = \sqrt{1-x_\infty^2};$		
Характеристическое затухание на частоте бесконечного затухания					
_____			$\alpha_{x_\infty} = 20 \lg \frac{4m^2}{1-m^2} Q;$		
Единичные индуктивность и емкость					

$L_o = \frac{R_o}{2\pi f_o};$	$C_o = \frac{1}{2\pi f_o R_o};$
Характеристическое затухание	
$\alpha = 20 \lg \frac{1+q}{1-q};$	$\alpha = 20 \lg \frac{1+mq}{1-mq};$
$q = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}};$	$q = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}};$
$x = \frac{f}{f_c};$	$x = \frac{f}{f_c};$

Пример 3. Требуется рассчитать звено частотного диплексера (см. пример 2) с частотой среза ФВЧ в 47 МГц. Частота бесконечного затухания должна соответствовать частоте $f_a = 30$ МГц. Добротность используемых элементов $Q = 100$.

1. Выбираем схему 3 табл.3 и рассчитываем нормированные параметры:

$$x_a = \frac{f_a}{f_c} = \frac{30}{47} = 0,638 ;$$

$$m = \sqrt{1-x_a^2} = 0,77 ;$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2m} = 0,65 ;$$

$$\beta_2 = \frac{1}{m} = 1,3 ;$$

$$\beta_3 = \frac{2m}{1-m^2} = 3,78 ;$$

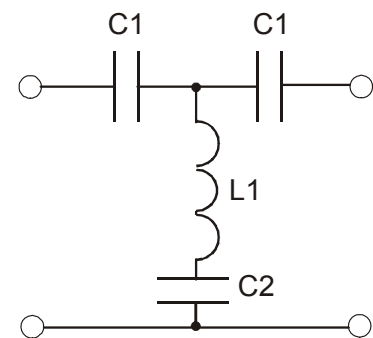


Рис.8

$$L_o = \frac{R_o}{2\pi f_c} = \frac{75}{2\pi \cdot 47 \cdot 10^6} = 254 \text{ нГ} ;$$

$$C_o = \frac{1}{2\pi f_c R_o} = \frac{1}{2\pi \cdot 47 \cdot 10^6 \cdot 75} = 45,2 \text{ пФ} .$$

3. Рассчитываем номиналы элементов схемы (рис.8):

$$L_1 = L_o \cdot \alpha_3 = 254 \cdot 0,65 = 165 \text{ нГ} ;$$

$$C_1 = C_o \cdot \beta_2 = 45,2 \cdot 1,3 = 58,7 \text{ пФ} ;$$

$$C_2 = C_o \cdot \beta_3 = 45,2 \cdot 3,78 = 171 \text{ пФ} .$$

4. Вычисляем коэффициент подавления на частоте бесконечного затухания $f_a = 30$ МГц:

$$a_{xa} = 20 \lg \frac{4m^2}{1-m^2} \cdot Q = 20 \lg \left(\frac{4 \cdot 0,77^2}{1-0,77^2} \cdot 100 \right) = 55,3$$

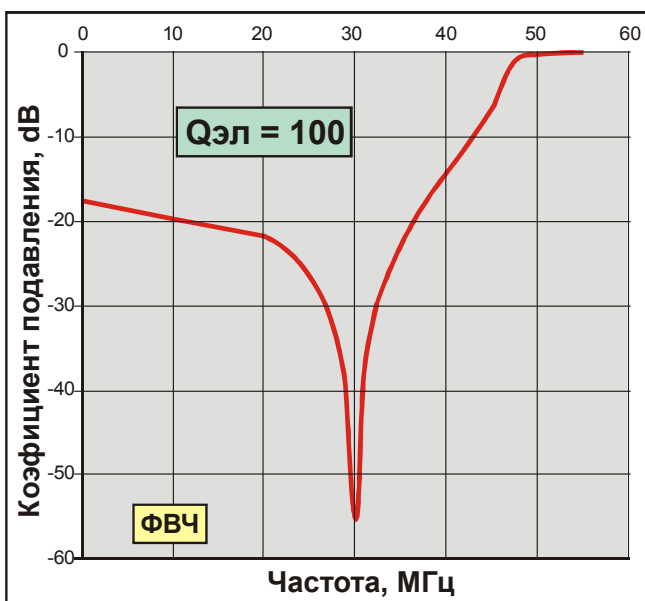


Рис.9

dB.

4. Строим АЧХ ФВЧ в полосе задерживания по формулам табл.3:

$$a = 20 \lg \left| \frac{1 + mq}{1 - mq} \right|; \quad q = \frac{x}{\sqrt{1 - x^2}} .$$

Рассчитанная АЧХ вблизи частоты среза $f_c = 47$ МГц представлена на рис.9.

Читателям, заинтересованным в расчете и построения всех видов представленных фильтров, авторы с удовольствием вышлют полную удобную в пользовании (на основе диалога) программу по их расчету. Обращаться по E-mail: peskov@pole-s.ru.

Литература

1. Песков С.Н., Иванча Н.Н. Фильтрующие устройства. Часть 1. Полосно-пропускающие фильтры. «Кабельщик», 2009г., №.....с.....