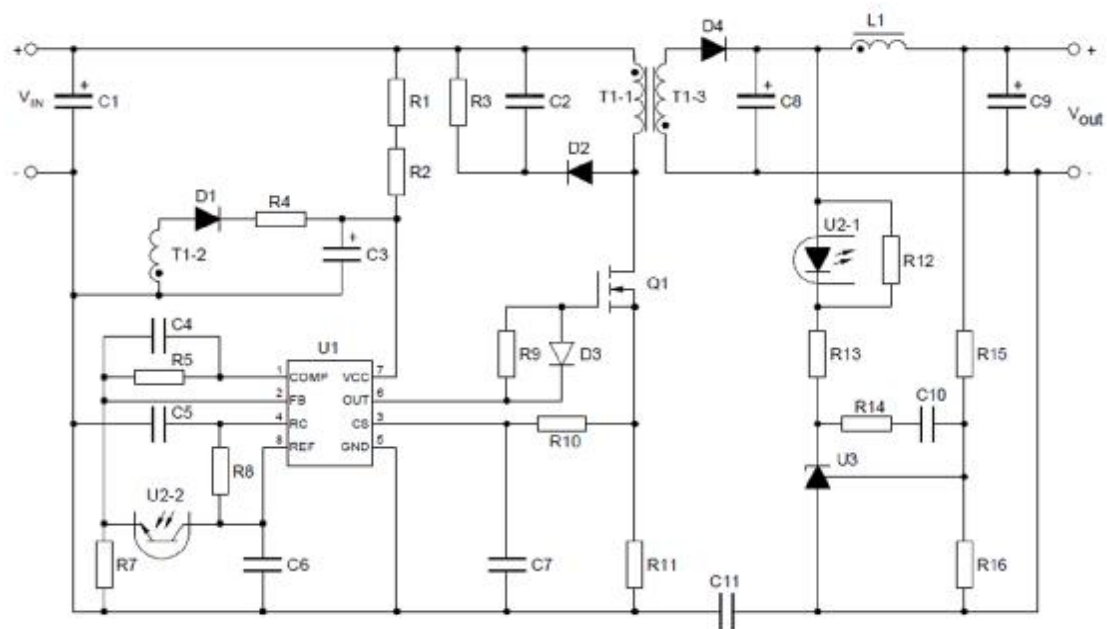


Расчет обратножодового преобразователя flyback



Исходные данные

Диапазон входных напряжений AC

$$V_{ac_min} := 110$$

$$V_{ac_max} := 240$$

Минимальное рабочее напряжение AC

$$V_{ac_w} := 100$$

Выходное напряжение DC

$$V_{out} := 12$$

Допустимые пульсации напряжения на выходе

$$V := 0.1$$

Максимальный выходной ток

$$I_{out} := 8$$

Частота преобразования

$$f := 100 \times 10^3$$

Максимальный коэффициент заполнения

$$D := 0.5$$

$$\text{КПД } 78\% \quad \text{КПД} := 0.78$$

Расчетные данные

Выпрямленное напряжение

$$V_{dc_min} := V_{ac_min} \times \sqrt{2} = 155.563$$

$$V_{dc_max} := V_{ac_max} \times \sqrt{2} = 339.411$$

Минимальное входное напряжение

$$V_{in_min} := V_{ac_w} \times \sqrt{2} = 141.421$$

Выходная мощность

$$P_{out} := V_{out} \times I_{out} = 96 \quad P_{max} := 1.2 \times P_{out} = 115.2$$

Входной конденсатор C1

$$C1 := \frac{P_{out} \times \left(1 + \frac{\arccos\left(\frac{V_{in_min}}{V_{dc_min}}\right)}{\left(V_{dc_min}^2 - V_{in_min}^2\right)} \right)}{\text{КПД} \times 50} = 6.662 \times 10^{-4}$$

Принимаем 2 электролитических конденсатора 330 мкФ 400 В

Выбор микросхемы контроллера

Выбираем микросхему UC3844

Частотообразующие элементы C5 и R8

Так как по даташиту для этой микросхемы используется каждый второй цикл, то задавшись значением

$$R_{t_p} := 25000$$

используем формулу $f = 1.8 / (C_T \times R_T)$

$$C_t := \frac{1.8}{2 \times f \times R_{t_p}} = 3.6 \times 10^{-10}$$

Принимаем ближайшее значение емкости C5 := 330×10^{-12}

Уточняем

$$R_t := \frac{1.8}{2 \times f \times C5} = 2.727 \times 10^4$$

Принимаем ближайшее значение сопротивления R8 := 27×10^3

Уточняем номинальную частоту переключения $f_{nom} := \frac{1.8}{2 \times C5 \times R8} = 1.01 \times 10^5$

Максимальное сопротивление R8 R8_max := $R8 + R8 \times 0.01 = 2.727 \times 10^4$

Минимальное сопротивление R8 R8_min := $R8 - R8 \times 0.01 = 2.673 \times 10^4$

Максимальная емкость C5 $C5_{\max} := C5 + C5 \times 0.05 = 3.465 \times 10^{-10}$

Минимальная емкость C5 $C5_{\min} := C5 - C5 \times 0.05 = 3.135 \times 10^{-10}$

Максимальная частота переключения

$$f_{\max_p} := \frac{1.8}{2 \times C5_{\min} \times R8_{\min}} \quad f_{\max} := f_{\max_p} + f_{\max_p} \times 0.05 = 1.128 \times 10^5$$

Минимальная частота переключения

$$f_{\min_p} := \frac{1.8}{2 \times C5_{\max} \times R8_{\max}} = 9.525 \times 10^4 \quad f_{\min} := f_{\min_p} - f_{\min_p} \times 0.05 = 9.049 \times 10^4$$

Определяем период переключения

$$T_{\text{pet}} := 0.55 \times C5_{\max} \times R8_{\max} = 5.197 \times 10^{-6}$$

Определяем мертвое время (данные из даташита) $t_{\text{dead}} := T_{\text{pet}} - \left(\frac{1}{f}\right) = -4.803 \times 10^{-6}$

Берем коэффициент заполнения по даташиту $D_{\text{nom}} := 0.5$

Время $t_{\text{on}} := \frac{D_{\text{nom}}}{f_{\text{nom}}} = 4.95 \times 10^{-6}$ $t_{\text{off}} := \frac{(1 - D_{\text{nom}})}{f_{\text{nom}}} = 4.95 \times 10^{-6}$

$$t_{\text{on_min}} := t_{\text{on}} - t_{\text{on}} \times 0.05 = 4.703 \times 10^{-6}$$

Обратноходовой трансформатор

Индуктивность первичной обмотки $L_{\text{pri}} := \frac{(V_{\text{in_min}}^2 \times t_{\text{on_min}}^2 \times \text{КПД} \times f_{\text{min}})}{2 \times P_{\text{max}}} = 1.355 \times 10^{-4}$

Максимальный ток в первичной цепи $I_{\text{pri}} := \sqrt{\frac{(2 \times P_{\text{max}})}{\text{КПД} \times f_{\text{min}} \times L_{\text{pri}}}} = 4.909$

Среднеквадратичное значение тока $I_{\text{rms}} := I_{\text{pri}} \times \sqrt{\frac{D_{\text{nom}}}{3}} = 2.004$

Индуктивность вторичной обмотки $L_{\text{sec}} := \frac{[(V_{\text{out}} + 0.5) \times t_{\text{off}}^2 \times f_{\text{min}}]}{2 \times I_{\text{out}}} = 1.732 \times 10^{-6}$

Ток во вторичной обмотке $I_{\text{sec}} := \frac{[(V_{\text{out}} + 0.5) \times t_{\text{off}}]}{L_{\text{sec}}} = 35.722$

Коэффициент трансформации $k := \sqrt{\frac{L_{\text{pri}}}{L_{\text{sec}}}} = 8.844$

Напряжение на силовом ключе $V_{\text{ds}} := V_{\text{dc_max}} + (V_{\text{out}} + 0.5) \times k = 449.961$

Выбираем сердечник ETD39/20/13 из феррита N87 с зазором 0.5 мм

$$A_1 := 326 \times 10^{-9}$$

$$A_e := 125 \times 10^{-6}$$

Количество витков первичной обмотки

$$N1_{pre} := \sqrt{\frac{L_{pri}}{A_l}} = 20.386 \quad \text{Принимаем} \quad N1 := 20$$

Размах индукции в сердечнике

$$B_{max} := \frac{(V_{dc_min} \times t_{on})}{A_e \times N1} = 0.308 \quad \text{что меньше предельно допустимого для данного феррита}$$

Количество витков вторичной обмотки

$$N2_{pre} := \sqrt{\frac{L_{sec}}{A_l}} = 2.305 \quad \text{Принимаем} \quad N2 := 2$$

$$\text{Уточненный коэффициент трансформации} \quad k_{nom} := \frac{N1}{N2} = 10$$

Уточненное напряжение на силовом ключе

$$V_{ds_nom} := V_{dc_max} + (V_{out} + 0.5) \times k_{nom} = 464.411$$

$$\text{Номинальный ток в первичной цепи} \quad I_{pri_nom} := \sqrt{\frac{(2 \times P_{max})}{\text{КПД} \times f_{nom} \times L_{pri}}} = 4.646$$

Номинальное время открытого состояния ключа

$$t_{on_nom} := \frac{(I_{pri_nom} \times L_{pri})}{V_{in_min}} = 4.451 \times 10^{-6} \quad D_{pri} := t_{on_nom} \times f_{nom} = 0.45$$

Среднеквадратичное значение тока первичной стороны

$$I_{rms_pri} := I_{pri_nom} \times \sqrt{\frac{D_{pri}}{3}} = 1.799$$

Ток вторичной стороны

$$I_{sec_nom} := I_{pri_nom} \times k_{nom} = 46.459$$

Время обратного хода

$$t_{sec} := \frac{(I_{sec_nom} \times L_{sec})}{V_{out} + 0.5} = 6.438 \times 10^{-6} \quad D_{sec} := t_{sec} \times f_{nom} = 0.65$$

Среднеквадратичное значение тока вторичной стороны

$$I_{rms_sec} := I_{sec_nom} \times \sqrt{\frac{D_{sec}}{3}} = 21.63$$

Постоянная тока вторичной стороны

$$I_{dc_sec} := I_{sec_nom} \times \frac{D_{sec}}{2} = 15.106$$

$$\text{Переменная тока вторичной стороны} \quad I_{ac_sec} := I_{sec_nom} \times \sqrt{\left(\frac{D_{sec}^2}{4} + \frac{D_{sec}}{3} \right)} = 26.383$$

Обмотка питания контроллера

$$N_{bias_pre} := \frac{[(13 + 0.5) \times N2]}{V_{out} + 0.5} = 2.16 \quad \text{Принимаем} \quad N_{bias} := 2$$

Результаты расчета трансформатора

Первичная обмотка

$$N1 = 20 \quad (\text{витков})$$
$$L_{pri} = 1.355 \times 10^{-4} \quad (135 \text{ мкГн})$$
$$I_{pri_nom} = 4.646 \quad (\text{А}) \quad \text{номинальный ток}$$
$$I_{pri} = 4.909 \quad (\text{А}) \quad \text{максимальный ток}$$
$$I_{rms_pri} = 1.799 \quad (\text{А}) \quad \text{среднеквадратичный ток}$$
$$V_{ds_nom} = 464.411 \quad (\text{В}) \quad \text{напряжение на ключе}$$

Вторичная обмотка

$$N2 = 2 \quad (\text{витков})$$
$$L_{sec} = 1.732 \times 10^{-6} \quad (1.7 \text{ мкГн})$$
$$I_{sec_nom} = 46.459 \quad (\text{А}) \quad \text{номинальный ток}$$
$$I_{sec} = 35.722 \quad (\text{А}) \quad \text{максимальный ток}$$
$$I_{rms_sec} = 21.63 \quad (\text{А}) \quad \text{среднеквадратичный ток}$$
$$I_{dc_sec} = 15.106 \quad (\text{А})$$
$$I_{ac_sec} = 26.383 \quad (\text{А})$$

Обмотка питания ШИМ

$$N_{bias} = 2 \quad (\text{витков})$$

Выбор силового ключа

Максимальный ток $I_{pri} = 4.909$

Напряжение на ключе $V_{ds_nom} = 464.411$

Выбираем транзистор IRFBC40

Потери в ключе $P_k := 1.2 \times I_{rms_pri}^2 = 3.882$

$$t_{fall} := 22 \times 10^{-9}$$

Динамические потери при выключении ключа

$$P_{off} := \frac{[(V_{dc_max} + V_{out}) \times I_{pri} \times t_{fall} \times f]}{2} = 1.897$$

Элементы цепи управления ключом (R9, D3)

Примем паразитную емкость трансформатора ориентировочно $C_{eqv} := 100 \times 10^{-12}$

$$:= C_{eqv} \times \frac{V_{dc_max}}{0.1 \times I_{pri}} = 6.914 \times 10^{-8}$$

Из даташита транзистора $Q_g := 60 \times 10^{-9}$

$$I_{gate} := \frac{Q_g}{t} = 0.868$$

Принимаем напряжение питания контроллера $V_{cc} := 15$

Принимаем напряжение плато Миллера $V_{miller} := 5$

$$R9_p := \frac{(V_{cc} - V_{miller})}{I_{gate}} = 11.524 \quad \text{Выбираем} \quad R9 := 12$$

Диод D3 выбираем 1N4148

Цепи датчика тока (R10, R11, C7)

Нижний порог срабатывания токовой защиты $V_{pin3} := 0.8$

$$R11_p := \frac{V_{pin3}}{I_{pri}} = 0.163 \quad \text{Принимаем} \quad R11 := 0.18$$

$$\text{Мощность R11} \quad I_{pri}^2 \times R11 = 4.337$$

Принимаем $R10 := 470$

$$C9_p := \frac{1}{R10} = 1.471 \times 10^{-10} \quad \text{Принимаем} \quad C9 := 150 \times 10^{-12}$$

Элементы запуска (R1, R2)

По даташиту микросхемы параметры запуска

$$I_{start} := 0.45 \times 10^{-3}$$

$$V_{start} := 17.5$$

Суммарное сопротивление R1+R2 должно быть не более

$$R_{sum} := \frac{(V_{dc_max} - V_{start})}{I_{start}} = 7.154 \times 10^5$$

$$\text{Мощность R1+R2} \quad \frac{(V_{dc_max} - 14.5)^2}{R_{sum}} = 0.148$$

$$\begin{aligned} \text{Принимаем} \quad R1 &:= 360 \times 10^3 \\ R2 &:= R1 = 3.6 \times 10^5 \end{aligned}$$

Схема питания контроллера (D1, R4, C3)

Из даташита ток потребления микросхемы $I_p := 17 \times 10^{-3}$

$$I_{pwm} := I_p + 6.83 \times 10^{-3} = 0.024$$

Зададимся максимально возможной ёмкостью $C_{out} := 4700 \times 10^{-6}$

$$t_{\text{start}} := \frac{(C_{\text{out}} \times V_{\text{out}})}{I_{\text{out}}} = 7.05 \times 10^{-3}$$

$$\text{Ёмкость C3 должна быть не менее } \frac{(I_{\text{pwm}} \times t_{\text{start}})}{6} = 2.8 \times 10^{-5}$$

Принимаем C3 33 мкФ 25 В

Резистор R4 подбираем из диапазона 10...47 Ом

Принимаем R4 := 22

Цепь подавления выброса индуктивности рассеивания (D2, R3, C2)

Выбираем C2 30нФ 500 В

Выбираем D2 S1J

Выбираем R3 75 К

Выходной диод (D4)

Обратное напряжение на диоде

$$V_{d4} := \left(\frac{V_{dc_max}}{k_{nom}} \right) + V_{out} = 45.941$$

Ток через диод

$$I_{vd4} := I_{rms_sec} = 21.63$$

Принимаем диод Шоттки 30СТQ060

Конденсатор фильтра C8

Ёмкость конденсатора должна быть не менее

$$\frac{25}{f_{nom}^2 \times L_{sec}} = 1.415 \times 10^{-3}$$

Среднеквадратичное значение тока через выходной конденсатор

$$I_{c8} := \sqrt{I_{rms_sec}^2 - I_{out}^2} = 20.097$$

Выбираем 3 конденсатора LOW ESR 500 мкФ 25 В

$$ESR := 45 \times 10^{-3}$$

Пульсации на C8

$$V_{c8} := \left[\frac{(I_{out} \times t_{on})}{3 \times 500 \times 10^{-6}} \right] + I_{sec} \times ESR = 1.634$$

Дополнительный LC-фильтр (L1, C9)

Выбираем индуктивность Bourns SRP1270-2R2M

$$L1 := 2.2 \times 10^{-6}$$

Ёмкость конденсатора C9 должна быть не меньше

$$\frac{(V_{c8} - V)}{4 \times V \times 10^2 \times f_{nom}^2 \times L1} = 1.731 \times 10^{-5}$$

Выбираем конденсатор 22 мкФ 25 В

Усилитель ошибки и его цепи (U3, R16, R15)

$$V_{ref} := 2.5$$

Принимаем $R15 := 22 \times 10^3$

$$R14_p := \frac{[R15 \times (V_{out} - V_{ref})]}{V_{ref}} = 8.36 \times 10^4$$

Принимаем $R16 := 82.5 \times 10^3$

Выходное напряжение составит

$$V_{out_nom} := \frac{[V_{ref} \times (R16 + R15)]}{R15} = 11.875$$

Выбираем микросхему TL431A

$$V_{ref_min} := V_{ref} - V_{ref} \times 0.01 = 2.475$$

$$V_{ref_max} := V_{ref} + V_{ref} \times 0.01 = 2.525$$

Разброс 1% сопротивления резисторов

$$R15_min := R15 - R15 \times 0.01 = 2.178 \times 10^4$$

$$R15_max := R15 + R15 \times 0.01 = 2.222 \times 10^4$$

$$R16_min := R16 - R16 \times 0.01 = 8.168 \times 10^4$$

$$R16_max := R16 + R16 \times 0.01 = 8.332 \times 10^4$$

$$V_{out_min} := \frac{[V_{ref_min} \times (R16_min + R15_min)]}{R15_max} = 11.523$$

$$V_{out_max} := \frac{[V_{ref_max} \times (R16_max + R15_max)]}{R15_min} = 12.236$$

Оптрон гальванической развязки и его цепи (U3, R16, R5, R7, R12, R13)

Выбираем оптрон PC817

Выбрав ток через оптрон 0.5 мА, определяем сопротивление резисторов

Получаем $R5 := 10 \times 10^3$

$$R7 := R5$$

Минимальное падение напряжения на светодиоде PC817

$$V_{vd} := 0.9$$

Ток через TL431B

$$I_{tl} := 1 \times 10^{-3}$$

$$R12_p := \frac{V_{vd}}{I_{tl}} = 900$$

Принимаем $R12 := 910$

Максимальный ток через светодиод PC817 $I_{vd_max} := 1.5 \times 10^{-3}$

Максимальное падение на светодиоде PC817 $V_{vd_max} := 1.5$

$$I_{r12} := \frac{V_{vd_max}}{R12} = 1.648 \times 10^{-3}$$

Ток через R13

$$I_{r13} := I_{r12} + I_{vd_max} = 3.148 \times 10^{-3}$$

Сопротивление R13 должно быть не больше

$$\frac{(V_{out_min} - V_{ref})}{I_{r13}} = 2.866 \times 10^3$$

Принимаем $R13 := 2.7 \times 10^3$

Элементы коррекции петли обратной связи (C4, C10, R14)

Принимаем $C4 := 330 \times 10^{-12}$

$$C10 := 10 \times 10^{-9}$$

$$R14 := 47 \times 10^3$$

Номиналы уточняются при макетировании

Конденсатор подавления помех C11

Обязательно "Class Y1"

Принимаем $C11 := 4.7 \times 10^{-9}$