Цель работы:

Исследование электрической схемы и функциональных характеристик линейного инерционного ARC – преобразователя.

Исходные данные:

Резонансная частота F=50000 Гц

Добротность Q=25

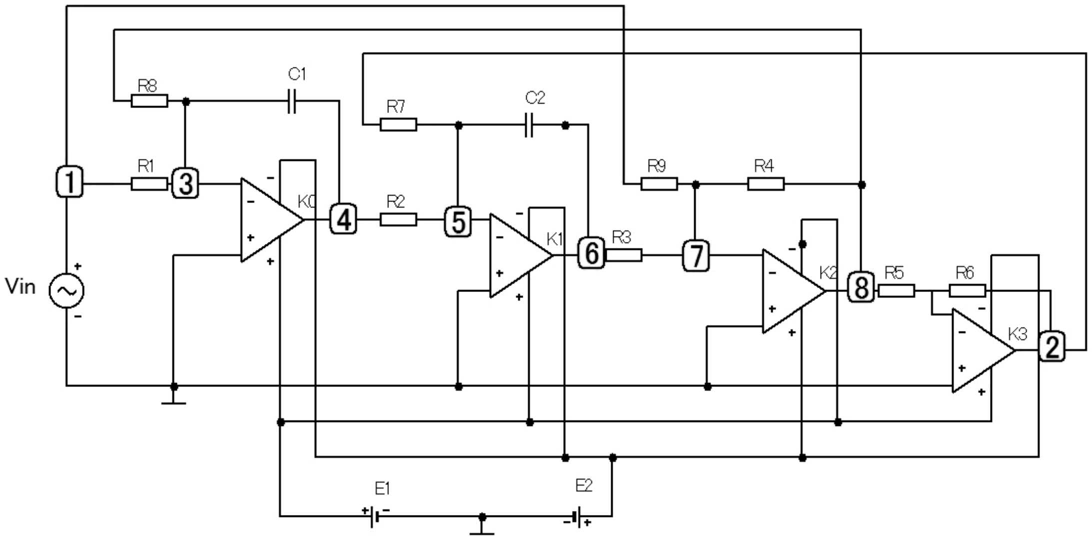

Рисунок 1. Функциональная схема

Выбрана модель операционного усилителя LMC6462AIM

3. Задание на работу

1. Определить значения элементов функциональной схемы устройства.
2. Рассчитать частотные характеристики устройства в согласованном с преподавателем диапазоне частот.
3. Рассчитать чувствительность функциональных характеристик к изменению значения заданного элемента.
4. Рассчитать запас устойчивости функциональных характеристик к изменению значения заданного элемента.
5. Выполнить моделирование заданного устройства с использованием пакета *Micro-Cap*с получением частотных характеристик и оценкой чувствительности по заданному элементу.

Характеристики операционного усилителя:

Рисунок 2. Операционного усилитель LMC6462AIM/NOPB

Производитель: National Semiconductor

Ход выполнения задания:

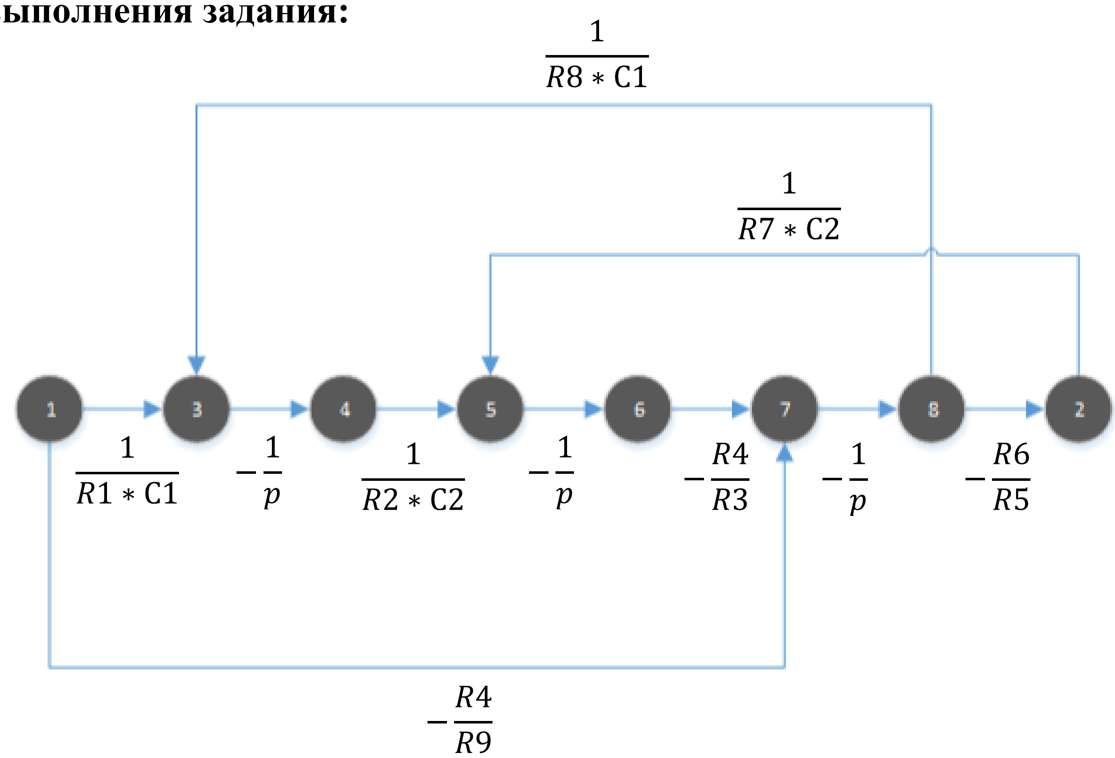

Рисунок 3. Сигнальный граф схемы

Передаточная функция рассчитывается по формуле:

$$T_u = \frac{\frac{1}{R1*C1} * -\frac{1}{p} * \frac{1}{R2*C2} * -\frac{1}{p} * -\frac{R4}{R3} * -\frac{R6}{R5} + \frac{R6}{R5} * \frac{R4}{R9}}{1 + \frac{1}{R7*C2} * \frac{R6}{R5} * \frac{R4}{R3} * \frac{1}{p} + \frac{1}{p^2} * \frac{1}{R2*C2} * \frac{1}{R8*C1} * \frac{R4}{R3}}$$

$$= \frac{\frac{1}{R1*C1} * \frac{1}{p^2} * \frac{1}{R2*C2} * \frac{R4}{R3} * \frac{R6}{R5} + \frac{R6}{R5} * \frac{R4}{R9}}{1 + \frac{1}{R7*C2} * \frac{R6}{R5} * \frac{R4}{R3} * \frac{1}{p} + \frac{1}{p^2} * \frac{1}{R2*C2} * \frac{1}{R8*C1} * \frac{R4}{R3}} * \frac{p^2}{p^2}$$

$$= \frac{\frac{1}{R1*C1} * \frac{1}{R2*C2} * \frac{R4}{R3} * \frac{R6}{R5} + p^2 * \frac{R6}{R5} * \frac{R4}{R9}}{p^2 + p^1 * \frac{1}{R7*C2} * \frac{R6}{R5} * \frac{R4}{R3} + \frac{1}{R2*C2} * \frac{1}{R8*C1} * \frac{R4}{R3}}$$

R1=R2=R3=R4=R5=R6=R8=R9=R;
C1=C2=C;

Получаем конечную формулу передаточной функции:

$$T_u = \frac{p^2 + \frac{1}{(R*C)^2}}{p^2 + p^1 * \frac{1}{R7*C} + \frac{1}{(R*C)^2}}$$

Расчёт величин RC - элементов по исходным данным

Определение значений элементов целесообразно проводить при следующих условиях:

В этом случае:

$C := 5 \times 10^{-9}$ $\quad C2 := C \quad C1 := C$

и необходимо задаться величиной емкости C или сопротивления R:

$R := \dfrac{1}{2 \cdot \pi \cdot F \cdot C}$ $\quad R7 := 25 \cdot R$ $\quad R = 636.62$

$R1 := R \quad R2 := R \quad R3 := R \quad R4 := R \quad R5 := R \quad R6 := R$

$R7 = 1.592 \times 10^{4}$

Коэффициенты полиномов

$b0 := \left(\dfrac{1}{R \cdot C}\right)^2 \quad a0 := \left(\dfrac{1}{R \cdot C}\right)^2 \quad a1 := \dfrac{1}{R7 \cdot C}$ $\quad R8 := R \quad R9 := R$

$b0 = 9.87 \times 10^{10}$

$a1 = 1.257 \times 10^{4}$

$f := 0, 10 .. 100000 \quad j := \sqrt{-1} \quad p(f) := j \cdot 2 \cdot \pi\, f$

$a0 = 9.87 \times 10^{10}$

$$T(f) := \frac{p(f)^2 + b0}{p(f)^2 + a1 \cdot p(f) + a0}$$

Частотные характеристики преобразователя

$MT(f) := |T(f)| \qquad \phi(f) := 180 \cdot \dfrac{\arg(T(f))}{\pi}$

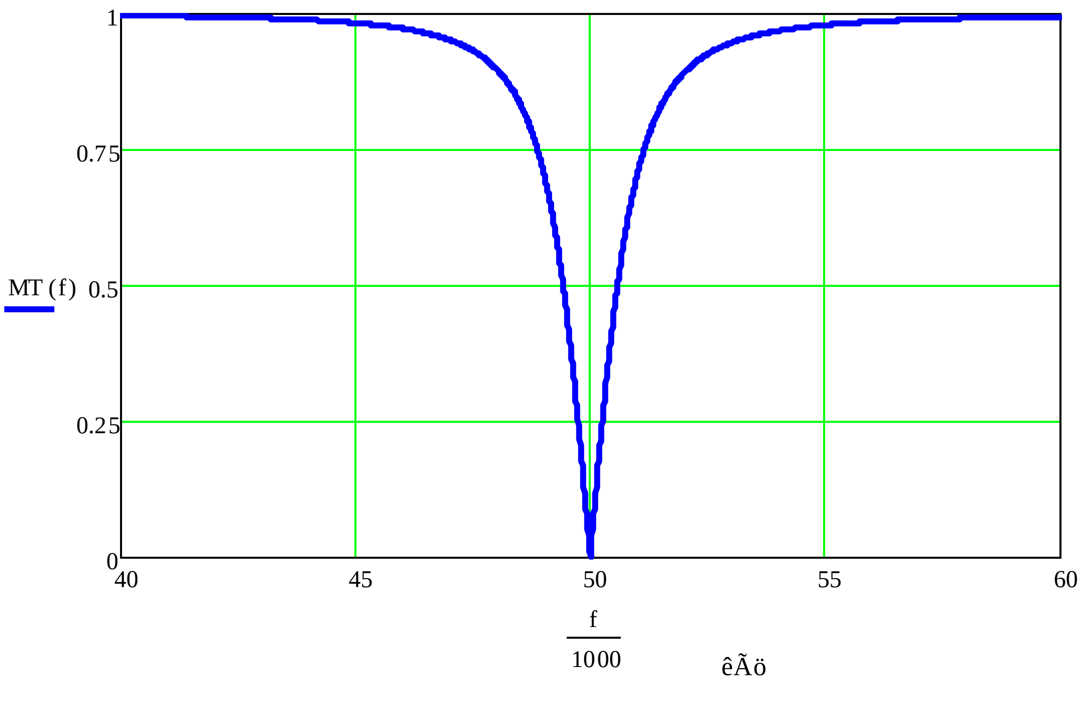

Рис.4. Амплитудно - частотная характеристика преобразователя

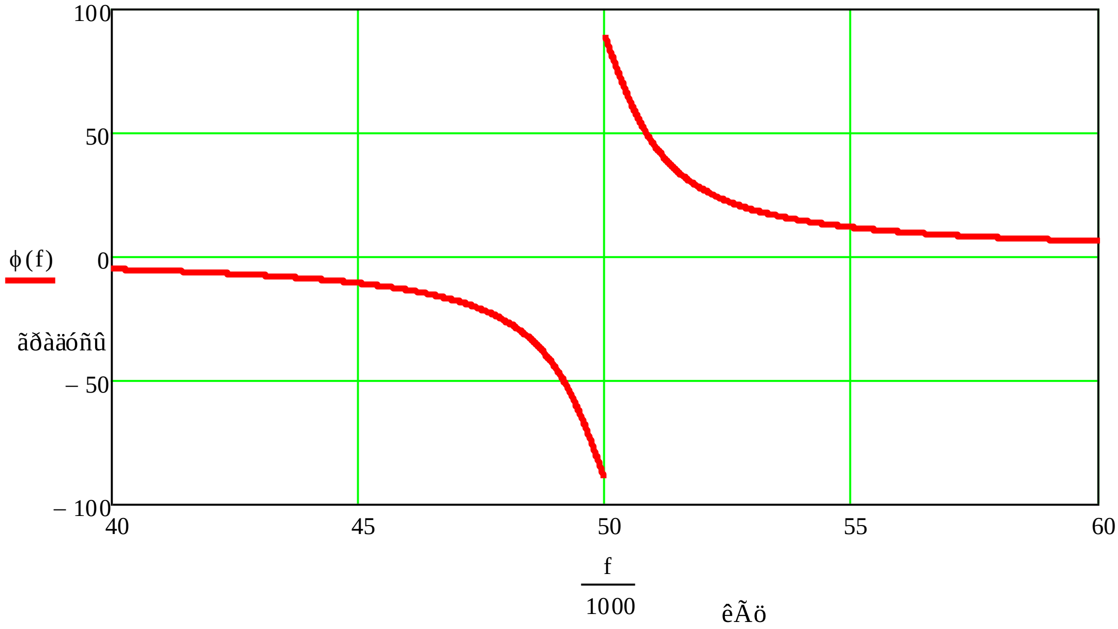

Рис.5. Фазо - частотная характеристика преобразователя

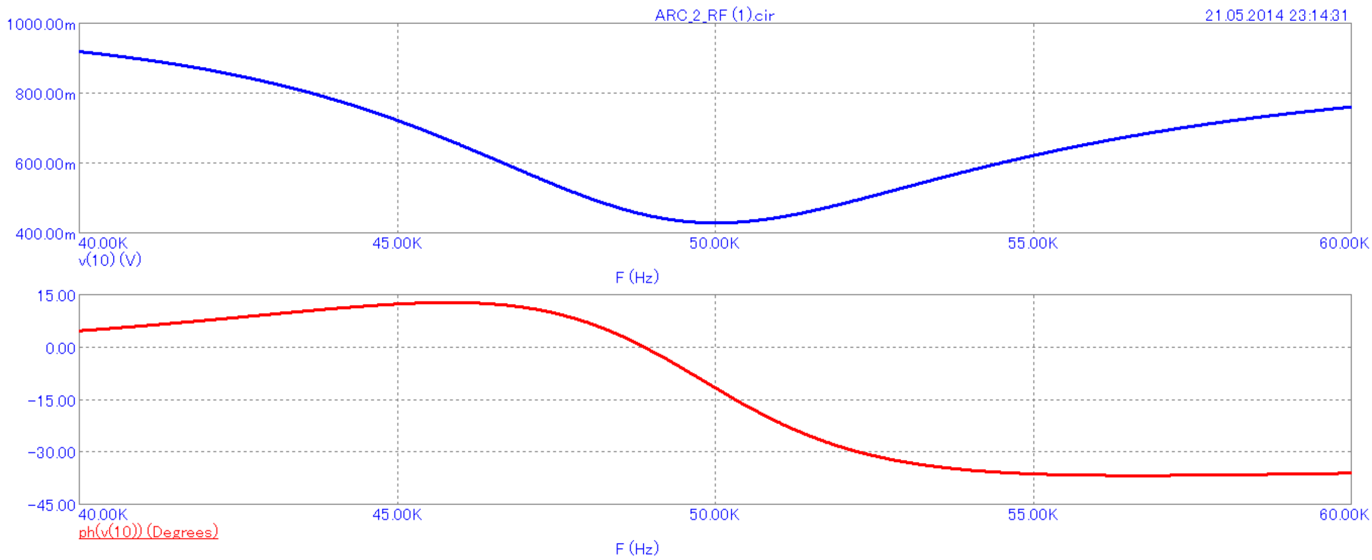

Рисунок 8. Результат схемотехнического моделирования

Чувствительность характеристик к изменению величины С2

Коэффициенты полиномов: $\beta := \frac{R4 \cdot R6}{R5 \cdot R9}$

$\beta0 := \frac{R4 \cdot R6}{R1 \cdot R2 \cdot R3 \cdot R5 \cdot C1}$ $\quad b0 := \frac{\beta0}{C2}$ $\quad b0 = 9.87 \times 10^{10}$

$\alpha0 := \frac{R4}{R2 \cdot R3 \cdot R8 \cdot C1}$ $\quad a0 := \frac{\alpha0}{C2}$ $\quad a0 = 9.87 \times 10^{10}$

$\alpha1 := \frac{R6 \cdot R4}{R7 \cdot R5 \cdot R3}$ $\quad a1 := \frac{\alpha1}{C2}$ $\quad a1 = 1.257 \times 10^{4}$

$f := 0, 100 .. 100000$ $\quad j := \sqrt{-1}$ $\quad p(f) := j \cdot 2 \cdot \pi\, f$

$$T(f) := \frac{p(f)^2 \cdot \beta + \frac{\beta0}{C2}}{p(f)^2 + \frac{\alpha1}{C2} \cdot p(f) + \frac{\alpha0}{C2}}$$

$$STT(f) := \left(\frac{d}{dC2} \frac{p(f)^2 \cdot \beta + \frac{\beta0}{C2}}{p(f)^2 + \frac{\alpha1}{C2} \cdot p(f) + \frac{\alpha0}{C2}} \right) \cdot C2$$

$STT(F) = 25i$

$SMT(f) := \left| \left| STT(f) \right| \right|$

$$S\phi(f) := \left(\frac{d}{dC2} \arg\left(\frac{p(f)^2 \cdot \beta + \frac{\beta0}{C2}}{p(f)^2 + \frac{\alpha1}{C2} \cdot p(f) + \frac{\alpha0}{C2}} \right) \right) \cdot C2$$

$S\phi(F) = 0$

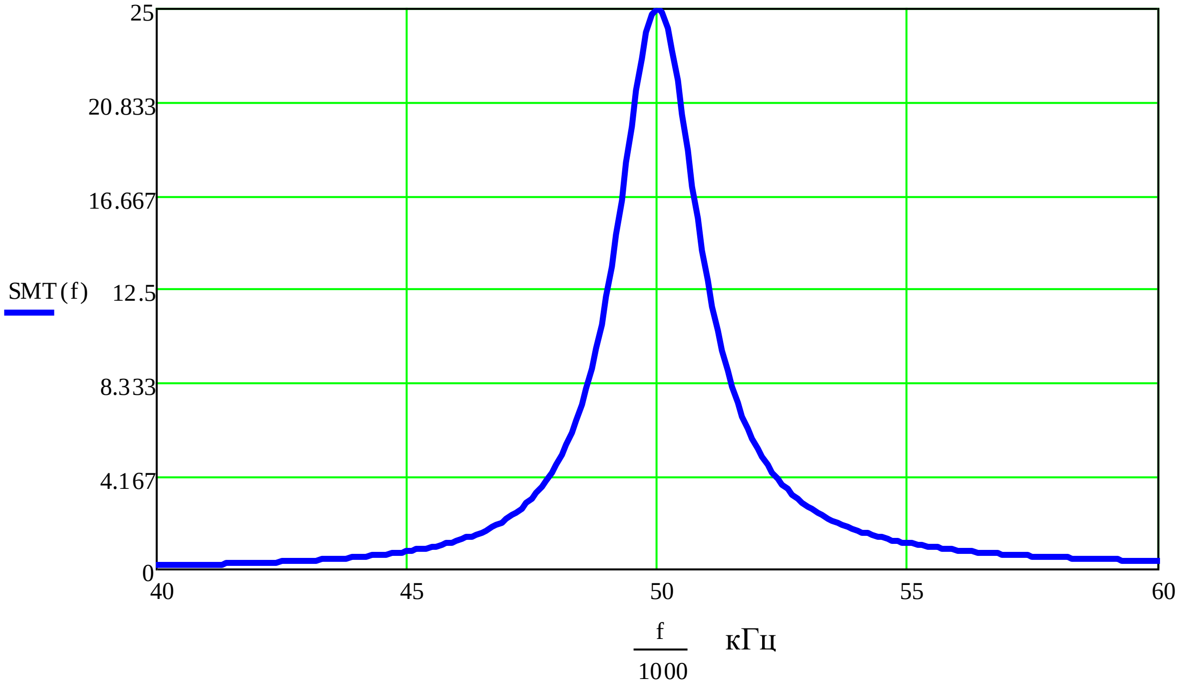

Рис. 7. Чувствительность АЧХ к изменению величины С2

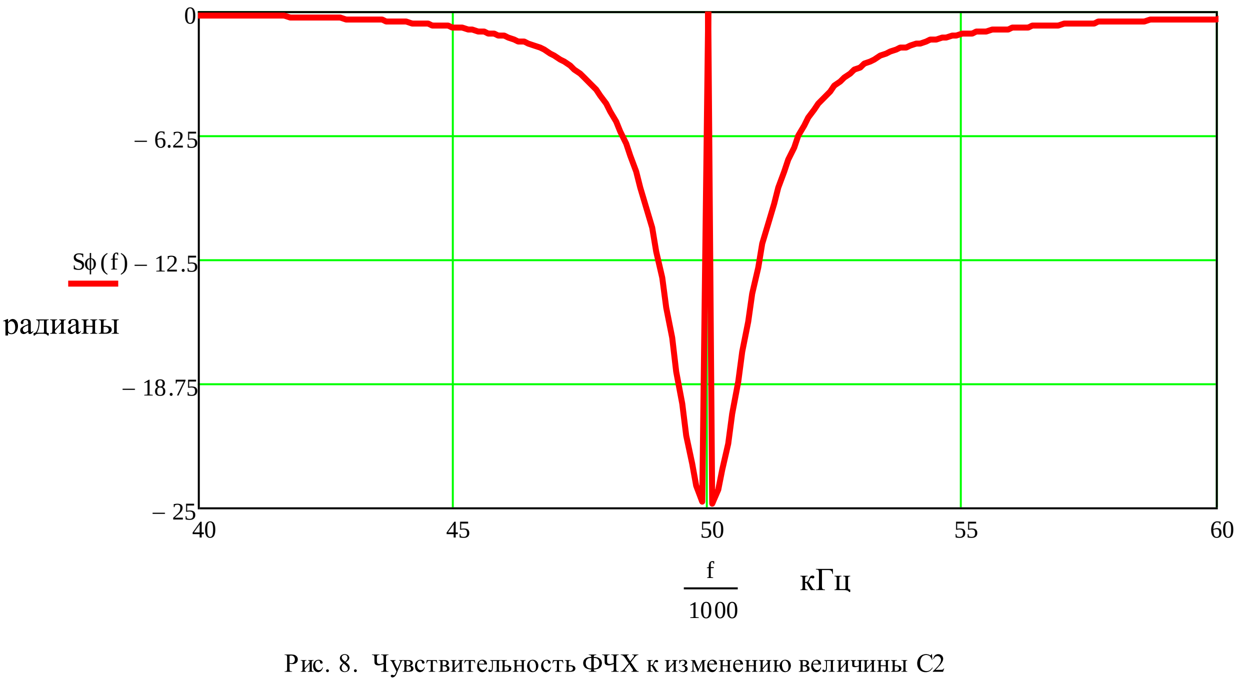

Рис. 8. Чувствительность ФЧХ к изменению величины С2

Устойчивость преобразователя

Given

$\alpha 0 = 493.48$

$$\left(\frac{\alpha 1}{C2} = 0\right)$$

$\alpha 1 = 6.283 \times 10^{-5}$

$C2k := \mathrm{Find}(C2)$ $\quad C2k = 4.056 \times 10^{23}$ $\quad \beta 0 = 493.48$

Следует вывод, что схема обладает бесконечным запасом устойчивости.

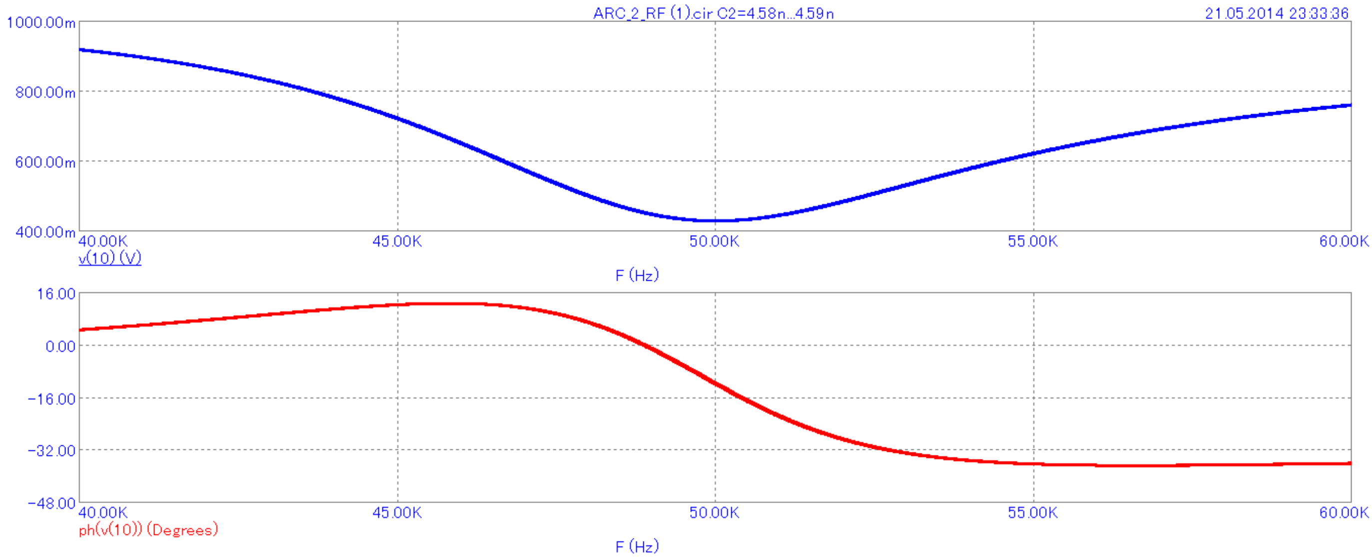

Рисунок 9. Чувствительностьпо элементуС2

Как видно на графиках, полученных путём моделирования в MicroCap, чувствительность схемы к изменению элемента С2 равна нулю, так как элемент не влияет на устойчивость схемы.

$$Re\ S_{C2}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot C2}{\Delta C2} = \frac{(428{,}32 - 428{,}32) * 4.58}{4.58} = 0$$

$$Im\ S_{C2}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot C2}{\Delta C2} = \frac{(-11.64 \mp 11{,}64) * 4.58}{4.58}$$

Данные подтверждаются расчётом в MathCAD, где чувствительность так же равна нулю.

Чувствительность характеристик к изменению величины R5

Коэффициенты полиномов:

$$\beta0 := \frac{R4 \cdot R6}{R1 \cdot R2 \cdot R3 \cdot C2 \cdot C1} \qquad b0 := \frac{\beta0}{R5} \qquad b0 = 9.87 \times 10^{10}$$

$$\alpha0 := \frac{R4}{R2 \cdot R3 \cdot R8 \cdot C1 \cdot C2} \qquad a0 := \alpha0 \qquad a0 = 9.87 \times 10^{10}$$

$$\alpha1 := \frac{R6 \cdot R4}{R7 \cdot C2 \cdot R3} \qquad a1 = 1.257 \times 10^{4}$$

$$a1 := \frac{\alpha1}{R5}$$

$$\alpha10 := \frac{R6 \cdot R4}{R7 \cdot C2 \cdot R5 \cdot R3} \qquad \beta1 := \frac{(R4 \cdot R6)}{R9}$$

$$\alpha10 = 1.257 \times 10^{4}$$

$$f := 0, 1 .. 60000 \qquad j := \sqrt{-1} \qquad p(f) := j \cdot 2 \cdot \pi f$$

$$T(f) := \frac{\frac{\beta0}{R5} + \beta1 \cdot \frac{p(f)^2}{R5}}{p(f)^2 + \frac{\alpha1}{R5} \cdot p(f) + \alpha0}$$

$$STT(f) := \left(\frac{d}{dR5} \left| \frac{\frac{\beta0}{R5} + \beta1 \cdot \frac{p(f)^2}{R5}}{p(f)^2 + \frac{\alpha1}{R5} \cdot p(f) + \alpha0} \right| \right) \cdot R5 \qquad STT(F) = 0$$

$$\varphi T(f) := \frac{d}{dR5} 1 \cdot \left(\arg\left(\frac{\frac{\beta0}{R5} + \beta1 \cdot \frac{p(f)^2}{R5}}{p(f)^2 + \frac{\alpha1}{R5} \cdot p(f) + \alpha0} \right) \cdot R5 \right)$$

$$\varphi T(F) = 0$$

$$SMT(f) := Re(STT(f)) \qquad S\phi(f) := \varphi T(f)$$

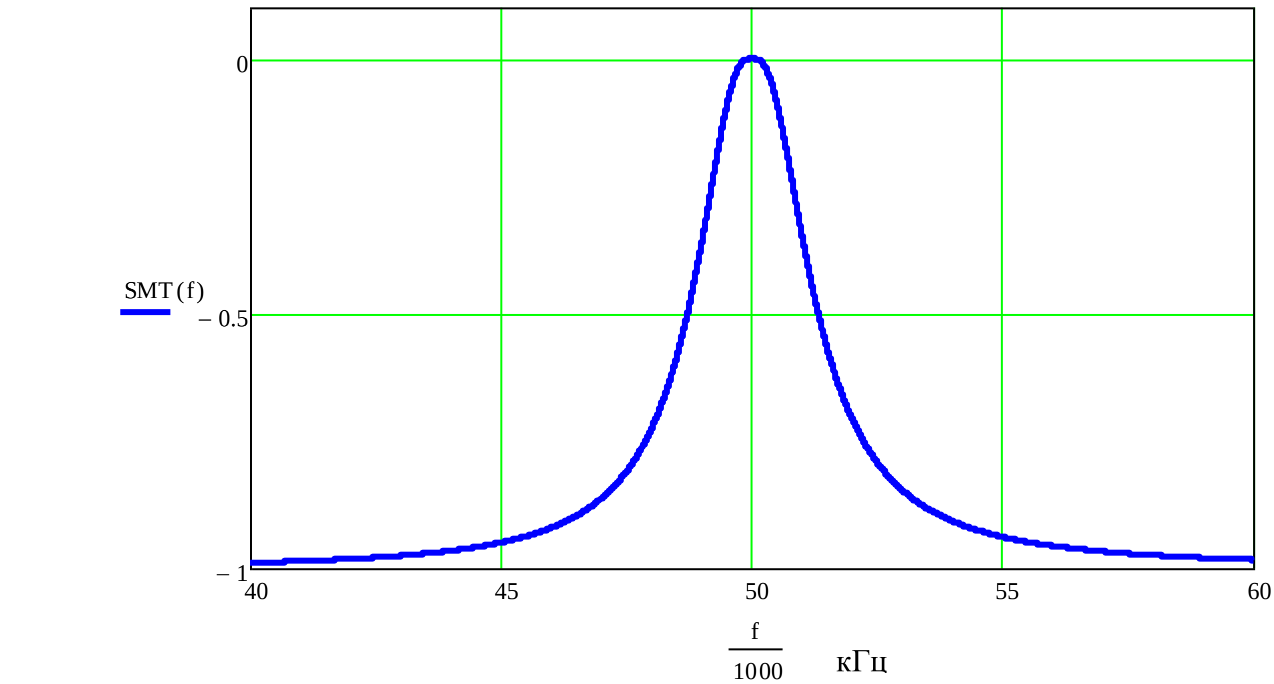

Рис. 10. Чувствительность АЧХ к изменению величины R5

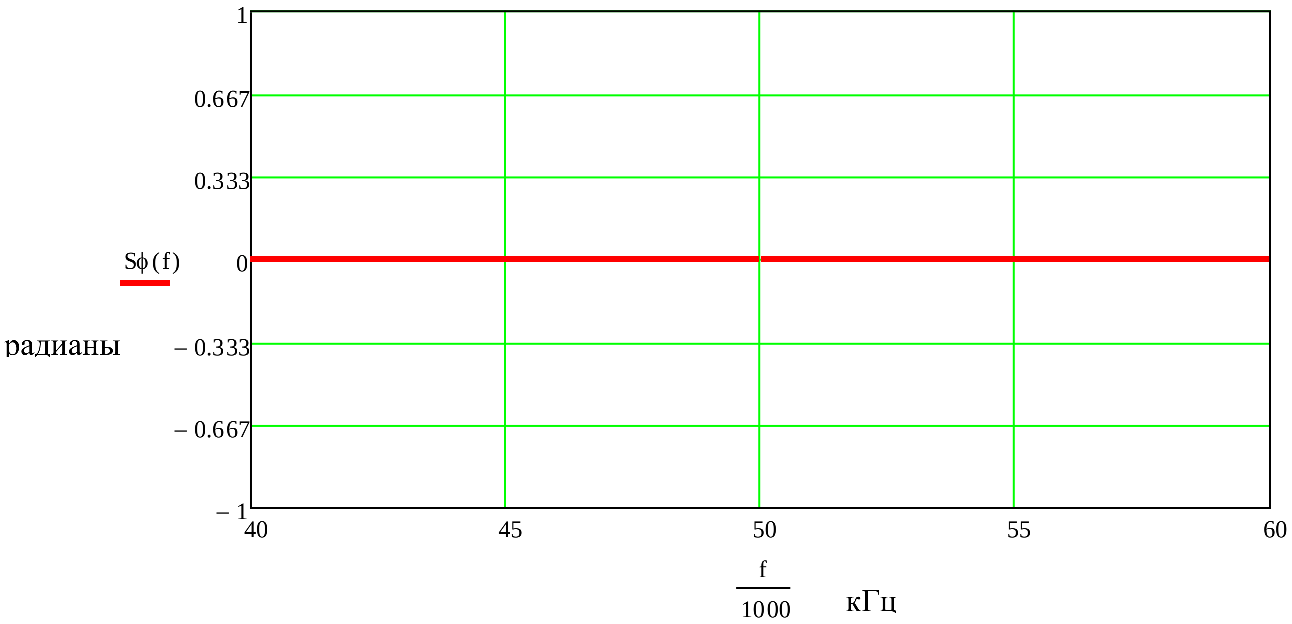

Рис. 11 Чувствительность ФЧХ к изменению величины R5

Устойчивость преобразователя

Given

$$\frac{\frac{\beta 0}{R5} + \beta 1 \cdot \frac{1}{R5}}{\frac{\alpha 1}{R5} + \alpha 0} = 0$$

R5k := Find(R5) $\quad$ $R5k = 5.165 \times 10^{34}$

Следует вывод, что схема обладает бесконечным запасом устойчивости.

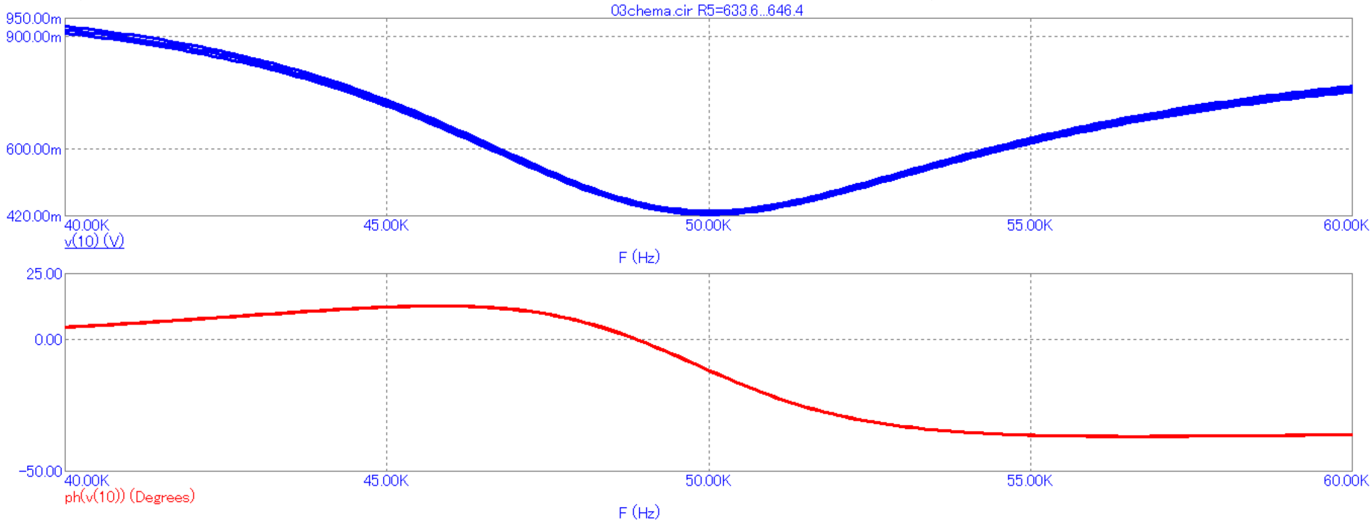

Рисунок 12 Чувствительность по элементу R5

$$Re\, S_{R5}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot R5}{\Delta R5} = \frac{(420 - 420) * 636.6}{636.6} = 0$$

$$Im\, S_{C1}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot R5}{\Delta R5} = \frac{(-11.64 + 11{,}64) * 636.6}{636.6} = 0$$

Чувствительность характеристик к изменению величины R9

Коэффициенты полиномов:

$$\beta := R6 \cdot \frac{R4}{R5}$$

$$\beta0 := \frac{R4 \cdot R6}{R1 \cdot R2 \cdot R3 \cdot R5 \cdot C2 \cdot C1} \qquad b0 := \beta0 \qquad b0 = 9.87 \times 10^{10}$$

$$\alpha0 := \frac{R4}{R2 \cdot R3 \cdot R8 \cdot C1 \cdot C2} \qquad a0 := \alpha0 \qquad a0 = 9.87 \times 10^{10}$$

$$\alpha1 := \frac{R6 \cdot R4}{R7 \cdot R5 \cdot R3 \cdot C2} \qquad a1 = 1 \cdot \alpha1 \qquad a1 = 1.257 \times 10^{4}$$

$$f := 0, 100 .. 100000 \qquad j := \sqrt{-1} \qquad p(f) := j \cdot 2 \cdot \pi\, f$$

$$T(f) := \frac{p(f)^2 \cdot \frac{\beta}{R9} + \beta0}{p(f)^2 + \alpha1 \cdot p(f) + \alpha0}$$

$$\varphi T(f) := \left(\frac{d}{dC1} \arg\left(\frac{p(f)^2 \cdot \frac{\beta}{R9} + \beta0}{p(f)^2 + \alpha1 \cdot p(f) + \alpha0} \right) \right) \cdot C1 \qquad STT(f) := \left(\frac{d}{dC1} \left| \frac{p(f)^2 \cdot \frac{\beta}{R9} + \beta0}{p(f)^2 + \alpha1 \cdot p(f) + \alpha0} \right| \right) \cdot C1$$

$$STT(F) = 0$$

$$\varphi T(F) = 0$$

$$SMT(f) := |STT(f)| \qquad S\phi(f) := \varphi T(f)$$

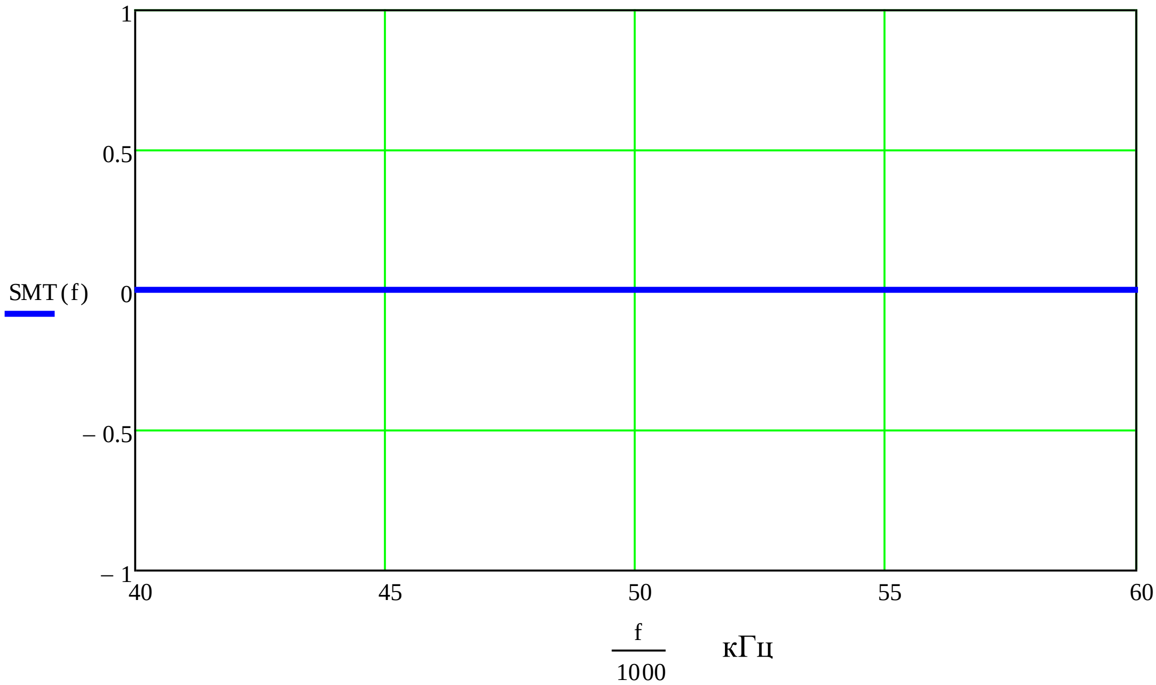

Рис. 13 Чувствительность АЧХ к изменению величины R9

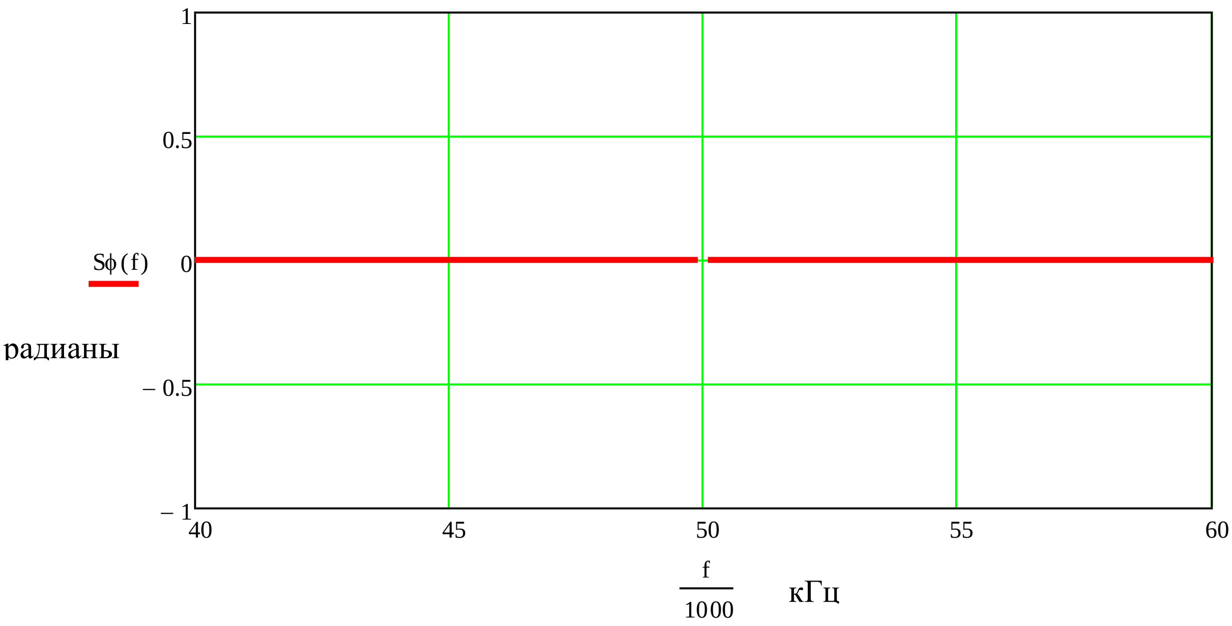

Рис. 14 Чувствительность ФЧХ к изменению величины R9

Устойчивость преобразователя

Given

$$\frac{\beta}{R9} = 0$$

Find(R9)

R9k := R9 R9k = 636.62

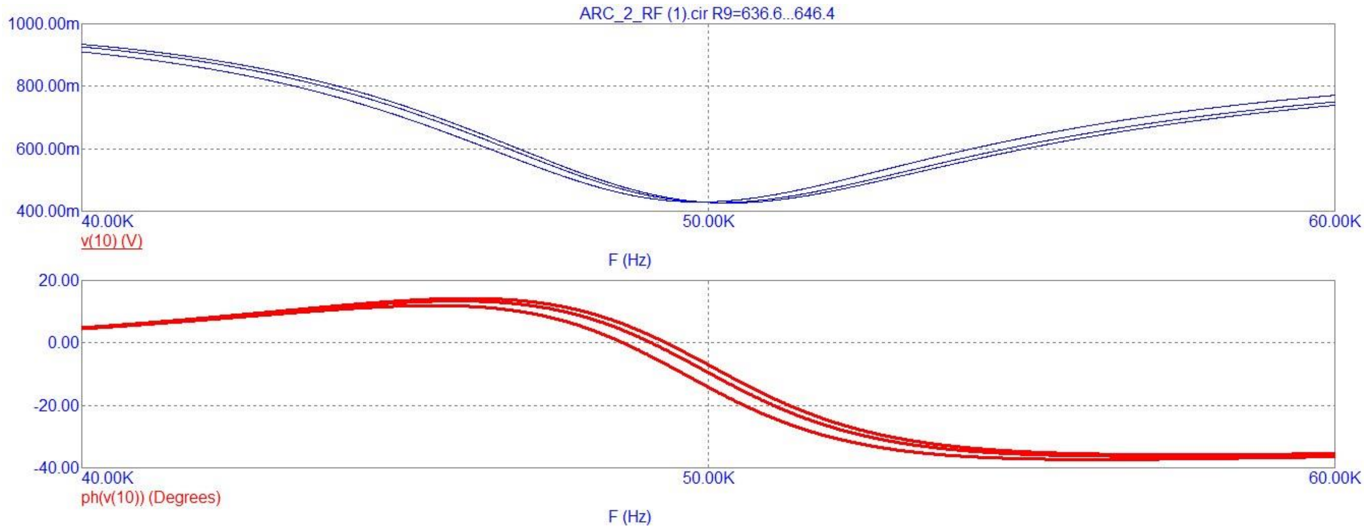

Рисунок 15.Чувствительность по элементу R9

$$Re\ S_{R9}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot R9}{R9} = \frac{(431{,}68 - 431{,}64) * 636}{636} = 0{,}04$$

$$Im\ S_{R9}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot R9}{\Delta R9} = \frac{(-14{,}68 + 11{,}65) * 636}{636} = -3{,}03$$

Чувствительность характеристик к изменению величины R7

Коэффициенты полиномов:

$$\beta0 := \frac{R4 \cdot R6}{R1 \cdot R2 \cdot R3 \cdot R5 \cdot C1 \cdot C2} \qquad b0 := \frac{\beta0}{1} \qquad b0 = 9.87 \times 10^{10}$$

$$\alpha0 := \frac{R4}{R2 \cdot R3 \cdot R8 \cdot C1 \cdot C2} \qquad a0 := \frac{\alpha0}{1} \qquad a0 = 9.87 \times 10^{10}$$

$$\alpha1 := \frac{R4 \cdot R6}{R3 \cdot R5 \cdot C2} \qquad a1 := \frac{\alpha1}{R7} \qquad a1 = 1.257 \times 10^{4}$$

$$\alpha1 = 2 \times 10^{8}$$

$$\alpha10 := \frac{R6 \cdot R4}{C2 \cdot R5 \cdot R3} \qquad a1 := \alpha10$$

$$\alpha10 = 2 \times 10^{8}$$

$$\beta1 := \frac{R6 \cdot R4}{R9} \qquad \beta0 = 9.87 \times 10^{10}$$

$$f := 0, 100 .. 100000 \qquad j := \sqrt{-1} \qquad p(f) := j \cdot 2 \cdot \pi\, f$$

$$T(f) := \frac{\frac{\beta0}{1}}{p(f)^2 + \frac{\alpha1}{R7} \cdot p(f) + \frac{\alpha0}{1}}$$

$$ST(f) := \left(\frac{d}{dR7} \left| \frac{\frac{\beta0}{R7} + \beta1 \cdot \frac{p(f)^2}{R7}}{p(f)^2 + \frac{\alpha1}{R7} \cdot p(f) + \frac{\alpha0}{1}} \right| \right) \cdot R7$$

$$\varphi T(f) := \frac{d}{dR7} 1 \cdot \left(\arg\left(\frac{\frac{\beta0}{R7} + \beta1 \cdot \frac{p(f)^2}{R7}}{p(f)^2 + \frac{\alpha1}{R7} \cdot p(f) + \frac{\alpha0}{1}} \right) \right)$$

$$ST(F) = 1.037 \times 10^{-15}$$

$$S\phi(f) := \varphi T(f)$$

$$SMT(f) := Re(ST(f)) \qquad S\phi(f) := Im(ST(f))$$

$$S\phi(F) = 0$$

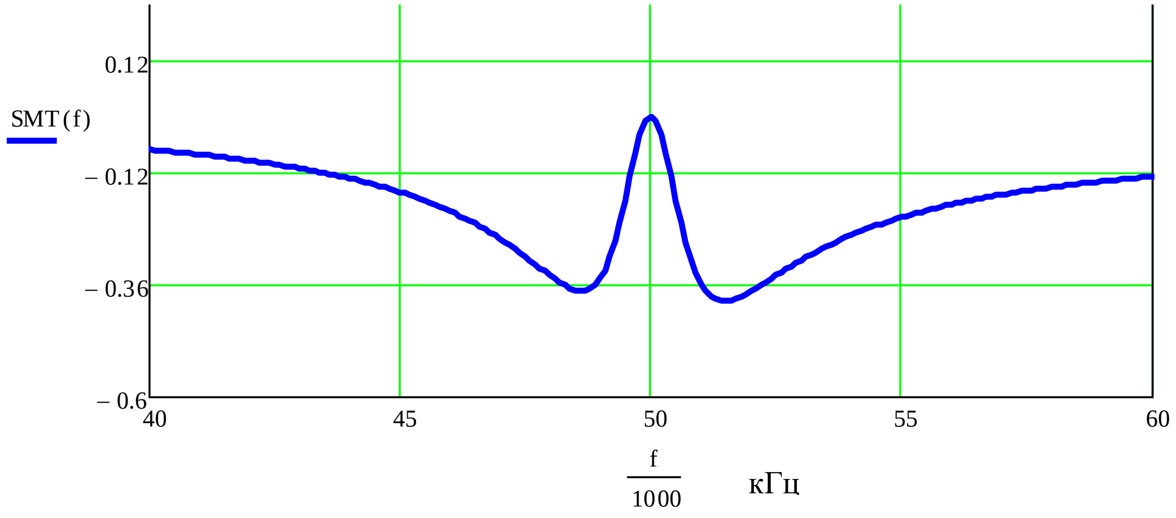

Рис. 16. Чувствительность АЧХ к изменению величины R7

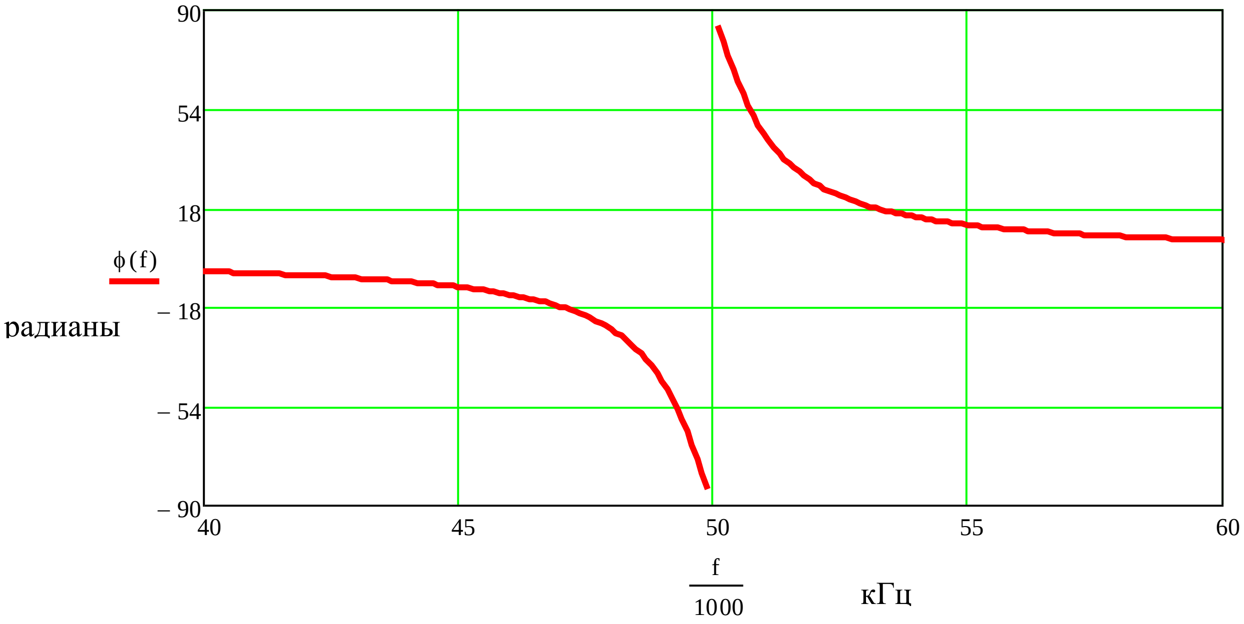

Рис. 17. Чувствительность ФЧХ к изменению величины R7

Устойчивость преобразователя

Given

$\alpha 10 = 2 \times 10^{8}$

$$\frac{\alpha 1}{R7} = 0$$

$\alpha 1 = 2 \times 10^{8}$

$R7k := \mathrm{Find}(R7)$

$R7k = 1.291 \times 10^{36}$

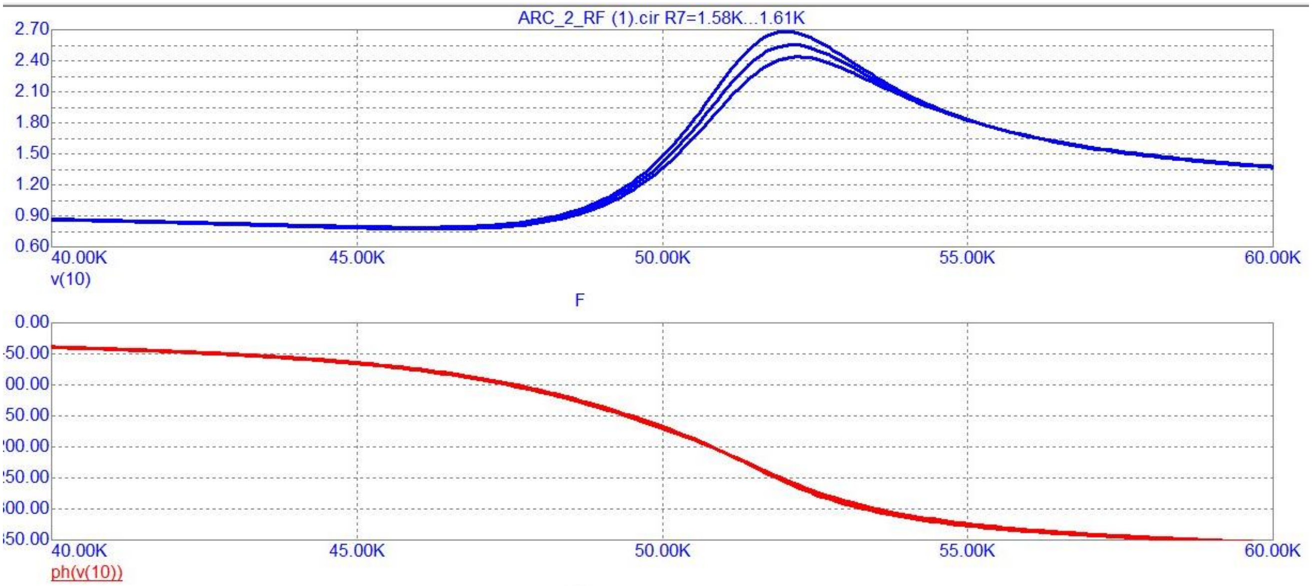

Рисунок 18. Чувствительность по элементу R7

$$Re\ S_{R7}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot R7}{\Delta R7} = \frac{(1610 - 1580) * 1291}{1291} = 30$$

$$Im\ S_{R7}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot R7}{\Delta R7} = \frac{(-55{,}36 - 55{,}36) * 1291}{1291} = 0$$

Чувствительность характеристик к изменению величины R8

Коэффициенты полиномов:

$$\beta 0 := \frac{R4 \cdot R6}{R1 \cdot R2 \cdot R3 \cdot R5 \cdot C1 \cdot C2} \qquad b0 = 9.87 \times 10^{10}$$

$$\alpha 0 := \frac{R4}{R2 \cdot R3 \cdot C1 \cdot C2} \qquad a0 := \frac{\alpha 0}{R8} \qquad a0 = 9.87 \times 10^{10}$$

$$\alpha 1 := \frac{R6 \cdot R4}{R7 \cdot R5 \cdot R3 \cdot C2} \qquad a1 = 1.257 \times 10^{4}$$

$$f := 0, 100 .. 100000 \qquad j := \sqrt{-1} \qquad p(f) := j \cdot 2 \cdot \pi f$$

$$T(f) := \frac{\beta 0}{p(f)^2 + \alpha 1 \cdot p(f) + \frac{\alpha 0}{R8}}$$

$$STT(f) := \left(\frac{d}{dC1} \left| \frac{\beta 0}{p(f)^2 + \alpha 1 \cdot p(f) + \frac{\alpha 0}{R8}} \right| \right) \cdot C1$$

$$\varphi T(f) := \left(\frac{d}{dC1} \arg\left(\frac{\beta 0}{p(f)^2 + \alpha 1 \cdot p(f) + \frac{\alpha 0}{R8}} \right) \right) \cdot C1$$

$$STT(F) = 0 \qquad \varphi T(F) = 0$$

$$SMT(f) := \mathrm{Re}(STT(f)) \qquad S\phi(f) := \mathrm{Im}(\varphi T(f))$$

Следует вывод, что схема обладает бесконечной запасоустойчивостью.

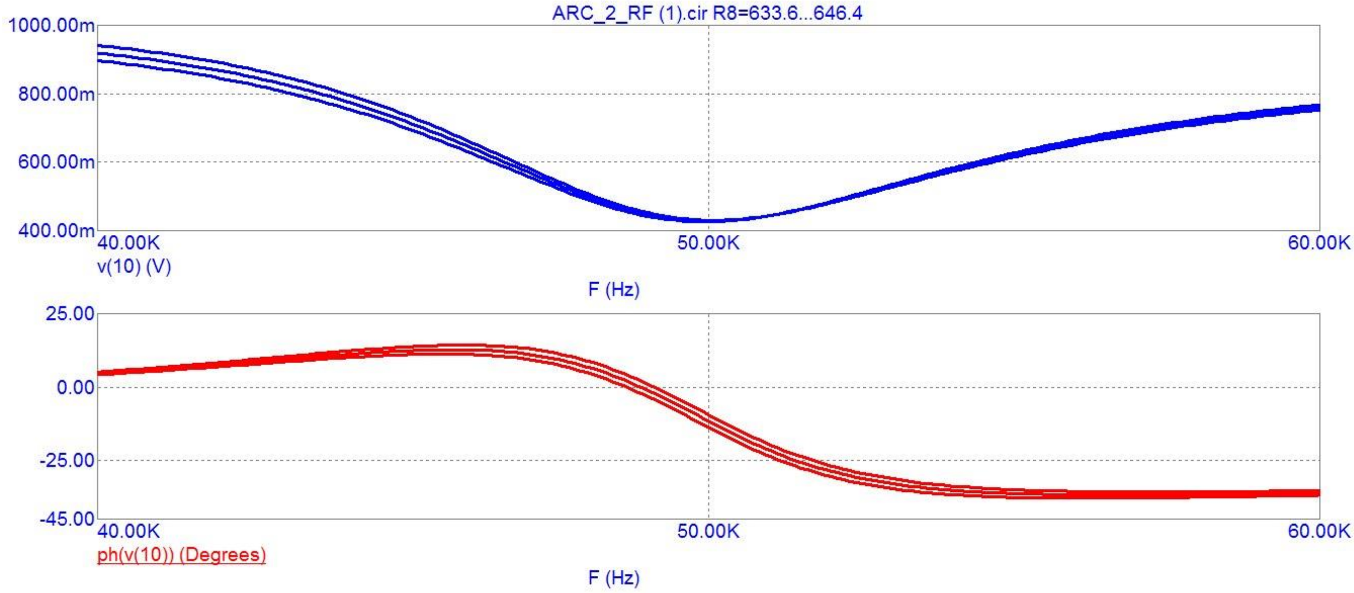

Рисунок 21. Чувствительность по элементу R8

$$Re\ S_{R8}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot R8}{\Delta R8} = \frac{(636 - 636) * 636}{636} = 0$$

$$Im\ S_{R8}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot R8}{\Delta R8} = \frac{(-11.64 + 12{,}2) * 636}{636} = 0.56$$

Чувствительность характеристик к изменению величины C1

Коэффициенты полиномов:

$$\beta0 := \frac{R4\cdot R6}{R1\cdot R2\cdot R3\cdot R5\cdot C2} \qquad b0 := \frac{\beta0}{C1} \qquad b0 = 9.87\times 10^{10}$$

$$\alpha0 := \frac{R4}{R2\cdot R3\cdot R8\cdot C2} \qquad a0 := \frac{\alpha0}{C1} \qquad a0 = 9.87\times 10^{10}$$

$$\alpha1 := \frac{R4}{R2\cdot R8\cdot R3\cdot C2} \qquad \beta := \frac{R6\cdot R4}{R5\cdot R9}$$

$$\alpha10 := \frac{R6\cdot R4}{R7\cdot C2\cdot R5\cdot R3} \qquad a1 := \alpha10 \qquad a1 = 1.257\times 10^{4}$$

$$f := 0, 100 .. 100000 \qquad j := \sqrt{-1} \qquad p(f) := j\cdot 2\cdot \pi\, f$$

$$T(f) := \frac{p(f)^2\beta + \frac{\beta0}{C1}}{p(f)^2 + \alpha10\cdot p(f) + \frac{\alpha1}{C1}} \qquad STT(f) := \left(\frac{d}{dC1}\left|\frac{p(f)^2\beta + \frac{\beta0}{C1}}{p(f)^2 + \alpha10\cdot p(f) + \frac{\alpha1}{C1}}\right|\right)\cdot C1$$

$$\varphi T(f) := \left(\frac{d}{dC1}\arg\left(\frac{p(f)^2\beta + \frac{\beta0}{C1}}{p(f)^2 + \alpha10\cdot p(f) + \frac{\alpha1}{C1}}\right)\right)\cdot C1$$

$STT(F) = 0$

$\varphi T(F) = 0$

$SMT(f) := STT(f)$

$S\phi(f) := \varphi T(f)$

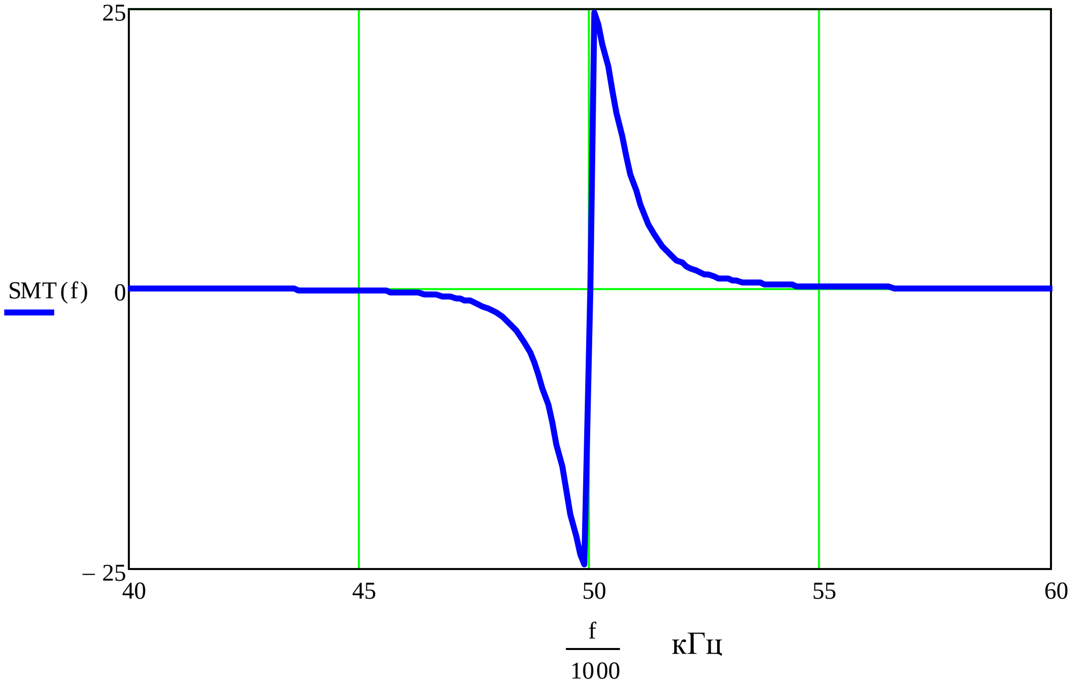

Рис. 22. Чувствительность АЧХ к изменению величины С1

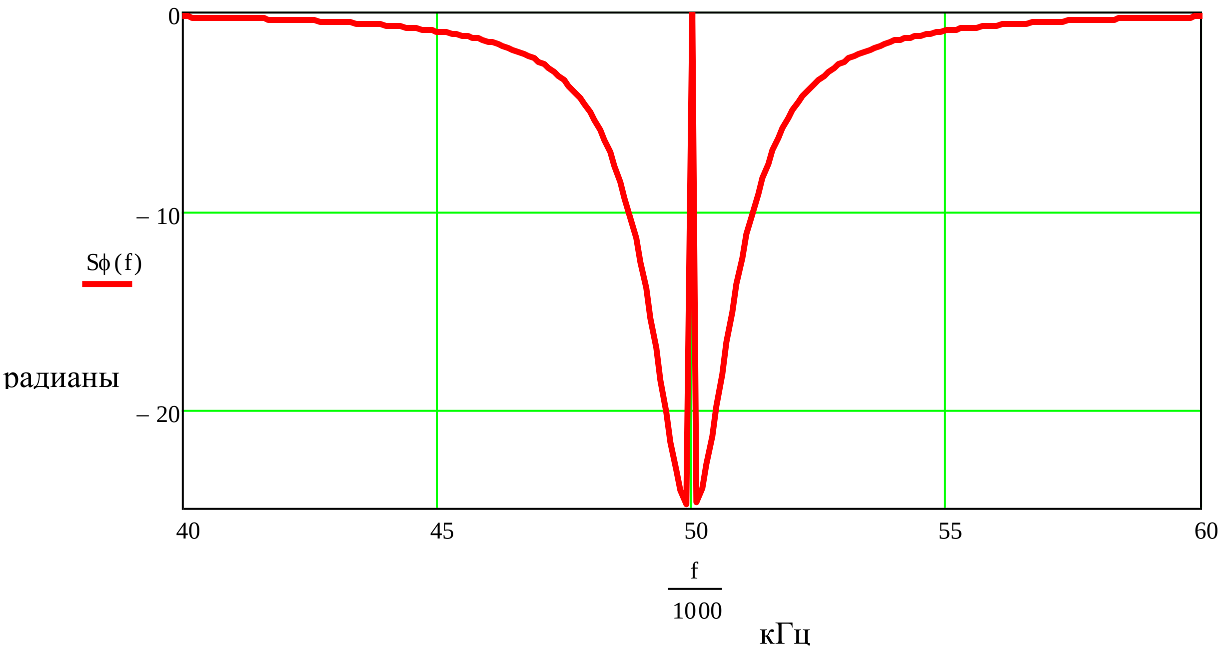

Рис. 23. Чувствительность ФЧХ к изменению величины С1

Устойчивость элемента С1

Given

$$\frac{\beta 0}{C1} = 9.87\times 10^{10}$$

$$\frac{\beta 0}{C1} + \frac{\alpha 1}{C1} = 0 \qquad \frac{\alpha 1}{C1} = 9.87\times 10^{10}$$

$$C1k := Find(C1) \qquad C1k = 4.056\times 10^{23}$$

$$\alpha 10 = 1.257\times 10^{4}$$

$$\alpha 1 = 493.48$$

$$\beta 0 = 493.48$$

$$\beta = 1$$

Следует вывод, что схема обладает бесконечным запасом устойчивости.

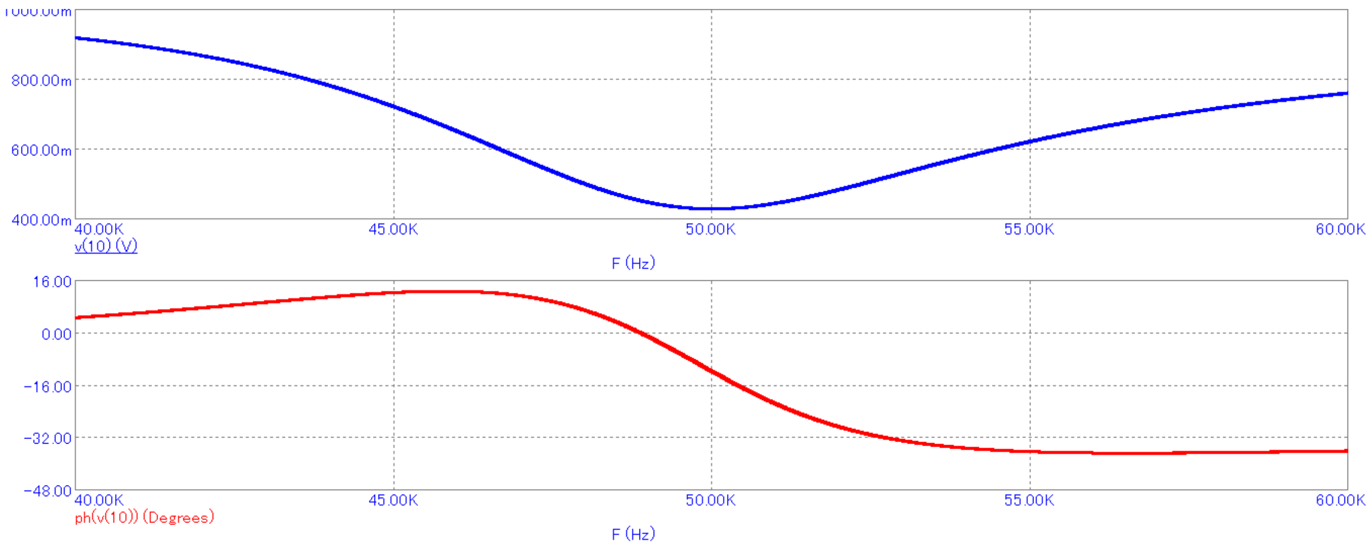

Рисунок 24. Чувствительность по элементу С1

График схемотехнического моделирование в программе MicroCapподтверждает данные полученные расчётом в MathCad. Ниже приведён расчёт по элементу С1 в MicroCap:

$$Re\,S_{C1}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot C2}{\Delta C2} = \frac{(428{,}32 - 428{,}32) * 4.58}{4.58} = 0$$

$$Im\,S_{C1}^{T(f)} = \frac{\Delta T(f) \cdot C2}{\Delta C2} = \frac{(-11.64 + 11{,}64) * 4.58}{4.58} = 0$$

Расчёт показывает, что данный элемент имеет бесконечную устойчивость и его изменения на ∓ 1 % не влияет на характеристики режекторного фильтра.

Фамилия	Элемент	АЧХ MathCAD	ФЧХ MathCAD	АЧХ MicroCap	ФЧХ MicroCap
	C2	0	0	0	0
	R5	0	0	0	0
	R9	0	0	0,04	-3,03
	R7	1.037*10^(-15)	0	30	0
	R8	0	0	0	0,56
	C1	0	0	0	0