

Расчет частотной компенсации 3-й тип для цифрового регулятора

$$\begin{aligned} L &:= 35 \cdot 10^{-6} & F_{sw} &:= 140000 & R_L &:= 7 \cdot 10^{-3} & N_{adc} &:= 2^{16} \\ C &:= 330 \cdot 10^{-6} & N_{pwm} &:= 32914 & R_n &:= 1.5 & K_{adc} &:= 0.25 \\ ESR &:= 20 \cdot 10^{-3} & V_{in} &:= 12 & & & V_{ref} &:= 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_x &:= 7000 & \text{частота кроссовера} & & N_{pwm} & \text{ - модуль счета ШИМ} \\ \varphi_z &:= 50 & \text{запас по фазе} & & N_{adc} & \text{ - разрешение АЦП} \\ & & & & K_{adc} & \text{ - делитель на входе АЦП} \\ & & & & V_{ref} & \text{ - опорное напряжение АЦП} \end{aligned}$$

$$F_s := 70000 \quad \text{частота сэмплирования АЦП}$$

$$T_s := \frac{1}{F_s}$$

$$T_c := 0.1 \cdot T_s \quad \text{время вычисления компенсатора и пр}$$

Суммарная задержка из-за АЦП и вычислений

$$T_z := 0.5 \cdot \frac{1}{F_{sw}} + T_c \text{ float}, 3 \rightarrow 0.000005$$

Если выборки АЦП не синхронизированны с ШИМ, то к задержке на расчет регулятора и работу АЦП добавляется половина периода ШИМ.

T_z - это полная задержка от выборки АЦП до переднего фронта импульса ШИМ в программе biricha считается что АЦП и ШИМ не синхронизированы и половина периода шим учитывается даже если задано значение запаздывания 0

Запас по фазе с учетом запаздывания, по сути мы увеличиваем требуемый запас по фазе на величину задержки, для аналогового регулятора так можно учесть задержку в драйвере ИШИМ и на включение транзистора

$$\varphi_m := \varphi_z + 360 \cdot F_x \cdot T_z \text{ float}, 3 \rightarrow 62.6$$

ноль в точке резонанса LC

$$f_{z2} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ float}, 5 \rightarrow 1480.9 \quad \text{second zero}$$

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

$$f_{p1} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot ESR \cdot C} \text{ float}, 3 \rightarrow 24114.0 \quad \text{first pole если больше second то делается равным second pole}$$

$$f_{p2} := F_{sw} \cdot 0.5 \text{ float}, 3 \rightarrow 70000.0 \quad \text{second pole}$$

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

$$a1 := C \cdot ESR \quad b0 := \frac{RL}{Rn}$$

$$b1 := \frac{L}{Rn} + ESR \cdot C + RL \cdot C + \frac{RL \cdot ESR \cdot C}{Rn} \quad b2 := \frac{Rn + ESR}{Rn} \cdot L \cdot C$$

$$H(s) := \frac{1 + a1 \cdot s}{1 + b0 + s \cdot b1 + s^2 \cdot b2} \cdot Vin$$

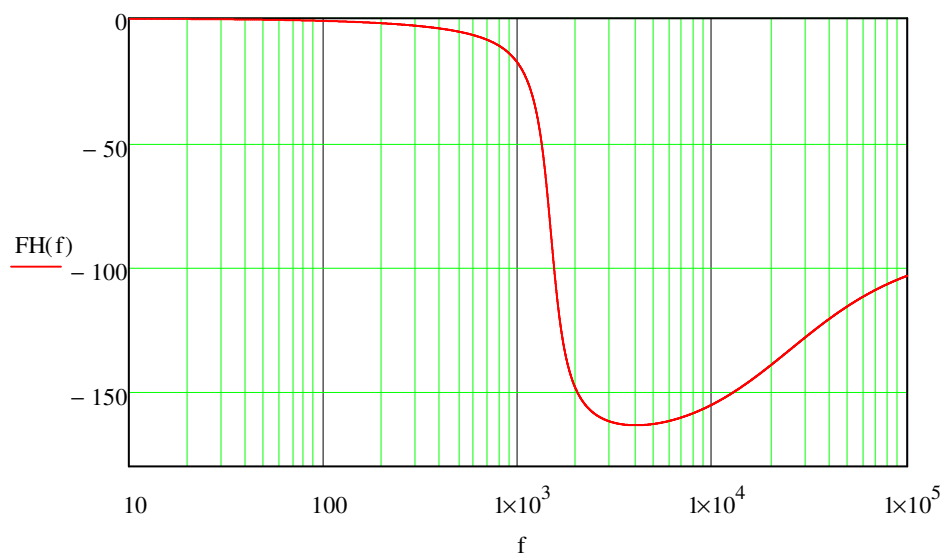
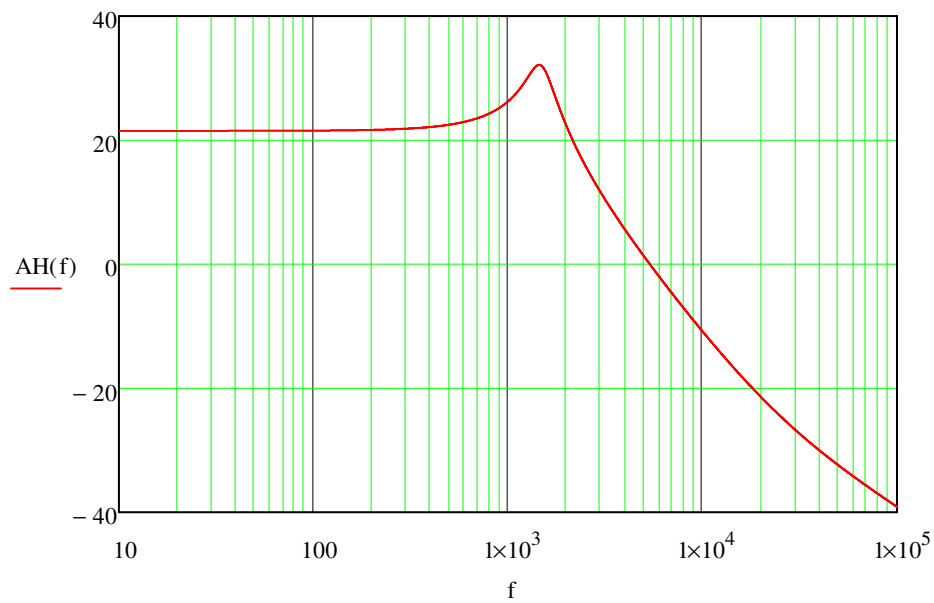
АЧХ

ФЧХ

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

$$f := 10, 11 \dots 100000$$

$$FH(Fx) = -160.059$$



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

$$\arg C := -180 + \varphi_m \text{ float}, 3 \rightarrow -117.0$$

значение ФЧХ в точке F_x разомкнутой системы

$$FH(F_x) = -160.059$$

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

$$\arg P := FH(F_x) - 90 \text{ float}, 3 \rightarrow -250.0$$

вычисленные полюс и ноль компенсируют следующее значение фазы

$$\text{boost1} := \left(\operatorname{atan}\left(\frac{F_x}{fz2}\right) - \operatorname{atan}\left(\frac{F_x}{fp2}\right) \right) \cdot \frac{180}{\pi} \text{ float}, 3 \rightarrow 72.3$$

осталось скомпенсировать следующее значение фазы

$$\text{boost2} := \arg C - \arg P - \text{boost1} \text{ float}, 3 \rightarrow 60.7$$

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

$$fz1 := \frac{F_x}{\tan\left(\text{boost2} \cdot \frac{\pi}{180} + \operatorname{atan}\left(\frac{F_x}{fp1}\right)\right)} \text{ float}, 3 \rightarrow 1630.0$$

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

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

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

$$fp0 := \frac{1}{2\pi |H1(F_x \cdot \sqrt{-1} \cdot 2 \cdot \pi)|} \text{ float}, 3 \rightarrow 597.0$$

Передаточная функция скорректированной замкнутой системы

$$HC(s) := H1(s) \cdot f_{p0} \cdot 2 \cdot \pi$$

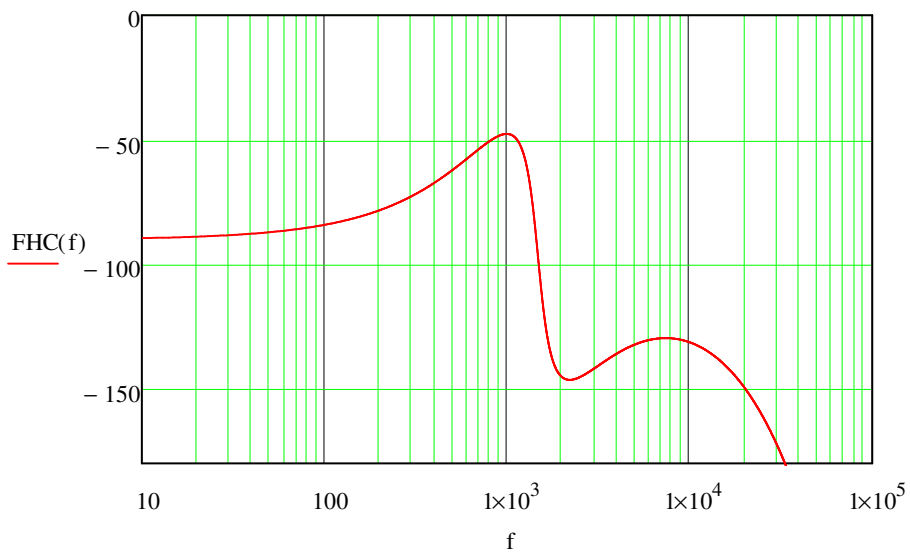
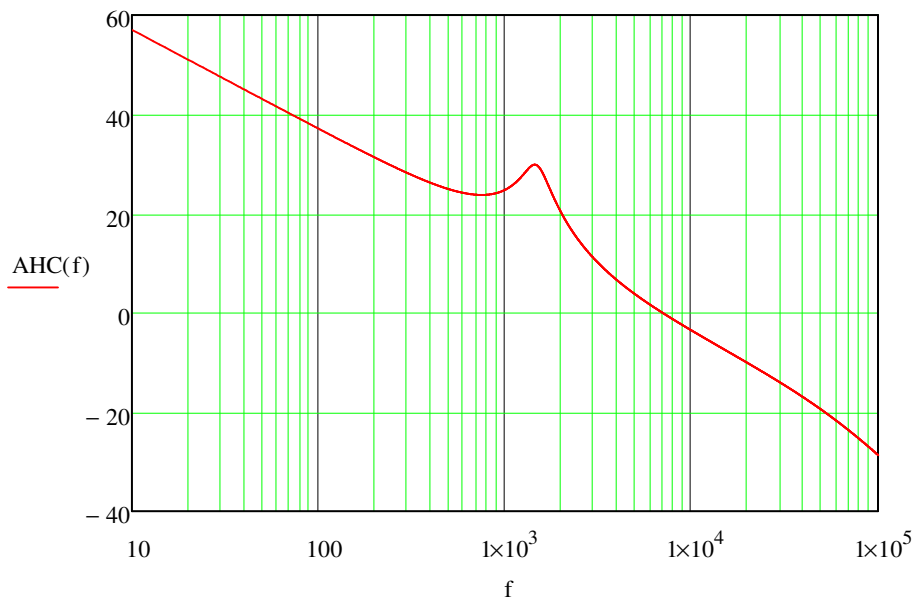
АЧХ

ФЧХ

$$AHC(f) := 20 \cdot \log(|HC(f \cdot \sqrt{-1} \cdot 2 \cdot \pi)|) \quad FHC(f) := \arg(HC(f \cdot \sqrt{-1} \cdot 2 \cdot \pi)) \cdot \frac{180}{\pi} - 360 \cdot f \cdot Tz$$

Запас устойчивости определяем по АЧХ при частоте где ФЧХ пересекает 180 градусов или на частоте ШИМ если она меньше, выше система неустойчива. минимальный запас 7дб, хорошее значение более 10дб

$$AHC(F_{sw}) \text{ float}, 3 \rightarrow -33.8$$



Коэффициенты компенсатора, частота в формулах в Гц

$$A1 := -\frac{-12 + Ts^2 \cdot (2 \cdot \pi)^2 \cdot fp1 \cdot fp2 - 2 \cdot Ts \cdot 2 \cdot \pi (fp1 + fp2)}{(2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp1) \cdot (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp2)} \rightarrow 0.44341295146841902726$$

$$A2 := \frac{-12 + Ts^2 \cdot (2 \cdot \pi)^2 \cdot fp1 \cdot fp2 + 2 \cdot Ts \cdot 2 \cdot \pi (fp1 + fp2)}{(2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp1) \cdot (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp2)} \rightarrow 0.53616542340278868105$$

$$A3 := \frac{(-2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp1) \cdot (-2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp2)}{(2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp1) \cdot (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp2)} \rightarrow 0.02042162512879229169$$

$$B0 := \frac{Ts \cdot (2 \cdot \pi)^3 \cdot fp0 \cdot fp1 \cdot fp2 \cdot (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fz1) \cdot (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fz2)}{2 \cdot (2 \cdot \pi)^2 \cdot fz1 \cdot fz2 (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp1) \cdot (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp2)} \rightarrow 2.48651473666666813471$$

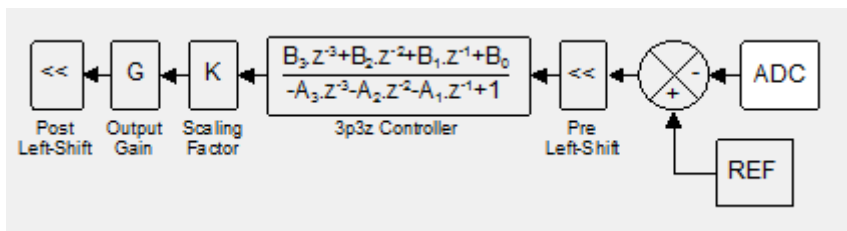
$$B1 := \frac{Ts \cdot (2 \cdot \pi)^3 \cdot fp0 \cdot fp1 \cdot fp2 \cdot [-4 + 3 \cdot Ts^2 \cdot (2 \cdot \pi)^2 \cdot fz1 \cdot fz2 + 2 \cdot Ts \cdot 2 \cdot \pi (fz1 + fz2)]}{2 \cdot (2 \cdot \pi)^2 \cdot fz1 \cdot fz2 (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp1) \cdot (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp2)} \rightarrow -1.837593414168329775$$

$$B2 := \frac{Ts \cdot (2 \cdot \pi)^3 \cdot fp0 \cdot fp1 \cdot fp2 \cdot [-4 + 3 \cdot Ts^2 \cdot (2 \cdot \pi)^2 \cdot fz1 \cdot fz2 - 2 \cdot Ts \cdot 2 \cdot \pi (fz1 + fz2)]}{2 \cdot (2 \cdot \pi)^2 \cdot fz1 \cdot fz2 (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp1) \cdot (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp2)} \rightarrow -2.4442614743566837621$$

$$B3 := \frac{Ts \cdot (2 \cdot \pi)^3 \cdot fp0 \cdot fp1 \cdot fp2 \cdot (-2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fz1) \cdot (-2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fz2)}{2 \cdot (2 \cdot \pi)^2 \cdot fz1 \cdot fz2 (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp1) \cdot (2 + Ts \cdot 2 \cdot \pi \cdot fp2)} \rightarrow 1.87984667647832736$$

$$K_{\text{N}} := \text{Npwm} \cdot \frac{V_{\text{ref}}}{N_{\text{adc}} \cdot K_{\text{adc}}} \rightarrow 6.0267333984375$$

Предполагается что задание на регулятор выдается приведенное к АЦП т.е. не в вольтах а в относительных единицах АЦП с учетом разрядности и входного делителя



Разностное уравнение для реализации на C/C++

$$y[z] = A_1y[n-1] + A_2y[n-2] + A_3y[n-3] + B_0x[n] + B_1x[n-1] + B_2x[n-2] + B_3x[n-3]$$

здесь y это результаты расчета предыдущих шагов, а x это результаты ошибки (входа регулятора) от предыдущих шагов. n - текущий шаг, n-1 - предыдущий шаг и т.д.