

$$\underline{L} := 18 \cdot 10^{-6} \quad F_{sw} := 160000 \quad R_L := 5 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{C} := 180 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \quad V_{ramp} := 4 \quad R_n := \frac{30}{20}$$

$$ESR := \frac{28}{6} \cdot 10^{-3} \quad V_{in} := 76 \quad K_d := \frac{5.1}{132}$$

$$F_x := 16000 \quad \text{частота кроссовера}$$

$$\varphi_m := 70 \quad \text{запас по фазе}$$

ноль в точке резонанса LC

$$f_{z2} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ float}, 5 \rightarrow 1141.5 \quad \text{second zero}$$

Полюса на частоте резонанса конденсатора $C \cdot ESR$ и в половине частоты ШИМ

$$f_{p1} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot ESR \cdot C} \text{ float}, 3 \rightarrow 31578.0 \quad \text{first pole если больше second то делается равным}$$

$$f_{p2} := F_{sw} \cdot 0.5 \text{ float}, 3 \rightarrow 80000.0 \quad \text{second pole}$$

Строим передаточную функцию разомкнутой системы (plant) [slva301.pdf](#) стр.11

$$a_1 := C \cdot ESR \quad b_0 := \frac{R_L}{R_n}$$

$$b_1 := \frac{L}{R_n} + ESR \cdot C + R_L \cdot C + \frac{R_L \cdot ESR \cdot C}{R_n} \quad b_2 := \frac{R_n + ESR}{R_n} \cdot L \cdot C$$

$$\underline{H}(s) := \frac{1 + a_1 \cdot s}{1 + b_0 + s \cdot b_1 + s^2 \cdot b_2} \cdot \frac{V_{in}}{V_{ramp}}$$

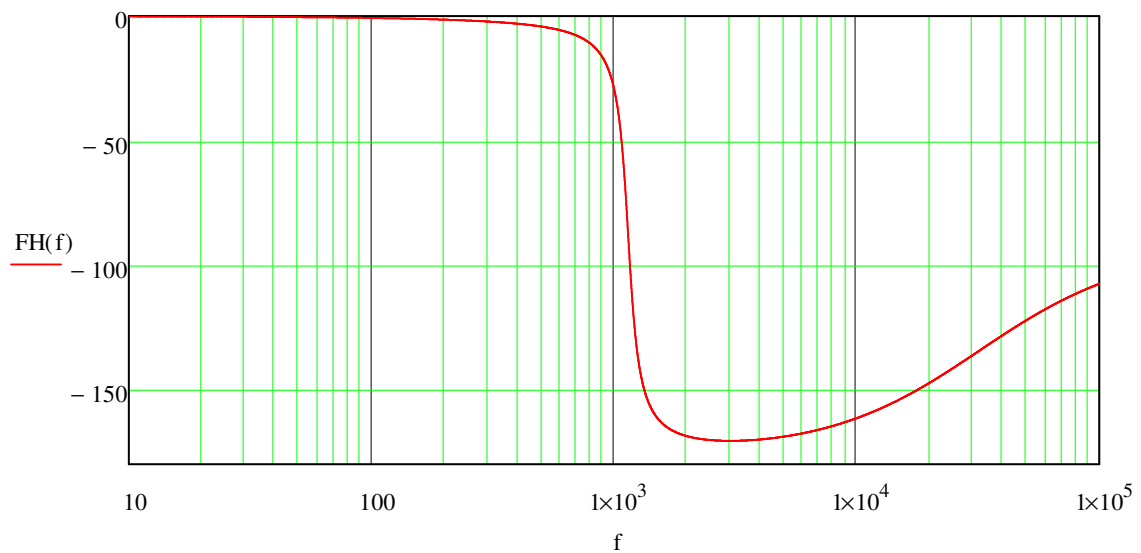
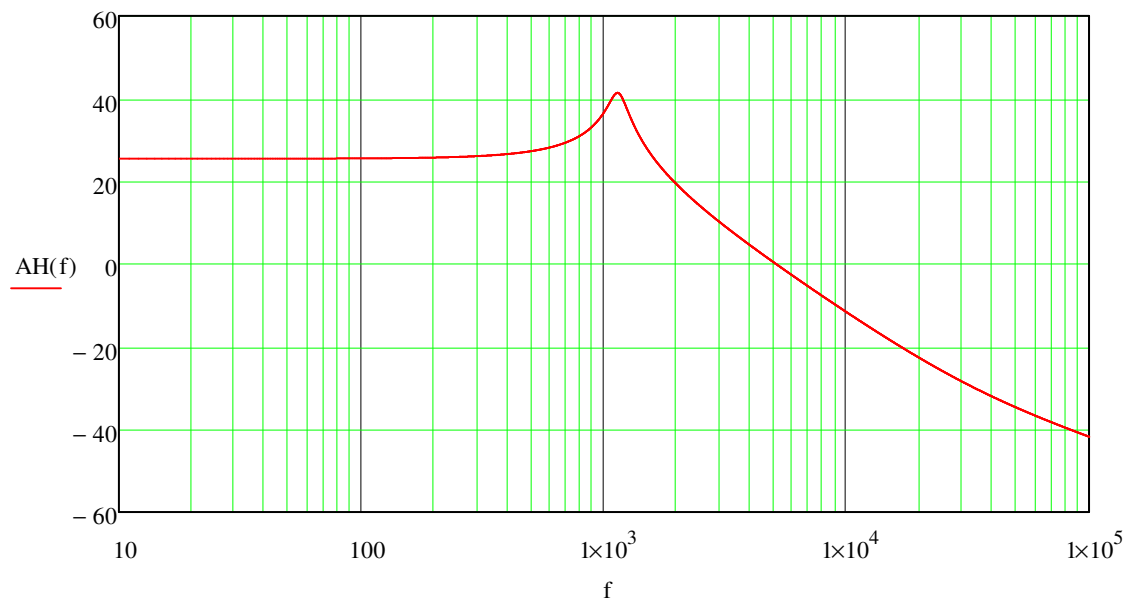
АЧХ

ФЧХ

$$A_H(f) := 20 \cdot \log(|H(f \cdot \sqrt{-1} \cdot 2 \cdot \pi)|) \quad F_H(f) := \arg(H(f \cdot \sqrt{-1} \cdot 2 \cdot \pi)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$f := 10, 11.. 100000$$

$$F_H(F_x) = -152.47$$



значение ФЧХ в точке F_x скорректированной системы т.е. то что нужно получить

$$\arg C := -180 + \varphi_m \text{ float}, 3 \rightarrow -110.0$$

значение ФЧХ в точке F_x разомкнутой системы

$$FH(F_x) = -152.47$$

Полус fp_0 уменьшает фазу на 90 градусов, в итоге не скомпенсированное значение ФЧХ в точке F_x

$$\arg P := FH(F_x) - 90 \text{ float}, 3 \rightarrow -242.0$$

вычисленные полюс и ноль компенсируют следующее значение фазы

$$\text{boost1} := \left(\text{atan}\left(\frac{F_x}{f_{z2}}\right) - \text{atan}\left(\frac{F_x}{f_{p2}}\right) \right) \cdot \frac{180}{\pi} \text{ float}, 3 \rightarrow 74.6$$

осталось скомпенсировать следующее значение фазы

$$\text{boost2} := \arg C - \arg P - \text{boost1} \text{ float}, 3 \rightarrow 57.4$$

см. формулу для boost1, так находится превышение фазы, еще один полюс нам известен, нужно найти ноль и значение компенсации известно, выражаем второй ноль см выражение справа

$$\text{fz1} := \frac{F_x}{\tan\left(\text{boost2} \cdot \frac{\pi}{180} + \text{atan}\left(\frac{F_x}{\text{fp1}}\right)\right)} \text{ float}, 3 \rightarrow 1605.0$$

Осталось найти главный полюс компенсатора, см. справа формула. По сути это коэффициент усиления компенсатора Принимаем главный полюс = 1 и находим передаточную функцию замкнутой системы H1

$$\underline{H1(s)} := H(s) \cdot \frac{\left(\frac{s}{\text{fz1} \cdot 2 \cdot \pi} + 1\right) \cdot \left(\frac{s}{\text{fz2} \cdot 2 \cdot \pi} + 1\right)}{\left(\frac{s}{\text{fp1} \cdot 2 \cdot \pi} + 1\right) \cdot \left(\frac{s}{\text{fp2} \cdot 2 \cdot \pi} + 1\right) \cdot s}$$

По передаточной функции замкнутой системы мы находим усиление системы в точке Fx, т.к. это точка пересечения и в ней усиление должно быть 1, то главный полюс это значение обратное этому усилению

$$\text{fp0} := \frac{1}{2\pi |H1(F_x \cdot \sqrt{-1} \cdot 2 \cdot \pi)| \cdot K_d} \text{ float}, 3 \rightarrow 30958.0$$

Передаточная функция скорректированной замкнутой системы

$$H_C(s) := H1(s) \cdot \text{fp0} \cdot 2 \cdot \pi \cdot K_d$$

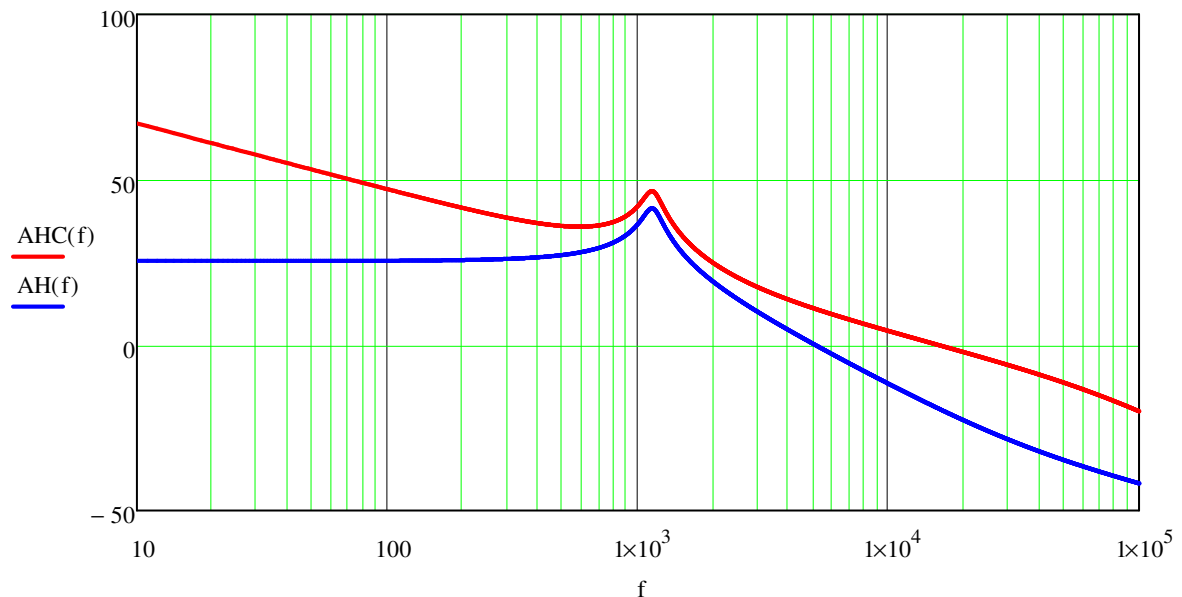
АЧХ

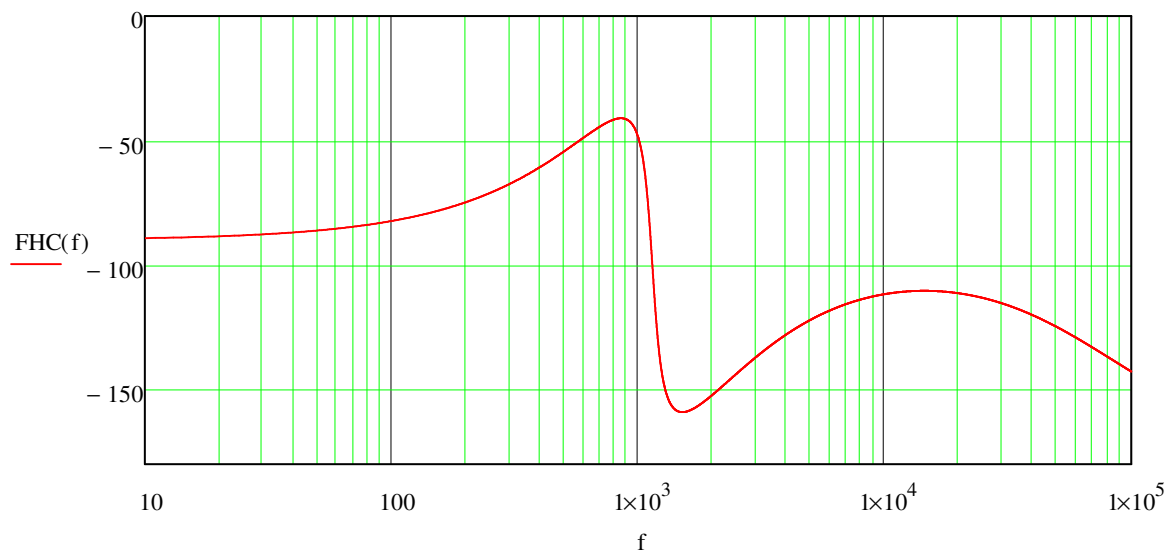
ФЧХ

$$A_{HC}(f) := 20 \cdot \log(|H_C(f \cdot \sqrt{-1} \cdot 2 \cdot \pi)|) \quad F_{HC}(f) := \arg(H_C(f \cdot \sqrt{-1} \cdot 2 \cdot \pi)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

Запас устойчивости определяем на частоте ШИМ, выше система неустойчива. минимальный запас 7дб, хорошее значение более 10дб

$$A_{HC}(F_{sw}) \text{ float}, 3 \rightarrow -26.9$$





Расчет резисторов

Верхний резистор делителя

$$R1 := 4.7 \cdot 10^3$$

Конденсатор последовательно с резистором, которые параллельно R1

$$\frac{fp2 - fz2}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot fp2 \cdot fz2} = 2.924 \times 10^{-8} \quad C2$$

$$C2 := 33 \cdot 10^{-9}$$

Резистор последовательно с C2

$$\frac{R1 \cdot fz2}{fp2 - fz2} = 68.034 \quad R3$$

$$R3 := 68$$

Конденсатор последовательно с резистором в ОС

$$\frac{fp1 - fz1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot fp0 \cdot fp1} \text{ float, 4 } \rightarrow 1.038e-9 \quad C1$$

$$C1 := 1000 \cdot 10^{-12}$$

Конденсатор в цепи ОС

$$\frac{fz1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot fp0 \cdot fp1} \text{ float, 4 } \rightarrow 5.56e-11 \quad C3$$

$$C3 := 56 \cdot 10^{-12}$$

Резистор последовательно C1

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{z1} \cdot C1} \text{ float, 4 } \rightarrow 99161.0 \quad R2$$

$$R2 := 100 \cdot 10^3$$

