

1. Исходные данные.

$V_{IN} = 340 \text{ V}$ – размах на первичной обмотке силового трансформатора, выпрямленное напряжение сети.

170 V – амплитуда, половина (на конденсаторе полумоста).

$V_{trans} = 32,4 \text{ V}$ – амплитуда напряжения с силового трансформатора.

$64,8 \text{ V}$ – размах на вторичной обмотке силового трансформатора. $31,65 \text{ кГц}$.

$$K_{tr} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{V_{trans}}{V_{IN}} = \frac{64,8}{340} = 0.1906.$$

$V_{RAMP} = 3,2 \text{ V}$; $62,89 \text{ кГц}$ – амплитуда пилообразного напряжения. Вывод 5 C_T

$F_{SW} = 31,65 \text{ кГц}$ – частота переключения. = **32 кГц**

Дроссель фильтра.

$L = 166 \text{ мГн}$ Измерено мультиметром.

Z-Meter Измерено программой.

$L = 173 \text{ мГн}$

$R = 480 \text{ мОм}$

$T_g = 0.046$

Конденсатор фильтра.

$C_{OUT} = 1000 \text{ мФ}$

$R_{ESR} = 80 \text{ мОм}$

Z-Meter

$L_x = 86.66 \text{ нГн}$

$R_{esr} = 51.68 \text{ мОм} = 52 \text{ мОм}$

$T_g = 1.6$

Резонансная частота = 9500 Гц .

$R_{load} = 1 \text{ Ом}$

$V_{OUT} = 24 \text{ V}$

Усиление модулятора PWM

$$K_{pwm} = 1/V_{peak} = 1/3.2V = 0.3125$$

$V_{ref} = 5V$

Параметры модели ключа $L = 75 \mu\text{H}$? см. стр. 165 нижний абзац.

1. Приведение напряжения питания ко вторичной стороне (коэффициент трансформации) В моей схеме – $32,4V$ (амплитуда на дросселе, после ключа, следовательно и на ключе – то же.)
2. Ключ PWMVM_Avg модель В. Ворпериана.
3. Повышение напряжения питания сдвигает АЧХ силового каскада вверх.
4. Параметры усилителя ошибки ?
5. Индуктивности обмоток трансформатора.
6. Какая АФЧХ модели усилителя AMPSIMP в Micro-Cap?
7. $K = 95\text{dB} = 56234$

Вопросы:

1. **Коэффициент усиления усилителя ошибки? R_{cl} ?? Полоса пропускания.**

Расчет по slup340.

1. Силовой каскад.

Коэффициент усиления ШИМ-модулятора:

$$A_{VC} = \frac{dv_{OUT}}{dv_c} = \frac{d}{dv_c} \cdot \left(v_{IN} \cdot \frac{v_c}{v_{RAMP}} \right) = \frac{V_{IN}}{V_{RAMP}} Ktr = \frac{340}{3,2} \cdot 0,1906 = \mathbf{20.25 \text{ dB}}$$

$$\omega = 2\pi f \quad f = \frac{\omega}{2\pi}$$

Комплексно сопряженный полюс характеристики выходного LC-фильтра:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_{OUT}}} = \frac{1}{\sqrt{0,000173 \cdot 0,001}} = 2404 \text{ рад/с}$$

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{2404}{2 \cdot 3,1416} = 382 \text{ Гц}$$

Ноль ESR выходного конденсатора:

$$\omega_Z = \frac{1}{R_{ESR} \cdot C_{OUT}} = \frac{1}{0,052 \cdot 0,001} = 19231 \text{ рад/с}$$

$$f_Z = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{19231}{6,2832} = 3061 \text{ Гц}$$

Добротность Q:

$$Q_0 = \frac{R_{OUT}}{\sqrt{\frac{L}{C_{OUT}}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{0,000173}{0,001}}} = 2,4$$

Выбираю полосу пропускания системы 10% от частоты переключения

$$f_c = 3,2 \text{ кГц.}$$

$$\omega_c = 2\pi f_c = 6,2832 \cdot 3200 = 20106 \text{ рад/с}$$

Коэффициент усиления по напряжению в средней полосе:

$$A_{VM} = \frac{\omega_c}{A_{VC} \cdot \omega_0} = \frac{20106}{20,25 \cdot 2404} = \frac{20106}{48681} = 0,413$$

2. Компенсация ОС по напряжению.

Компенсатор Типа III.

Выбираю величину R_{FBT} из диапазона от 2 кΩ до 200 кΩ :

$$R_{FBT} = 100 \text{ кΩ}$$

Коэффициент усиления по напряжению в средней полосе:

$$R_{COMP} = A_{VM} \times R_{FBT} = 0,413 \times 100000 = 41301 \text{ Ω.}$$

Комплексно сопряженный полюс характеристики выходного LC-фильтра:

$$\omega_{ZEA} = \omega_{FZ} = \omega_0 = 2404 \text{ рад/с.}$$

Ноль ESR выходного конденсатора:

$$\omega_{FP} = \omega_Z = 19231 \text{ рад/с.}$$

$$\omega_{HF} = 2\pi f_{SW}/2 = 6.2832 \cdot 32000/2 = 100531 \text{ рад/с.}$$

$$C_{FF} = \frac{1}{\omega_{FZ} \cdot R_{FBT}} = \frac{1}{2404 \cdot 100000} = \frac{1}{240400000} = 4.16 \cdot 10^{-9} F = 0.00416 \mu F = 4.16 nF$$

$$C_{COMP} = \frac{1}{\omega_{ZEA} \cdot R_{COM}} = \frac{1}{2404 \cdot 41301} = \frac{1}{99287604} = 1 \cdot 10^{-8} F = 0.01 \mu F = 10 nF$$

$$C_{HF} = \frac{1}{\omega_{HF} \cdot R_{COM}} = \frac{1}{100531 \cdot 41301} = \frac{1}{4152030831} = 2.41 \cdot 10^{-10} F = 0.000241 \mu F = 241 pF$$

$$\omega_{FP} = \frac{1}{R_{FF} \cdot C_{FF}}$$

$$R_{FF} = \frac{1}{\omega_{FP} \cdot C_{FF}} = \frac{1}{19231 \cdot 4.16 \times 10^{-9}} = 12500 \text{ Ом.}$$

Расчет по AN-1162

$$V_{IN} = 32.4 \text{ V}$$

$$V_{OUT} = 12 \text{ V}$$

$$V_{IN} = 340 \text{ V}$$

$$V_{OUT} = 24 \text{ V}$$

$$R_{OUT} = 2 \text{ Ом}$$

$$I_{OUT} = 12 \text{ A}$$

$$L_O = 173 \text{ мГн}$$

$$C_O = 1000 \text{ мкФ}$$

$$R_{ESR} = 52 \text{ мОм}$$

$$F_{SW} = 32 \text{ кГц} - \text{частота переключения.}$$

$$V_{OSC} = 3.2 \text{ V}$$

Передаточная функция силового каскада – это система второго порядка с двойным полюсом на частоте резонанса (LC фильтр) и нулем, образуемым ESR выходного конденсатора.

Частота двойного полюса (резонанса LC фильтра) (3):

$$F_{LC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_O \cdot C_O}} = \frac{1}{2 \cdot 3.1416 \cdot \sqrt{173 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 10^{-6}}} = \frac{1}{6.2832 \cdot 4.16 \cdot 10^{-4}} = 382 \text{ Hz}$$

Частота нуля ESR (4):

$$F_{ESR} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot ESR \cdot C_O} = \frac{1}{2 \cdot 3.1416 \cdot 52 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 10^{-6}} = 3061 \text{ Hz}$$

Принимаю

$$A_{VC} = \frac{dv_{OUT}}{dv_c} = \frac{d}{dv_c} \cdot \left(v_{IN} \cdot \frac{v_c}{v_{RAMP}} \right) = \frac{V_{IN}}{V_{RAMP}} K_{tr} = \frac{340}{3.2} 0.1906 = 20.25 \text{ dB}$$

$$F_S/2 = 32000/2 = 16000 \text{ Hz}$$

Принимаю

Полоса пропускания (частота пересечения нуля)

$$F_0 = (1/10 \sim 1/5) F_S = (1/10 \sim 1/5) 32000 = 3200 \sim 6400 \text{ Hz}$$

$$F_0 = 3200 \text{ Hz} \text{ Для ОС по напряжению.}$$

$$F_0 = 6400 \text{ Hz} \text{ Для ОС по току.}$$

$$F_{LC} < F_{ESR} < F_0 < F_S/2$$

$$382 \text{ Hz} < 3061 \text{ Hz} < (3200 \sim 6400 \text{ Hz}) < 16000 \text{ Hz}$$

Компенсатор Типа III-A.

ОС по напряжению.

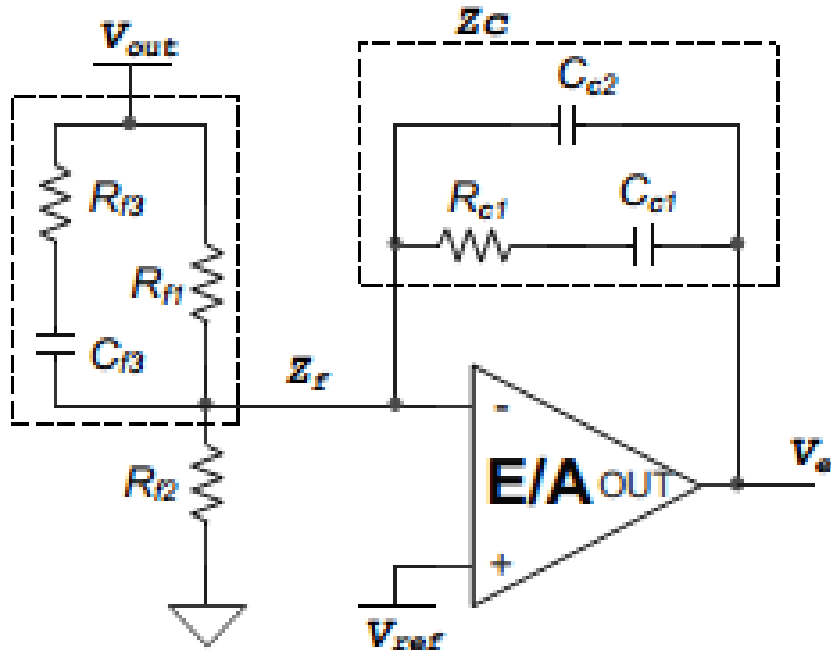
Принимаю

$$F_0 = 3200 \text{ Hz} - \text{Полоса пропускания}$$

$$F_{LC} = 382 \text{ Гц}$$

$$F_{ESR} = 3061 \text{ Гц}$$

$$F_{LC} < F_{ESR} < F_0 < F_S/2$$



$$\begin{aligned}
 F_{p1} &= 0 \text{ Hz} \\
 F_{Z1} &= 0.75F_{Z2} = 0.75 \cdot 382 = 286.5 \text{ Hz} \\
 F_{Z2} &= F_{LC} = 382 \text{ Hz} \\
 F_{p2} &= F_{ESR} = 3061 \text{ Hz} \\
 F_{p3} &= F_S/2 = 16000 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

$$C_{f3} = 2.2 \text{ nF}$$

$$R_{f3} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{f3} \cdot F_{p2}} = \frac{1}{2\pi \cdot 2.2 \times 10^{-9} \cdot 3061} = 236340 \text{ ohm} = 23.6 \text{ kOhm}$$

$$R_{f1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{f3} \cdot F_{Z2}} - R_{f3} = \frac{1}{2\pi \cdot 2.2 \times 10^{-9} \cdot 382} - 23634 = 165746 \text{ ohm} = 165.7 \text{ kOhm}$$

$$R_{f2} = \frac{R_{f1} \cdot V_{ref}}{(V_{OUT} - V_{REF})} = \frac{165700 \cdot 2.5}{12 - 2.5} = \frac{414250}{9.5} = 43605 \text{ ohm} = 43.6 \text{ kOhm}$$

$$R_{C1} = \frac{2\pi \cdot F_0 \cdot L_0 \cdot C_0 \cdot V_{osc}}{V_{in} \cdot C_{f3}} = \frac{2\pi \cdot 3200 \cdot 173 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 10^{-6} \cdot 3.2}{32.4 \cdot 2.2 \times 10^{-9}} = \frac{0.011130814464}{0.00000007128} = 156156 \text{ ohm} = 156.2 \text{ kOhm}$$

$$C_{C1} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{C1} \cdot F_{Z1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 156156 \cdot 286.5} = 3.557 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 3.6 \text{ nF}$$

$$C_{C2} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{C1} \cdot F_{p3}} = \frac{1}{2\pi \cdot 156156 \cdot 16000} = 6.37 \cdot 10^{-11} \text{ F} = 63.7 \text{ pF}$$

На модели в Micro-Cap хороший результат получается при:

$$V_{ref} = 2.5 \text{ V}$$

$$R_{f1} = 100 \text{ k}$$

$$R_{f2} = 47 \text{ k}$$

$$R_{C1} = 150 \text{ k}$$

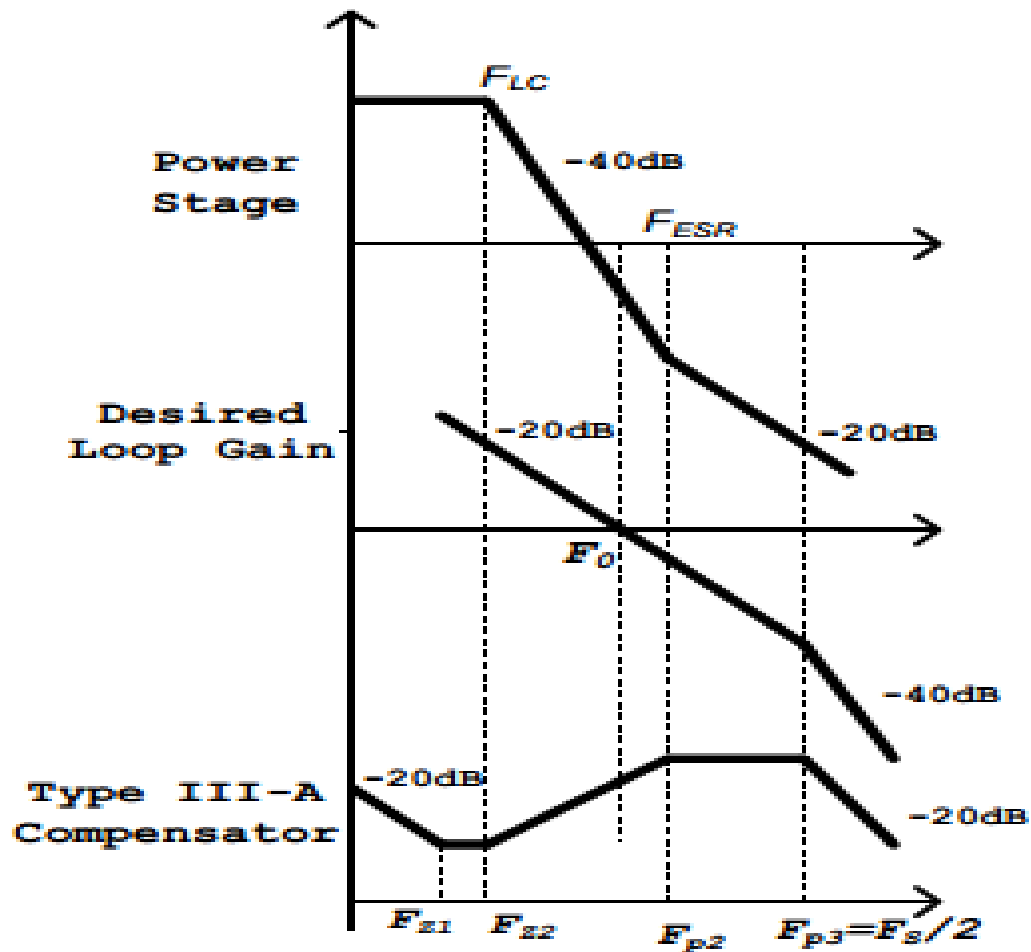
$$C_{C1} = 3.6 \text{ nF}$$

$$C_{C2} = 65 \text{ p}$$

$$R_{f3} = 15 \text{ k}$$

$$C_3 = 1.6 \text{ nF}$$

$F_0 = 3127 \text{ Hz}$ Для ОС по напряжению. Фаза = 51 град. Усиление при 10Hz = 53.4 dB.



Нужно еще проверить делитель ОС.

Элемент	Slup340	AN-1162	Micro-Cap		
$R3 = R_{FBT} = R_{f1}$	100k	165k7	100k		
$R2 = R_{FBB} = R_{f2}$	?	43k6	47k		
$R4 = R_{COMP} = R_{C1}$	41k3	156k2	150k		
$C3 = C_{COMP} = C_{C1}$	10n	3n6	3n6		
$C2 = C_{HF} = C_{C2}$	241p	63p7	65p		
$R6 = R_{FF} = R_{f3}$	12k5	23k6	15k		
$C5 = C_{FF} = C_{f3}$	4n16	2n2	1n6		

Компенсатор Типа III-A.

ОС по току.

Принимаю

$F_0 = 6400 \text{ Hz}$ Для ОС по току.

$$F_{p1} = 0 \text{ Hz}$$

$$F_{z1} = 0.75F_{z2} = 0.75 \cdot 382 = 286.5 \text{ Hz}$$

$$F_{z2} = F_{LC} = 382 \text{ Hz}$$

$$F_{p2} = F_{ESR} = 3061 \text{ Hz}$$

$$F_{P3} = F_S/2 = 16000 \text{ Hz}$$

$$C_{f3} = 2.2 \text{ nF}$$

$$R_{f3} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{f3} \cdot F_{P2}} = \frac{1}{2\pi \cdot 2.2 \times 10^{-9} \cdot 3061} = 236340 \text{ Ohm} = 23.6 \text{ kOhm}$$

$$R_{f1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{f3} \cdot F_{Z2}} - R_{f3} = \frac{1}{2\pi \cdot 2.2 \times 10^{-9} \cdot 382} - 23634 = 165746 \text{ Ohm} = 165.7 \text{ kOhm}$$

$$R_{f1} = 2 \text{ Ohm} ???$$

$$R_{f2} = \frac{R_{f1} \cdot V_{ref}}{(V_{OUT} - V_{REF})} = \frac{165700 \cdot 2.5}{12 - 2.5} = \frac{414250}{9.5} = 43605 \text{ Ohm} = 43.6 \text{ kOhm}$$

$$R_{f2} = 0.01 \text{ Ohm}$$

$$R_{C1} = \frac{2\pi \cdot F_0 \cdot L_0 \cdot C_0 \cdot V_{osc}}{V_{in} \cdot C_{f3}} = \frac{2\pi \cdot 6400 \cdot 173 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 10^{-6} \cdot 3.2}{32.4 \cdot 2.2 \times 10^{-9}} = \frac{0,022261628928}{0,00000007128} = 312312 \text{ Ohm} = 312 \text{ kOhm}$$

$$C_{C1} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{C1} \cdot F_{Z1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 312312 \cdot 286.5} = 1.7787 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 1.8 \text{ nF}$$

$$C_{C2} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{C1} \cdot F_{P3}} = \frac{1}{2\pi \cdot 312312 \cdot 16000} = 3.185 \cdot 10^{-11} \text{ F} = 31.85 \text{ pF}$$

$$F_{Z1} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{C1} \cdot C_{C1}} \quad (23)$$

$$F_{Z1} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{C1} \cdot C_{C1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 312312 \cdot 1,8 \cdot 10^{-9}} = 283 \text{ Hz}$$

$$F_{Z2} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{f3} \cdot (R_{f1} + R_{f3})} \quad (24)$$

$$F_{Z2} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{f3} \cdot (R_{f1} + R_{f3})} = \frac{1}{2\pi \cdot 2,2 \cdot 10^{-9} \cdot (2 + 23,6 \cdot 10^3)} = 3065 \text{ Hz}$$

Или (в других документах): ????

$$F_{Z2} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{f3} \cdot R_{f1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 2} = 36171577,98 \text{ Hz} = 36171,6 \text{ kHz} = 36.2 \text{ MHz}$$

$$F_{P1} = 0 \quad (25)$$

$$F_{P1} = 0 \text{ Hz}$$

$$F_{p2} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{f3} \cdot R_{f3}} \quad (26)$$

$$F_{p2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{f3} \cdot R_{f3}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 23,6 \cdot 10^3} = 3065 \text{ Hz}$$

$$F_{p3} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{c1} \cdot C_{c2}} \quad (27)$$

$$F_{p3} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{c1} \cdot C_{c2}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 312 \cdot 10^3 \cdot 31,85 \cdot 10^{-12}} = 16016 \text{ Hz}$$

Измерительная цепь ОС по току подсмотрена в "Designing Control Loops for Linear and Switching Power Supplies. A Tutorial Guide" Christophe Basso

Параграф

5.5.10 Optocoupler and Op Amp: A Dual-Loop Approach in CC-CV Applications стр. 359

$$R_{\text{sense}} = 0.01 \Omega$$

$$V_{\text{ref}} = 2.5 \text{ V}$$

$$I_{\text{out}} = 10 \text{ A}$$

$$I_{\text{out}} = V_{\text{ref}} \frac{R_a}{R_{\text{sense}} \cdot R_b}$$

$$\frac{R_a}{R_{\text{sense}} \cdot R_b} = \frac{I_{\text{out}}}{V_{\text{ref}}} = \frac{10}{2.5} = 4$$

$$\frac{R_a}{0.01 \cdot R_b} = 4$$

Принимаю $R_a = 1 \text{ k}\Omega$

$$R_b = \frac{R_a}{4 \cdot R_{\text{sense}}} = \frac{1000}{4 \cdot 0.01} = 25000 = 25 \text{ k}\Omega$$