

Исходные данные

Напряжение питания ИВЭП: $E_{\Pi} := 115 \text{ В}$

Диапазон колебаний напряжения питания: $E_{\Pi\max} := E_{\Pi} + E_{\Pi} \cdot 0.4 = 161 \text{ В}$

$E_{\Pi\min} := E_{\Pi} - E_{\Pi} \cdot 0.6 = 46 \text{ В}$

Частота: $f := 400 \text{ Гц}$

Частота преобразования: $f_{\text{пр}} := 30 \cdot 10^3 \text{ Гц}$

Напряжение нагрузки ИВЭП: $U_{\text{Н}} := 27 \text{ В}$

Величина допустимого отклонения значения выходного напряжения: $\Delta U_{\text{Н}} := U_{\text{Н}} \cdot 0.02 = 0.54 \text{ В}$

Ток нагрузки ИВЭП: $I_{\text{Н}} := 0.5 \text{ А}$

Температура окружающей среды: $T_{\text{окс1}} := 233 \text{ К}$ $T_{\text{окс2}} := 343 \text{ К}$

Нестабильность выходного напряжения при изменении E_{Π} : $\delta U_E := 0.02 \text{ В}$

Нестабильность выходного напряжения при изменении $I_{\text{н}}$: $\delta U_I := 0.03 \text{ В}$

Параметры микросхемы

Номинальный ток питания микросхемы: $I_{\text{МН}} := 11 \cdot 10^{-3} \text{ А}$

Максимальный входной ток микросхемы: $I_{\text{Мmax}} := 17 \cdot 10^{-3} \text{ А}$

Максимальный выходной ток микросхемы: $I_{\text{Выхmax}} := 1 \text{ А}$

Номинальное напряжение питания микросхемы: $U_{\text{МН}} := 9 \text{ В}$

Максимальное напряжение питания микросхемы: $U_{\text{Мmax}} := 30 \text{ В}$

Максимальное выходное напряжение микросхемы: $U_{\text{Выхmax}} := 5 \text{ В}$

Максимально допустимая температура микросхемы: $T_{\text{Мmax}} := 343 \text{ К}$

Минимально допустимая температура микросхемы: $T_{\text{Мmin}} := 233 \text{ К}$

Амплитуда пилообразного напряжения генератора: $U_{\text{ампл}} := 1.7 \text{ В}$

Гистерезис питания микросхемы: $\Delta U_{\text{Г}} := 0.8 \text{ В}$

Пусковой ток микросхемы: $I_{\text{пуск}} := 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ А}$

Напряжение включения микросхемы: $U_{\text{вкл}} := 16 \text{ В}$

Максимальный выходной ток микросхемы с датчика тока: $I_{\text{Выхmaxд}} := 2 \cdot 10^{-6} \text{ А}$

Опорное напряжение УСР микросхемы: $U_{\text{он}} := 2.5 \text{ В}$

Электрический расчёт

Определяем суммарную мощность нагрузки: $P_H := I_H \cdot U_H + I_{MH} \cdot U_{MH} = 13.599 \text{ Вт}$

Задаёмся ориентировочным значением КПД: $\eta := 0.85$

Определяем максимальное значение преобразуемой мощности с учётом дополнительных потерь в ИВЭП:

$$P_{\text{пр}} := \frac{P_H}{\eta} = 15.999 \text{ Вт}$$

Расчитываем трансформатор.

Выбираем сердечник МП-140.

Магнитная индукция насыщения: $B_s := 0.7 \text{ Т}$

Остаточная индукция: $B_r := 0.03 \text{ Т}$

Магнитная постоянная: $\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} \text{ Гн/м}$

Максимальная рабочая индукция: $B_m := 0.8 \cdot B_s = 0.56 \text{ Т}$

Относительная магнитная проницаемость: $\mu := 140 \text{ Гн/м}$

Максимальная напряжённость: $H_m := \frac{B_m}{\mu \cdot \mu_0} = 3.183 \times 10^3 \text{ А/м}$

Объём сердечника: $V_{\text{серд}} := \frac{2 \cdot P_{\text{пр}}}{B_m \cdot H_m \cdot f_{\text{пр}}} = 5.984 \times 10^{-7} \text{ м}^3$

Типоразмер сердечника - тороидальный МП15х7х4.8

$$D := 15 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad d := 7 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad h := 4.8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Объём сердечника-стали: $V_{\text{стали}} := \frac{\pi \cdot D^2 - \pi \cdot d^2}{4} \cdot h = 6.635 \times 10^{-7} \text{ м}^3$

Площадь поперечного сечения: $S_{\text{стали}} := h \cdot \frac{(D - d)}{2} = 1.92 \times 10^{-5} \text{ м}^2$

Площадь окна: $S_{\text{окна}} := \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 3.848 \times 10^{-5} \text{ м}^2$

Средняя длина - длина силовой линии: $l_{\text{ср}} := \frac{D + d}{2} \cdot \pi = 0.035 \text{ м}$

Длина одного витка: $l_o := 2 \cdot h + (D - d) = 0.018 \text{ м}$

Площадь охлаждения: $S_{\text{охл}} := \pi \cdot D \cdot h + \frac{\pi \cdot D^2}{2} = 5.796 \times 10^{-4} \text{ м}^2$

Определяем максимальную индукцию, которая возникает в выбранном сердечнике с объёмом $V_{\text{серд}}$:

$$B_m := \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{пр}} \cdot \mu \cdot \mu_0}{V_{\text{стали}} \cdot f_{\text{пр}}}} = 0.532 \text{ Т} \quad H_m := \frac{B_m}{\mu \cdot \mu_0} = 3.023 \times 10^3 \text{ А/м}$$

Определяем мощность, которую может рассеять трансформатор с таким сердечником. Коэффициент охлаждения $\alpha_{\text{охл}}$ зависит от формы тела, от того, как она соориентирована в гравитационном поле, от давления, влажности и т.д.

$$\alpha_{\text{охл}} := 20 \text{ Вт/К} \cdot \text{м}^2$$

$$\text{Максимальная температура обмоток: } T_{\text{обмmax}} := 403 \text{ К}$$

$$\text{Допустимый перегрев: } \Delta T := T_{\text{обмmax}} - T_{\text{max}} = 60 \text{ К}$$

$$\text{Тепловое сопротивление: } R_T := \frac{1}{\alpha_{\text{охл}} \cdot S_{\text{охл}}} = 86.263 \text{ Ом}$$

$$P_{\text{рас}} := \frac{\Delta T}{R_T} = 0.696 \text{ Вт}$$

Определяем потери мощности на перемагничивание сердечника.

$$\text{Параметры аппроксимации: } \alpha := 1.48 \quad \beta := 1.85$$

$$\text{Удельные магнитные потери: } P_0 := 2000 \text{ Вт/м}^3$$

$$P_{\text{пс}} := P_0 \cdot \left(\frac{f_{\text{пр}}}{1000} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{B_m - B_r}{2} \right)^\beta \cdot V_{\text{стали}} = 0.016 \text{ Вт}$$

Определяем допустимую мощность в обмотках трансформатора:

$$P_{\text{по}} := P_{\text{рас}} - P_{\text{пс}} = 0.68 \text{ Вт}$$

$P_{\text{по}} > 0$, значит частота преобразования, максимальная индукция и размер сердечника выбраны правильно.

Определяем число витков первичной обмотки трансформатора.

$$\text{Максимальный коэффициент заполнения управляющих импульсов: } k_{z_{\text{max}}} := 0.5$$

$$I_{\text{нагmax}} := 2 \cdot \frac{P_{\text{пр}}}{E_{\text{пmin}} \cdot k_{z_{\text{max}}}} = 1.391 \text{ А} \quad W_1 := \frac{E_{\text{пmin}} \cdot k_{z_{\text{max}}}}{f_{\text{пр}} \cdot S_{\text{стали}} \cdot B_m} = 75.086$$

$$W_1 := 76$$

Определяем число витков вторичных обмоток трансформатора.

Число витков вторичной обмотки канала питания нагрузки:

$$W_2 := \frac{(U_H + 0.7) \cdot (1 - k_{3\max})}{f_{\text{пр}} \cdot S_{\text{стали}} \cdot B_m} = 45.215$$

$$W_2 := 46$$

Число витков вторичной обмотки канала питания микросхемы:

$$W_4 := \frac{(U_{\text{МН}} + 0.7) \cdot (1 - k_{3\max})}{f_{\text{пр}} \cdot S_{\text{стали}} \cdot B_m} = 15.833$$

$$W_4 := 16$$

Индуктивность обмоток трансформатора: $L_1 := \mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{S_{\text{стали}} \cdot W_1^2}{l_{\text{ср}}} = 5.646 \times 10^{-4} \text{ Гн}$

$$L_2 := \mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{S_{\text{стали}} \cdot W_2^2}{l_{\text{ср}}} = 2.068 \times 10^{-4} \text{ Гн}$$

$$L_3 := \mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{S_{\text{стали}} \cdot W_4^2}{l_{\text{ср}}} = 2.502 \times 10^{-5} \text{ Гн}$$

Мощность потерь в обмотках трансформатора: $P_1 := \frac{P_{\text{по}} \cdot P_{\text{пр}}}{(P_{\text{пр}} + P_H)} = 0.367 \text{ Вт}$

$$P_2 := \frac{P_{\text{по}} \cdot \frac{I_H}{2} \cdot U_H}{P_{\text{пр}} + P_H} = 0.155 \text{ Вт}$$

$$P_3 := \frac{P_{\text{по}} \cdot I_{\text{МН}} \cdot U_H}{P_{\text{пр}} + P_H} = 6.821 \times 10^{-3} \text{ Вт}$$

$$P_{\text{сум}} := P_1 + 2P_2 + P_3 = 0.684 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{по}} = 0.68 \text{ Вт}$$

$P_{\text{сум}} = P_{\text{по}}$, следовательно расчёты верны.

Максимально допустимые сопротивления обмоток: $R_{\text{об1}} := \frac{3 \cdot P_1}{\left(\frac{P_{\text{пр}}}{E_{\text{п}} \cdot k_{3\max}} \right)^2} = 14.239 \text{ Ом}$

$$R_{\text{об2}} := \frac{3 \cdot P_2}{\left(\frac{P_{\text{пр}}}{E_{\text{п}} \cdot k_{3\max}} \right)^2} = 6.007 \text{ Ом} \quad R_{\text{об4}} := \frac{3 \cdot P_3}{\left(\frac{P_{\text{пр}}}{E_{\text{п}} \cdot k_{3\max}} \right)^2} = 0.264 \text{ Ом}$$

Удельное сопротивление меди: $\rho := 0.0175 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Определяем площади поперечных сечений и диаметры проводов всех обмоток трансформатора.

$$S_1 := \frac{\rho \cdot W_1 \cdot l_o}{R_{o61}} = 1.644 \times 10^{-9} \text{ м}^2 \quad d_1 := \sqrt{\frac{4 \cdot S_1}{W_1}} = 9.302 \times 10^{-6} \text{ м}$$

$$S_2 := \frac{\rho \cdot W_2 \cdot l_o}{R_{o62}} = 2.358 \times 10^{-9} \text{ м}^2 \quad d_2 := \sqrt{\frac{4 \cdot S_2}{W_2}} = 1.432 \times 10^{-5} \text{ м}$$

$$S_4 := \frac{\rho \cdot W_4 \cdot l_o}{R_{o64}} = 1.864 \times 10^{-8} \text{ м}^2 \quad d_4 := \sqrt{\frac{4 \cdot S_4}{W_4}} = 6.827 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Выбираем провод ПЭТ-155. Диаметры проводов марки ПЭТ-155

$$d_1 := 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad d_{1i} := 0.125 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$d_2 := 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad d_{2i} := 0.125 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$d_4 := 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad d_{4i} := 0.125 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Сечение проводов с изоляцией:

$$S_1 := \frac{\pi \cdot d_{1i}^2}{4} = 1.227 \times 10^{-8} \text{ м}^2$$

$$S_2 := \frac{\pi \cdot d_{2i}^2}{4} = 1.227 \times 10^{-8} \text{ м}^2$$

$$S_4 := \frac{\pi \cdot d_{4i}^2}{4} = 1.227 \times 10^{-8} \text{ м}^2$$

Размещение проводов с изоляцией

$$K_{\text{зокна}} := 0.5$$

$$S_{\text{обм}\Sigma} := \frac{S_1 \cdot W_1 + S_2 \cdot W_2 \cdot 2 + S_4 \cdot W_4}{K_{\text{зокна}}} = 4.516 \times 10^{-6}$$

$$S_{\text{окна}} = 3.848 \times 10^{-5}$$

$$S_{\text{окна}} - S_{\text{обм}\Sigma} = 3.397 \times 10^{-5}$$

Максимальный ток и напряжение МДП транзистора

$$U_{\text{тр}} := E_{\text{пmax}} + U_{\text{н}} \cdot \frac{W_1}{W_2} = 205.609 \text{ В} \quad I_{\text{тр}} := 1.2 \cdot I_{\text{нагmax}} = 1.669 \text{ А}$$

Выбираем КП751Б. Аналог - IRF720.

Напряжение сток-исток: $U_{\text{сиmax}} := 350 \text{ В}$

Ток сток-исток: $I_{\text{сmax}} := 3.3 \text{ А}$

Напряжение затвор-исток: $U_{\text{зиmax}} := 20 \text{ В}$

Сопротивление сток-исток в открытом состоянии: $R_{\text{сиост}} := 1.8 \text{ Ом}$

Пороговое напряжение: $U_{\text{порmax}} := 4 \text{ В}$

Крутизна ВАХ: $S_{\text{min}} := 1.7 \text{ А/В}$

Входная ёмкость: $C_{\text{iss}} := 600 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$

Выходная ёмкость: $C_{\text{oss}} := 180 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$

Проходная ёмкость: $C_{\text{rss}} := 70 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$

Ёмкость затвор-сток: $C_{\text{зс}} := C_{\text{rss}} = 7 \times 10^{-11} \text{ Ф}$

Ёмкость сток-исток: $C_{\text{си}} := C_{\text{oss}} - C_{\text{зс}} = 1.1 \times 10^{-10} \text{ Ф}$

Ёмкость затвор-исток: $C_{\text{зи}} := C_{\text{iss}} - C_{\text{зс}} = 5.3 \times 10^{-10} \text{ Ф}$

Предельно допустимая температура: $T_{\text{maxvt1}} := 573 \text{ К}$

Чтобы транзистор пропускал ток $I_{\text{нагmax}}$, необходимо чтобы выполнялось следующее условие: $U_{\text{зирас}} < U_{\text{зи}}$, т.е. $U_{\text{зирас}} < 20 \text{ В}$.

$$U_{\text{зирас}} := U_{\text{порmax}} + \frac{I_{\text{нагmax}}}{S_{\text{min}}} = 4.818 \text{ В}$$

Расчёт сопротивления на затворе: $R_8 := \frac{U_{\text{выхmax}}}{I_{\text{выхmax}}} = 5 \text{ Ом} \quad R_8 := 5.1 \text{ Ом}$

$$P_{R8} := I_{\text{выхmax}}^2 \cdot R_8 = 5.1 \text{ Вт}$$

Расчёт диодов выходного фильтра:

$$U_{vd8} := \left(U_H + E_{пmax} \cdot \frac{W_2}{W_1} \right) \cdot 1.5 = 186.671 \text{ В} \quad I_{vd8} := 1.5 \cdot I_H = 0.75 \text{ А}$$

$$\text{Выбираем диод КД217А: } U_{обр8} := 100 \text{ В} \quad I_{пр8} := 3 \text{ А} \quad U_{прvd8} := 1.4 \text{ В} \quad T_{maxvd8} := 398 \text{ К}$$

Расчёт диода канала подпитки микросхемы:

$$U_{vd5} := \left(U_{MH} + E_{пmax} \cdot \frac{W_4}{W_1} \right) \cdot 1.5 = 64.342 \text{ В} \quad I_{vd5} := 2 \cdot I_{MH} = 0.022 \text{ А}$$

$$\text{Выбираем диод КД103А: } U_{обр5} := 50 \text{ В} \quad I_{пр5} := 0.1 \text{ А} \quad U_{прvd5} := 1 \text{ В} \quad T_{maxvd5} := 373 \text{ К}$$

$$\text{Расчёт ёмкости выходного фильтра: } C_7 := \frac{1.4 \cdot I_{нагmax} \cdot k_{3max}}{f_{пр} \cdot \Delta U_H} = 6.011 \times 10^{-5} \text{ Ф}$$

$$\text{Согласно ряду Е24: } C_7 := 6.2 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$$

Найдём сопротивление резистора R11, определяющего уровень срабатывания токовой защиты:

$$\text{Опорное напряжение компаратора токовой защиты: } U_{R11} := 1 \text{ В}$$

$$R_{11} := \frac{U_{R11}}{I_{нагmax}} = 0.719 \text{ Ом} \quad R_{11} := 7.5 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}$$

$$\text{Рассеиваемая мощность: } P_{R4} := I_{нагmax}^2 \cdot R_{11} = 1.452 \text{ Вт}$$

Время выхода ИВЭП на режим после включения микросхемы:

$$t_{внр} := \frac{C_7 \cdot U_H}{I_H} \cdot \ln \left(\frac{I_{тр}}{I_{тр} - I_{нагmax}} \right) = 5.999 \times 10^{-3} \text{ с}$$

$$\text{Ёмкость конденсатора С1 пускового узла питания: } C_1 := \frac{I_{MH} \cdot t_{внр}}{\Delta U_r \cdot 3} = 2.749 \times 10^{-5} \text{ Ф}$$

$$C_1 := 3 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$$

$$\text{Сопротивление резистора R2 пускового узла питания: } R_2 := \frac{0.8 \cdot E_{пmin}}{I_{пуск}} = 7.36 \times 10^4 \text{ Ом}$$

$$R_2 := 7.5 \cdot 10^4 \text{ Ом}$$

$$\text{Рассеиваемая мощность: } P_{R2} := (2 \cdot I_{пуск})^2 \cdot R_2 = 0.075 \text{ Вт}$$

Общее время готовности к работе: $t_{\text{обг}} := t_{\text{внр}} + \frac{R_2 \cdot C_1 \cdot U_{\text{вкл}}}{E_{\text{пmin}}} = 0.789 \text{ с}$

Определяем сопротивление резисторов датчика выходного напряжения.

Ток делителя через резисторы R3 и R4: $I_{\text{дел}} := 500 \cdot I_{\text{выхмахд}} = 1 \times 10^{-3}$

$$R_4 := \frac{U_{\text{он}}}{I_{\text{дел}}} = 2.5 \times 10^3 \text{ Ом} \quad R_3 := \frac{U_{\text{мн}} - U_{\text{он}}}{I_{\text{дел}}} = 6.5 \times 10^3 \text{ Ом}$$

$$R_4 := 2.4 \cdot 10^3 \text{ Ом} \quad R_3 := 6.8 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$P_{R4} := I_{\text{дел}}^2 \cdot R_4 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ Вт} \quad P_{R3} := I_{\text{дел}}^2 \cdot R_3 = 6.8 \times 10^{-3} \text{ Вт}$$

Определяем ёмкость C4 узла обратной связи. Чтобы не было ложного срабатывания, пульсации напряжения должны быть как можно меньше. Потому и постоянная времени цепи C4-R3-R4 должна быть минимум на порядок больше периода преобразования.

$$t_{\text{пр}} := 50 \cdot \frac{1}{f_{\text{пр}}} = 1.667 \times 10^{-3} \text{ с}$$

$$C_4 := \frac{t_{\text{пр}}}{R_3 + R_4} = 1.812 \times 10^{-7} \text{ Ф}$$

$$C_4 := 20 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$$

Найдём коэффициент передачи УСР, исходя из требуемой точности стабилизации выходного напряжения:

$$K_{\text{УСР}} := \frac{(U_{\text{н}} - \delta U_{\text{Е}}) \cdot (R_3 \cdot R_4)}{\delta U_{\text{Е}} \cdot R_4 \cdot \frac{W_4 \cdot k_{\text{зmax}} \cdot E_{\text{п}}}{W_1 \cdot (1 - k_{\text{зmax}}) \cdot U_{\text{ампл}}}} = 6.441 \times 10^5$$

Определяем R9 и C5 для датчика тока R4:

$$100 \cdot R_4 = 2.4 \times 10^5 \quad R_9 > 100 \cdot R_4$$

$$U_{R4} > 100 \cdot I_{\text{выхмахд}} \cdot R_3$$

$$R_9 := \frac{U_{R11}}{100 \cdot I_{\text{выхмахд}}} = 5 \times 10^3 \text{ Ом}$$

$$R_9 := 5.1 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$P_{R9} := I_{\text{выхмахд}}^2 \cdot R_9 = 2.04 \times 10^{-8} \text{ Вт}$$

Время включения транзистора:

$$t_{\text{вктр}} := \frac{U_{\text{выхмах}} \cdot C_{\text{зи}} + C_{\text{зс}} \cdot (U_{\text{тр}} - U_{\text{выхмах}})}{\frac{U_{\text{выхмах}}}{R_9}} = 1.703 \times 10^{-5} \text{ с}$$

$$C_5 := \frac{t_{\text{вктр}}}{3 \cdot R_3} = 8.346 \times 10^{-10} \text{ Ф} \quad C_5 := 9.1 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$$

Расчёт защитной RCD-цепи.

$$\Delta U_{\text{сил}} := 10 \text{ В}$$

$$C_8 := \frac{0.03 \cdot B_m^2 \cdot V_{\text{стали}}}{\mu \cdot \mu_0 \cdot \left[(U_{\text{тр}} + \Delta U_{\text{сил}})^2 - U_{\text{тр}}^2 \right]} = 7.596 \times 10^{-9} \text{ Ф}$$

$$C_8 := 8.2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$$

$$R_7 := \frac{\left[E_{\text{пmin}} + (U_{\text{н}} + U_{\text{прvd8}}) \cdot \frac{W_1}{W_2} \right] + (U_{\text{мн}} + U_{\text{прvd5}}) \cdot \frac{W_1}{W_4}}{C_8 \cdot \Delta U_{\text{сил}} \cdot f_{\text{пр}}} = 5.708 \times 10^4 \text{ Ом}$$

$$R_7 := 62 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Потери в резисторе R8:

$$E_{\text{рnom}} := E_{\text{п}} - U_{\text{R11}} - I_{\text{нагmax}} \cdot R_{\text{сиост}} = 111.496 \text{ В}$$

$$P_{\text{R8}} := C_8 \cdot E_{\text{рnom}} \cdot \Delta U_{\text{сил}} \cdot f_{\text{пр}} = 0.274 \text{ Вт}$$

Диод в RCD-цепи:

$$U_{\text{VD7обр}} > 1.5 \cdot U_{\text{тр}} \quad 1.5 \cdot U_{\text{тр}} = 308.413 \text{ В}$$

$$I_{\text{VD7пр}} > 1.5 \cdot I_{\text{тр}} \quad 1.5 \cdot I_{\text{тр}} = 2.504 \text{ А}$$

$$\text{Выбираем диод КД202М:} \quad I_{\text{VD7пр}} := 9 \text{ А} \quad U_{\text{VD7обр}} := 350 \text{ В}$$

$$U_{\text{VD7пр}} := 0.9 \text{ В} \quad P_{\Theta \text{VD7}} := 276.65 \text{ К/Вт}$$

$$T_{\text{maxvd7}} := 403 \text{ К}$$

В результате моделирования были получены следующие значения элементов:

Резисторы [Ом]:	$R_1 := 1$	C2-33H-2Вт	$P_{R1\text{доп}} := 2$	Вт
	$R_2 := 7.5 \cdot 10^4$	C2-33H-0.25Вт	$P_{R2\text{доп}} := 0.25$	Вт
	$R_3 := 6.8 \cdot 10^3$	C2-33H-0.125Вт	$P_{R3\text{доп}} := 0.125$	Вт
	$R_4 := 2.4 \cdot 10^3$	C2-33H-0.125Вт	$P_{R4\text{доп}} := 0.125$	Вт
	$R_5 := 270$	C2-33H-0.125Вт	$P_{R5\text{доп}} := 0.125$	Вт
	$R_6 := 100 \cdot 10^3$	C2-33H-0.125Вт	$P_{R6\text{доп}} := 0.125$	Вт
	$R_7 := 62 \cdot 10^3$	C2-33H-0.125Вт	$P_{R7\text{доп}} := 0.125$	Вт
	$R_8 := 5.1$	C2-33H-0.125Вт	$P_{R8\text{доп}} := 0.125$	Вт
	$R_9 := 5.1 \cdot 10^3$	C2-33H-0.125Вт	$P_{R9\text{доп}} := 0.125$	Вт
	$R_{10} := 2 \cdot 10^3$	C2-33H-0.125Вт	$P_{R10\text{доп}} := 0.125$	Вт
	$R_{11} := 7.5 \cdot 10^{-1}$	C2-33H-1Вт	$P_{R11\text{доп}} := 1$	Вт
	$R_{12} := 4.3$	KNP-20Вт	$P_{R12\text{доп}} := 20$	Вт
	$R_{13} := 4.3$	KNP-20Вт	$P_{R13\text{доп}} := 20$	Вт

Конденсаторы [Ф]:	$C_1 := 3 \cdot 10^{-5}$	K50-35	$U_{C1\text{ном}} := 450$	В
	$C_2 := 3 \cdot 10^{-6}$	K73-17 имп.	$U_{C2\text{ном}} := 400$	В
	$C_3 := 1 \cdot 10^{-9}$	K10-17Б	$U_{C3\text{ном}} := 50$	В
	$C_4 := 20 \cdot 10^{-9}$	K10-17Б	$U_{C4\text{ном}} := 50$	В
	$C_5 := 9.1 \cdot 10^{-10}$	K10-17Б	$U_{C5\text{ном}} := 50$	В
	$C_6 := 100 \cdot 10^{-9}$	K10-17Б	$U_{C6\text{ном}} := 50$	В
	$C_7 := 6.2 \cdot 10^{-5}$	K10-17Б	$U_{C7\text{ном}} := 50$	В
	$C_8 := 8.2 \cdot 10^{-9}$	K10-17-3Б	$U_{C8\text{ном}} := 160$	В
	$C_9 := 0.62 \cdot 10^{-3}$	K50-35	$U_{C9\text{ном}} := 25$	В
	$C_{10} := 0.62 \cdot 10^{-3}$	K50-35	$U_{C10\text{ном}} := 25$	В

Энергетический расчёт

Энергетический расчёт проводим следующим образом: используя OrCAD PSpice, смотрим мощность потерь всех элементов, на которых эти потери возможны.

В результате имеем следующие значения мощности потерь [Вт]:

В силовом транзисторе: $P_{M1} := 1.6$

В ШИМ-контроллере: $P_{U1} := 169 \cdot 10^{-3}$

В диодах:

$$P_{D1} := 300 \cdot 10^{-3} \quad P_{D2} := 160 \cdot 10^{-3} \quad P_{D3} := 160 \cdot 10^{-3} \quad P_{D4} := 300 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{D5} := 18 \cdot 10^{-3} \quad P_{D6} := 10^{-3} \quad P_{D7} := 1.25 \cdot 10^{-3} \quad P_{D8} := 3 \quad P_{D9} := 3$$

Суммарные потери на диодах:

$$P_D := P_{D1} + P_{D2} + P_{D3} + P_{D4} + P_{D5} + P_{D6} + P_{D7} + P_{D8} + P_{D9} = 6.94$$

В резисторах:

$$P_{R2} := 155 \cdot 10^{-3} \quad P_{R3} := 26 \cdot 10^{-3} \quad P_{R4} := 7.4 \cdot 10^{-3} \quad P_{R5} := 7.45 \cdot 10^{-6} \quad P_{R6} := 385 \cdot 10^{-6}$$

$$P_{R7} := 61 \cdot 10^{-3} \quad P_{R8} := 2.15 \cdot 10^{-3} \quad P_{R9} := 145 \cdot 10^{-6} \quad P_{R10} := 20.7 \cdot 10^{-3} \quad P_{R11} := 940 \cdot 10^{-3}$$

Суммарные потери на резисторах:

$$P_R := P_{R2} + P_{R3} + P_{R4} + P_{R5} + P_{R6} + P_{R7} + P_{R8} + P_{R9} + P_{R10} + P_{R11}$$

$$P_R = 1.213$$

Суммарные потери ИВЭП: $P_{ИВЭП} := P_{M1} + P_{U1} + P_D + P_R = 9.922$

$$\text{КПД устройства: } \eta_{уст} := \frac{P_H}{P_H + P_{ИВЭП}} = 0.578$$

Расчёт показателей надёжности

Резисторы

$$K_{IR} := 1 \quad K_{UR} := 1 \quad K_E := 1 \quad \lambda_{0R} := 0.087 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч} \quad T_0 := 298 \text{ К} \quad T_{\text{раб}} := 343 \text{ К}$$

Коэффициенты интенсивности отказов:

$$K_{PR2} := \frac{P_{R2}}{P_{R2\text{доп}}} = 0.62$$

$$K_{PR7} := \frac{P_{R7}}{P_{R7\text{доп}}} = 0.488$$

$$K_{PR3} := \frac{P_{R3}}{P_{R3\text{доп}}} = 0.208$$

$$K_{PR8} := \frac{P_{R8}}{P_{R8\text{доп}}} = 0.017$$

$$K_{PR4} := \frac{P_{R4}}{P_{R4\text{доп}}} = 0.059$$

$$K_{PR9} := \frac{P_{R9}}{P_{R9\text{доп}}} = 1.16 \times 10^{-3}$$

$$K_{PR5} := \frac{P_{R5}}{P_{R5\text{доп}}} = 5.96 \times 10^{-5}$$

$$K_{PR10} := \frac{P_{R10}}{P_{R10\text{доп}}} = 0.166$$

$$K_{PR6} := \frac{P_{R6}}{P_{R6\text{доп}}} = 3.08 \times 10^{-3}$$

$$K_{PR11} := \frac{P_{R11}}{P_{R11\text{доп}}} = 0.94$$

$$K_{PR} = 2.502$$

$$K_T := \frac{T_{\text{раб}}}{T_0} = 1.151$$

$$\text{Интенсивности отказов элементов (1/ч): } \lambda_R := \lambda_{0R} \cdot K_{IR} \cdot K_{UR} \cdot K_E \cdot K_{PR} \cdot K_T = 2.506 \times 10^{-7}$$

Конденсаторы

$$K_{IC} := 1 \quad K_{PC} := 1 \quad K_E := 1 \quad T_0 := 298 \text{ K}$$

$$U_{C1} := 103 \quad B \quad U_{C6} := 5 \quad B$$

$$U_{C2} := 16 \quad B \quad U_{C7} := 920 \cdot 10^{-3} \quad B$$

$$U_{C3} := 13 \quad B \quad U_{C8} := 100 \quad B$$

$$U_{C4} := 17 \quad B \quad U_{C9} := 9 \quad B$$

$$U_{C5} := 2 \quad B \quad U_{C10} := 9 \quad B$$

Коэффициенты интенсивности отказов:

$$K_{UC1} := \frac{U_{C1}}{U_{C1ном}} = 0.229$$

$$K_{UC6} := \frac{U_{C6}}{U_{C6ном}} = 0.1$$

$$K_{UC2} := \frac{U_{C2}}{U_{C2ном}} = 0.04$$

$$K_{UC7} := \frac{U_{C7}}{U_{C7ном}} = 0.018$$

$$K_{UC3} := \frac{U_{C3}}{U_{C3ном}} = 0.26$$

$$K_{UC8} := \frac{U_{C8}}{U_{C8ном}} = 0.625$$

$$K_{UC4} := \frac{U_{C4}}{U_{C4ном}} = 0.34$$

$$K_{UC9} := \frac{U_{C9}}{U_{C9ном}} = 0.36$$

$$K_{UC5} := \frac{U_{C5}}{U_{C5ном}} = 0.04$$

$$K_{UC10} := \frac{U_{C10}}{U_{C10ном}} = 0.36$$

Электролитические конденсаторы:

$$\lambda_{0Cэл} := 0.35 \cdot 10^{-6} 1/ч$$

$$K_{UCэл} := K_{UC1} + K_{UC9} + K_{UC10} = 0.949$$

Интенсивности отказов элементов (1/ч):

$$\lambda_{Cэл} := \lambda_{0Cэл} \cdot K_{IC} \cdot K_{UCэл} \cdot K_E \cdot K_{PC} \cdot K_T = 3.823 \times 10^{-7}$$

Керамические конденсаторы:

$$\lambda_{0\text{Скер}} := 0.15 \cdot 10^{-6} \quad 1/\text{ч}$$

$$K_{\text{UCскер}} := K_{\text{UC3}} + K_{\text{UC4}} + K_{\text{UC5}} + K_{\text{UC6}} + K_{\text{UC7}} + K_{\text{UC8}} = 1.383$$

Интенсивности отказов элементов (1/ч):

$$\lambda_{\text{Скер}} := \lambda_{0\text{Скер}} \cdot K_{\text{IC}} \cdot K_{\text{UCскер}} \cdot K_{\text{Е}} \cdot K_{\text{РС}} \cdot K_{\text{Т}} = 2.388 \times 10^{-7}$$

Плёночные конденсаторы:

$$\lambda_{0\text{СПЛ}} := 0.05 \cdot 10^{-6} \quad 1/\text{ч}$$

$$K_{\text{UCПЛ}} := K_{\text{UC2}} = 0.04$$

Интенсивности отказов элементов (1/ч):

$$\lambda_{\text{СПЛ}} := \lambda_{0\text{СПЛ}} \cdot K_{\text{IC}} \cdot K_{\text{UCПЛ}} \cdot K_{\text{Е}} \cdot K_{\text{РС}} \cdot K_{\text{Т}} = 2.302 \times 10^{-9}$$

$$\lambda_{\text{С}} := \lambda_{\text{Сэл}} + \lambda_{\text{Скер}} + \lambda_{\text{СПЛ}} = 6.234 \times 10^{-7}$$

Тепловой расчёт

Максимальная рабочая температура теплонагруженных элементов [K]; должна быть на 20% меньше предельно допустимой температуры элементов:

$$T_{ivd8} := T_{maxvd8} - \frac{T_{maxvd8}}{5} = 318.4$$

$$T_{ivd5} := T_{maxvd5} - \frac{T_{maxvd5}}{5} = 298.4$$

$$T_{ivd7} := T_{maxvd7} - \frac{T_{maxvd7}}{5} = 322.4$$

$$T_{ivt1} := T_{maxvt1} - \frac{T_{maxvt1}}{5} = 458.4$$

$$T_{im} := T_{mmax} - \frac{T_{mmax}}{5} = 274.4$$

$$K_{PR} := K_{PR2} + K_{PR3} + K_{PR4} + K_{PR5} + K_{PR6} + K_{PR7} + K_{PR8} + K_{PR9} + K_{PR10} + K_{PR11}$$