

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Тульский государственный университет
Кафедра «Приборы управления»

«Электронные устройства электрооборудования летательных аппаратов»
Методические указания
по выполнению курсовой работы для студентов
специальности 140609 «Электрооборудование летательных аппаратов»
очной формы обучения

Тула 2010 г.

Разработал В.А. Орлов,
к.т.н., доц. каф. «Приборы управления»

Введение

Источниками вторичного электропитания (ИВЭП) по своей физической сущности являются преобразователями вида и качества электрической энергии. Довольно редко (и только в автономных системах) удаётся осуществить питание всех устройств непосредственно от первичного источника электроэнергии, т. е. от преобразователя неэлектрической энергии в электрическую. В большинстве случаев первичный источник или стандартная сеть по частоте, стабильности и напряжению оказываются непригодными для питания электронных устройств. Поэтому возникает необходимость преобразования электрической энергии.

Класс устройств, преобразующих электрическую энергию, весьма разнообразен и охватывает диапазон мощностей от долей ватта до нескольких тысяч киловатт. Преобразователи электрической энергии используются в наземных стационарных установках, на автомобилях, кораблях и летательных аппаратах. Поэтому первичные источники могут быть весьма различными, а преобразуемые напряжения — постоянными от нескольких вольт или переменными до сотен вольт.

Основной задачей проектирования ИВЭП является их миниатюризация, т. е. получение заданной мощности при минимальном объёме. Преодоление существующих трудностей возможно путём перехода от преобразования энергии на стандартных низких частотах (50 или 400 Гц) к преобразованиям на частотах в десятки и сотни килогерц при преимущественно прямоугольной форме напряжения.

Непрерывные компенсационные стабилизаторы напряжения (НКСН) относятся к наиболее распространённым устройствам вторичного электропитания и предназначены для поддержания в нагрузке заданного уровня напряжения. По принципу действия НКСН является системой автоматического регулирования, работающей в режиме стабилизации. Наличие ООС по напряжению определяет его наиболее важные свойства.

Основными возмущающими воздействиями являются: изменение и пульсации напряжения источника питания и тока нагрузки, температурный и технологический разброс параметров и характеристик элементов стабилизатора (в некоторых случаях к ним следует отнести временной дрейф параметров). Возмущения могут быть приложены к любой точке схемы, но наибольшее дестабилизирующее воздействие они оказывают на входные цепи стабилизатора.

Выпрямительные устройства используются для преобразования переменного напряжения питающей сети в постоянное напряжение требуемой величины.

Выпрямительное устройство в большинстве случаев состоит из трансформатора, преобразующего переменное напряжение питающей сети в более высокое или низкое, полупроводниковых диодов, осуществляющих выпрямление переменного напряжения, и сглаживающего фильтра, уменьшающего пульсации выпрямленного напряжения.

Основным элементом выпрямительного устройства является диод, который представляет собой нелинейный прибор. Сопротивление диода для тока, протекающего в прямом направлении значительно меньше, чем сопротивление для обратного тока, т. е. диод обладает свойством односторонней проводимости. В настоящее время в основном применяются кремневые полупроводниковые диоды.

Для работы выпрямителей принципиальное значение имеет характер нагрузки, включённой на выходе выпрямителя, т. е. схема сглаживающего фильтра.

Выпрямители, работающие на фильтр, начинающийся с ёмкости (с ёмкостной реакцией), используются в широком диапазоне выпрямленных напряжений и мощностей. Трансформаторы этих выпрямителей имеют большую габаритную мощность по сравнению с выпрямителями с индуктивным фильтром. К недостаткам выпрямителей с ёмкостным фильтром относится большая амплитуда тока через диод.

Выпрямители без сглаживающего фильтра применяются в тех случаях, когда пульсация напряжения на нагрузке не имеет существенного значения. Сглаживающий фильтр также часто отсутствует в схемах многофазных выпрямителей, имеющих малую пульсацию выпрямленного напряжения.

1 Проектирование стабилизатора

В качестве НКСН возьмём окончательный каскад источника вторичного электропитания¹, который должен удовлетворять следующим техническим требованиям: $U_n = 5 \text{ В}$; $I_n = 5 \text{ А}$; $\delta U_n = \pm 2\%$; $\delta U_{\text{п}} = +15 / - 10\%$; $U_{m \text{ пульс н}} = 0.1 \text{ В}$; $U_{m \text{ пульс н}} = 5 \text{ мВ}$; $\Delta U_n = 0,1 \text{ мВ}$; $f_{\text{пульс}} = 100 \text{ Гц}$; $T = 0 \div 30^\circ \text{С}$.

1.1 Анализ требований технического задания

Анализ требований данного задания показывает, что стабилизатор должен иметь довольно высокие коэффициенты фильтрации и стабилизации, достаточно жёстко ограниченные параметры переходного процесса. Подлежит решению проблема обеспечения устойчивости. Не предъявлены специальные требования к ограничению технологического разброса параметров элементов, под воздействием различных возмущений изменения параметров должны быть учтены при обеспечении статических и динамических характеристик НКСН.

1.2 Выбор функционально-необходимой части

Для уменьшения энергетических потерь выбирается схема с последовательным включением РЭ (регулирующий элемент), поскольку она более экономична, чем схема с параллельным включением РЭ. В качестве схемы управления регулирующим элементом принимается серийный операционный усилитель, а в качестве источника эталонного напряжения — параметрический стабилизатор напряжения.

1.3 Расчёт регулирующего элемента

При статическом расчёте по току нагрузки I_n и максимальному напряжению питания $U_{\text{п max}}$ определяются количество и тип РЭ [1]². При этом основным критерием при выборе количества, как и при выборе режима их работы, является минимизация электрических потерь в РЭ. Помимо этого в статический расчёт входит выбор элементов источника эталонного напряжения, сопротивлений резисторов цепи ООС, определяется коэффициент усиления ОУ, необходимый для стабилизации, фильтрации, выходного сопротивления. Статический расчёт проводится в следующем порядке.

Выберем количество и тип транзисторов РЭ. Ток коллектора окончательного транзистора

$$I_k = I_n(1 + \delta_y), \quad (1)$$

¹Методика расчёта приведена под конкретные требования к НКСН, и может существенно отличаться от расчёта источника по другим требованиям. Поэтому данным руководством следует пользоваться только как примерным планом и указанием каким источником пользоваться при расчёте того или иного параметра НКСН

²Здесь и далее будут приводиться источники литературы, где можно найти дополнительную информацию по расчётам

где $\delta_y = 0,05$, так как предполагается, что вспомогательные цепи управления увеличивают ток нагрузки коллектора транзистора РЭ на 5%:

$$I_k = 5 \cdot (1 + 0,05) = 5,25 \text{ А.}$$

Количество транзисторов в РЭ при выбранном типе операционного усилителя (ОУ) определяется следующим образом:

$$n - 1 = \frac{\lg \left(\frac{I_n}{I_{OY} \cdot h_{21ЭP1}} \right)}{\lg h_{21ЭPn}}, \quad (2)$$

где

$$h_{21ЭPi} = h_{21Э0} \cdot H_i;$$

$$H_i = 1 + 0,92m_p - e^{-0,2(1+m_p)};$$

m_p — расчётный коэффициент, выбираемый из интервала $[0 \div 4]$ (для $m_p = 4$ $h_{21ЭP} = h_{21Э0}$);

I_{OY} — выходной ток ОУ;

$h_{21Э0}$ — типовой (расчётный) статический коэффициент передачи тока транзистора;

i — порядковый номер транзистора.

Принимая $I_{OY} = 8 \text{ мА}$, $h_{21Э01} = 20$ (для мощных транзисторов), $h_{21Э02} = 50$ (для транзисторов малой и средней мощности) и выбирая для всех транзисторов $m_p = 1$, поскольку чем меньше m_p , тем выше КПД НКСН, получаем:

$$H = 1 + 0,092 \cdot 1 - e^{-0,2(1+1)} = 0,42;$$

$$h_{21ЭP1} = 8,4; h_{21ЭP2} = 21.$$

Для дальнейших расчётов принимаем количество транзисторов в РЭ $n = 2$. Напряжение на РЭ (если применяются транзисторы одного типа проводимости) равно:

$$U_{PЭ} = U_{KЭ}(1 + m_p) + (n - 1)U_{БЭ}, \quad (3)$$

где $U_{KЭ}$, $U_{БЭ}$ — напряжение коллектор-эмиттер и напряжение база-эмиттер. Для $U_{KЭ} = 1,8 \text{ В}$ и $U_{БЭ} = 0,7 \text{ В}$:

$$U_{PЭ} = 1,8 - (1 + 1) + 1 - 0,7 = 4,3 \text{ В.}$$

Минимально необходимое напряжение источника питания:

$$U_{Пmin} = U_{П} + U_{PЭmin} + U_{импульс}, \quad (4)$$

$$U_{Пmin} = 5 + 4,3 + 0,1 = 9,4 \text{ В.}$$

С учётом допуска на изменения напряжения питания номинальный и максимальный уровни составляют:

$$U_{Пном} = \frac{U_{Пmin}}{1 - \delta U_{Пmin}} = \frac{9,4}{1 - 0,1} = 10,4 \text{ В}$$

$$U_{Пmax} = U_{Пном} \cdot (1 + \delta U_{Пmax}) = 10,4 \cdot (1 + 0,15) = 11,96 \text{ В} \approx 12 \text{ В.}$$

Поскольку на выходе стабилизатора может быть включён конденсатор, то в момент включения всё напряжение источника питания будет приложено к РЭ. Поэтому выбор окончательного транзистора производится по $U_{Пmax}$ и I_{Kmax} :

$$I_{Kmax} = (1,5 \div 2)I_k = 9 \text{ А.}$$

Выбираем транзистор КТ927В с параметрами [2] $I_{к\max} = 10\text{ А}$, $U_{кэ} = 35\text{ В}$, $h_{21эР1} = 40 \div 100$. Для дальнейших расчётов принимаем $h_{21эР1} = 40$.

Второй транзистор РЭ выбираем по $U_{п\max}$ и соотношению $I_{к\max}/h_{21эР}$ предыдущего транзистора

$$\frac{I_{к\max}}{h_{21эР1}} = \frac{10}{40} = 0,25\text{ А.}$$

Выбираем транзистор КТ630Б с параметрами $I_{к\max} = 1\text{ А}$, $U_{кэ} = 120\text{ В}$, $h_{21э2} = 80 \div 240$. Для дальнейших расчётов принимаем $h_{21эР2} = 80$. Определяем коэффициент усиления РЭ по напряжению (с учётом параметров транзисторов РЭ в режиме, близком к граничному: $m_p = 1$; $r_k = 10\text{ Ом}$; $R_n \gg r_{э}, (R_n + r_{э}) h_{21э} > r_{б}$):

$$K_{РЭВ} \approx \frac{r_{к1}}{R_n}. \quad (5)$$

$$K_{РЭВ} = \frac{10}{1} = 10.$$

При таком режиме работы мощность рассеяния указанных транзисторов будет велика, что потребует достаточно большой поверхности теплоотвода.

Для транзистора КТ927В выбираем ребристый радиатор, т. к. у него большая площадь поверхности. Пусть радиатор имеет следующие параметры: количество ребер $n = 16$; шаг ребер $a = 0,01\text{ м}$; толщина ребер $b = 0,001\text{ м}$; высота ребра радиатора $H_1 = 0,03\text{ м}$; высота радиатора $D = 0,13\text{ м}$; толщина основания $h = 0,006\text{ м}$; степень черноты $\epsilon = 0,9$; средняя поверхностная температура радиатора $T_p = 85^\circ\text{С}$. Температура ОС $T_c = 30^\circ\text{С}$. Проведем проверочный расчет на предмет того, будет ли указанный радиатор рассеивать мощность $22,6\text{ Вт}$ [3].

1. Определим площади частей радиатора

$$\begin{aligned} S_1 &= (n - 1) \cdot a \cdot D = 0,0195\text{ м}^2; \\ S_2 &= 2(n - 1) \cdot H_1 \cdot D = 0,117\text{ м}^2; \\ S_3 &= 2(H_1 + h) \cdot D = 0,00936\text{ м}^2; \\ S_4 &= (D + 2H_1) \cdot n \cdot b + 2 \cdot h \cdot B = 0,0049\text{ м}^2; \\ S_5 &= B \cdot D = 0,0196\text{ м}^2. \end{aligned}$$

2. Средняя арифметическая температура:

$$T_m = \frac{(T_c + T_p)}{2} = \frac{(30 + 85)}{2} = 57,5^\circ\text{С.}$$

3. Температура ОС между ребрами $66,036^\circ\text{С}$.

4. Коэффициент теплообмена конвекцией

$$\begin{aligned} \alpha_{к1,2} &= 4,83\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \\ \alpha_{к3,4,5} &= 4,832\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

5. Коэффициент теплообмена излучением

$$\begin{aligned} \alpha_{л1,2} &= 0,312\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \\ \alpha_{л3,4,5} &= 8,429\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

6. Общая рассеиваемая мощность $P = 23,93\text{ Вт}$. Таким образом, выбранный радиатор обеспечивает рассеивание заданной мощности в $22,6\text{ Вт}$.

1.4 Расчёт источника эталонного напряжения

Рассчитывается требуемый ТКН стабилизатора $\mu_{\text{эт}}$ при условии, что температурные изменения выходного напряжения НКСН определяется стабилизатором эталонного источника напряжения [1]

$$\mu_{\text{эт}} = \frac{2\delta U_{\text{н}}}{c_{\text{в}}\Delta T} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $c_{\text{в}}$ — весовой коэффициент, определяющий степень воздействия температуры окружающей среды ($\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ — диапазон её изменения) на выходное напряжение стабилизатора. Для $c_{\text{в}} = 1$ получаем

$$\mu_{\text{эт}} = \frac{2 \cdot 0,025}{1 \cdot 30} \cdot 100\% \approx 0,167\%/^{\circ}\text{C}.$$

По ТКН и условию $U_{\text{ст max}} \leq U_{\text{н}}$ выбираем стабилизатор типа КС139А с характеристиками [4] $\mu_{\text{ст ном}} = -0,10\%/^{\circ}\text{C}$, $I_{\text{ст ном}} = 10\text{ мА}$, $U_{\text{ст ном}} = 3,9\text{ В} \pm 10\%$, $r_{\text{диф}} = 60\text{ Ом}$.

Определяем сопротивление балластного резистора

$$R_{\text{б}} = \frac{U_{\text{н}} - U_{\text{ст max}}}{I_{\text{ст ном}}}. \quad (7)$$

Подставляя значения $I_{\text{ст ном}} = 10\text{ мА}$, $U_{\text{ст max}} = 4,29\text{ В}$, $U_{\text{н}} = 5\text{ В}$ в уравнение (7), получим следующее значение сопротивления балластного резистора:

$$R_{\text{б}} = \frac{5 - 4,29}{10 \cdot 10^{-3}} = 71\text{ Ом}.$$

Мощность, рассеиваемая на этом резисторе

$$P_{\text{б}} = I_{\text{ст}}^2 \cdot R_{\text{б}} = 0,01^2 \cdot 71 = 7,1 \cdot 10^{-5}\text{ Вт}.$$

По справочнику [5] выбираем резистор типа С2-23 мощностью 0,062 Вт и сопротивлением 71 Ом.

По значению $U_{\text{н}}$ и $U_{\text{ст ном}}$ определяется коэффициент передачи цепи ООС по напряжению

$$\beta_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ст ном}}}{U_{\text{н}}} = \frac{3,9}{5} = 0,78.$$

1.5 Расчёт усилителя сигнала рассогласования

Определяется коэффициент усиления ОУ по требованиям к коэффициенту стабилизации и выходному сопротивлению стабилизатора [1]

$$K\beta_{\text{ОС}} = \max \left\{ a_{\text{в}} \cdot \frac{\delta U_{\text{п}} \cdot U_{\text{п}}}{\delta U_{\text{н}} \cdot U_{\text{н}} \cdot K_{\text{РЭВ}}}; \quad b_{\text{в}} \cdot \frac{\Delta I_{\text{н}} (h_{21\text{ЭР1}} \cdot r_{\text{Э}} + R_{\text{y}} + r_{\text{Б}})}{\Delta U_{\text{н}} \cdot h_{21\text{ЭР1}}} \right\} \quad (8)$$

где $a_{\text{в}}$ и $b_{\text{в}}$ — весовые коэффициенты, связанные соотношением:

$$\frac{1}{a_{\text{в}}} + \frac{1}{b_{\text{в}}} = 1 - \frac{1}{c_{\text{в}}}, \quad (9)$$

и выбираемые так, чтобы значение $K\beta_{\text{ОС}}$ (коэффициент передачи разомкнутого контура), рассчитываемое по выражениям в фигурных скобках, было примерно одинаковым;

R_{y} — выходное сопротивление цепи управления регулирующим элементом:

$$R_{\text{y}} = \frac{R_{\text{вых ОУ}}}{\prod_{i=2}^n h_{21\text{ЭР}i}}, \quad (10)$$

$R_{\text{вых ОУ}}$ — выходное сопротивление выбранного ОУ. Если в схеме выпрямителя отсутствует составной транзистор, т. е. $n = 1$, то $R_y = R_{\text{вых ОУ}}$.

Подставив $a_b = 70$, $b_b = 20$ и (10) в (8), получим:

$$K\beta_{\text{ОС}} =$$

$$= \max \left\{ 70 \cdot \frac{0,15 \cdot 10,4}{0,02 \cdot 5 \cdot 10}; 20 \cdot \frac{0,5 \left(40 \cdot 0,5 + \frac{400}{80^2} + 2 \right)}{0,01 \cdot 40} \right\} \approx$$

$$\approx \max \{109; 110\} = 110.$$

Коэффициент усиления ОУ определяется из следующего соотношения

$$K_{\text{ОУ}} = \frac{K\beta_{\text{ОС}}}{\beta_{\text{ОС}}}, \quad (11)$$

$$K_{\text{ОУ}} = \frac{110}{0,78} \approx 142.$$

По $K_{\text{ОУ}}$ выбирается ОУ типа К140УД6 с параметрами: $K_{\text{ОУ}} = 30000$; $U_{\text{н}} = \pm (5 \div 20)$ В; $I_{\text{ном}} = 3$ нА; $I_{\text{вх}} = 100$ нА; $\Delta I_{\text{вх}} = 25$ мА; $\Delta \Delta I_{\text{вх}} = 0,1$ нА/°С (температурное изменение разности входных токов); $U_{\text{др пр}} = 30$ мкВ/°С. Определяем сопротивления резисторов в цепях смещения ОУ и ООС:

$$R_1 = \frac{U_{\text{ст}}}{q_d I_{\text{вх}}}; \quad (12)$$

$$R_2 = \frac{U_{\text{н}}}{q_d I_{\text{вх}}} - R_1, \quad (13)$$

где I_d — ток делителя $R_1 R_2$;

$$q_d = I_d / I_{\text{вх}} = 5 \div 200. \quad (14)$$

Подставив $q_d = 100$ в (12) и (13) получим:

$$R_1 = \frac{3,9}{100 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 390 \text{ кОм};$$

$$R_2 = \frac{5}{100 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} - 390 \cdot 10^3 = 110 \text{ кОм},$$

Для выбора резисторов рассчитаем их номинальные мощности:

$$P_1 = R_1 \cdot I_d^2 = 390 \cdot 10^3 \cdot (1 \cdot 10^{-5})^2 = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ Вт};$$

$$P_2 = R_2 \cdot I_d^2 = 110 \cdot 10^3 \cdot (1 \cdot 10^{-5})^2 = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}.$$

Выбираем резисторы с параметрами [5]

R_1 : С2-23, $P = 0,062$ Вт, $R = 390$ кОм;

R_2 : С2-23, $P = 0,125$ Вт, $R = 110$ кОм.

Уточним изменение выходного напряжения НКСН при воздействии температуры окружающей среды с учётом температурного дрейфа характеристик ОУ

$$\delta U_{\text{нточ}} = S_U A, \quad (15)$$

где

$$A \approx \frac{R_6}{R_6 + R_y} \frac{\Delta E_{\text{см}}}{U_{\text{н}}} + \frac{\Delta U_{\text{др пр}}}{U_{\text{н}}} + \frac{R_1 \cdot \Delta \Delta I_{\text{вх}}}{U_{\text{н}}}; \quad (16)$$

$$S_U = \frac{(R_1 + R_2)(R_6 + R_y)}{R_1 R_6 - R_2 R_c}; \quad (17)$$

$$R_c = r_{\text{диф}}; \quad (18)$$

$$\Delta U_{\text{др пр}} = U_{\text{др пр}} \cdot \Delta T; \quad (19)$$

$$\Delta E_{\text{см}} = \mu_{\text{ст}} \cdot U_{\text{ст}} \cdot \Delta T \cdot 10^{-2}. \quad (20)$$

при этом должно выполняться условие:

$$\delta U_{\text{н точ}} < \frac{\delta U_{\text{н}}}{c_{\text{в}}}, \quad (21)$$

Для $r_{\text{диф}} = 60 \text{ Ом}$ условие выполняется. Если бы условие (21) не выполнялось, то необходимо увеличить $K_{\text{ОУ}}$ или R_1 .

1.6 Определение ёмкости выходного конденсатора

Уточняется коэффициент передачи разомкнутого контура по требованию к подавлению пульсаций источника питания. При этом решается вопрос о необходимости включения в выходную цепь НКСН конденсатора большой ёмкости.

Из предварительного расчёта следует, что для обеспечения допустимых изменений выходного напряжения стабилизатора в установившемся режиме (при медленных изменениях возмущений со стороны источника питания, потребителя и температуры окружающей среды) требуется коэффициент передачи разомкнутого контура не менее 110. Для заданного подавления пульсаций источника питания требуемое значение $K\beta_{\text{ОС}}$ должно быть не менее 20:

$$K_{\text{ф}} = \frac{U_{m \text{ пульс п}}}{U_{m \text{ пульс н}}} = \frac{0,1}{5 \cdot 10^{-3}} = 20.$$

Так как подавление пульсаций осуществляется контуром регулирования, то необходимость крупногабаритного конденсатора как элемента пассивного фильтра отпадает.

2 Расчёт выпрямителя с ёмкостным фильтром

Расчёт выпрямителя с ёмкостным фильтром сводится к выбору схемы и типа диодов, расчёту режима работы диодов, определению параметров трансформатора и сглаживающего фильтра [3].

2.1 Выбор и расчёт схемы выпрямителя

Выбор схемы выпрямителя с ёмкостным фильтром зависит от ряда факторов, которые должны учитываться в зависимости от требований, предъявляемых к выпрямительному устройству. К таким факторам относятся выпрямленное напряжение и мощность, частота пульсации выпрямленного напряжения, число диодов, обратное напряжение на диоде, коэффициент использования мощности трансформатора, напряжение вторичной обмотки.

Выбираем однофазную мостовую схему. Схема характеризуется высоким коэффициентом использования мощности и поэтому используется в устройствах повышенной мощности при выходных напряжениях от десятков до сотен вольт.

$$I_{\text{пр ср}} = \frac{I_0}{2} = \frac{5,25}{2} = 2,625 \text{ А};$$

$$U_{\text{обр } u} \approx 1,5U_0 = 1,5 \cdot 10,4 = 15,6 \text{ В}.$$

По полученным значениям $I_{\text{пр ср}}$ и $U_{\text{обр } u}$ выбираем диоды КД202А с параметрами: $I_{\text{пр ср}} = 3,5 \text{ А}$, $U_{\text{обр } u} = 50 \text{ В}$, $U_{\text{пр}} = 0,9 \text{ В}$.

Дифференциальное (внутреннее) сопротивление диода можно определить по приближительной формуле

$$r_{\text{диф}} \approx \frac{U_{\text{пр}}}{3I_{\text{пр ср}}} = \frac{0,9}{3 \cdot 3,5} \approx 0,09 \text{ Ом}.$$

Мощность, рассеиваемая на каждом диоде равна

$$P_{\text{д}} = I_{\text{пр ср}} \cdot U_{\text{пр}} = 3,5 \cdot 0,9 = 3,15 \text{ Вт}.$$

В соответствии с рекомендациями для диодов выбираем алюминиевый пластинчатый радиатор толщиной 3 мм, работающий в условиях естественной конвекции. Из-за сложностей изолирования диодов от радиаторов каждый диод установлен на отдельный радиатор, который изолируется от корпуса при сборке устройства. Степень черноты радиатора $\epsilon = 0,9$; высота пластины $D = 0,04 \text{ м}$.

Для $D = 0,04 \text{ м}$ по графику [3] определяем коэффициент неравномерности температуры $g = 0,99$. Допустимая средняя поверхностная температура радиатора $T_p = 128,7^\circ\text{C}$; перегрев радиатора $98,7^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплообмена конвекцией $\alpha_{\text{к}} = 8,05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Коэффициент теплообмена излучением $\alpha_{\text{л}} = 10,26 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Суммарный коэффициент теплообмена $\alpha = 19,45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

Площадь теплоотдающей пластины радиатора $0,00187 \text{ м}^2$. Размеры пластины радиатора для каждого диода $D : B : S = 40 : 20 : 3 \text{ мм}$. В центре пластины необходимо сделать отверстие с диаметром 5,5 мм и закрепить в нем диод с помощью шайбы и гайки М5.

До расчёта трансформатора по приближённой формуле (для выпрямленных токов не менее 20 мА) можно определить сопротивление обмоток трансформатора, приведённое к фазе вторичной обмотки:

$$r_{\text{т}} = k_{\text{т}} \frac{U_0}{I_0 \cdot f_c \cdot B_{\text{т}}} \cdot \sqrt[4]{\frac{s \cdot f_c \cdot B_{\text{т}}}{U_0 \cdot I_0}}, \quad (22)$$

где $k_{\text{т}}$ — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя, $k_{\text{т}} = 3,5$;

s — число стержней трансформатора, несущих обмотки. Для трансформатора с магнитопроводом броневого типа $s = 1$;

$B_{\text{т}}$ — магнитная индукция в магнитопроводе трансформатора, $B_{\text{т}} = 1,6 \text{ Тл}$;

$U_0 = U_{\text{н ном}}$ — номинальное напряжение источника питания;

f_c — частота питающей сети:

$$f_c = \frac{f_{\text{пульс}}}{m} = \{m = 2\} = \frac{100}{2} = 50 \text{ Гц}.$$

Тогда:

$$r_{\text{т}} = 3,5 \frac{10,4}{5,25 \cdot 50 \cdot 1,6} \cdot \sqrt[4]{\frac{1 \cdot 50 \cdot 1,6}{10,4 \cdot 5,25}} \approx 0,095 \text{ Ом}.$$

Индуктивность рассеяния обмоток трансформатора, приведённую к фазе вторичной обмотки, определим по формуле:

$$L_s = R_L \frac{s \cdot U_0}{(p-1)^2 \cdot I_0 \cdot f_c \cdot B_T} \cdot \sqrt[4]{\frac{U_0 \cdot I_0}{s \cdot f_c \cdot B_T}}, \quad (23)$$

где R_L — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя, $R_L = 0,05$;
 p — число чередующихся секций обмоток, если вторичная обмотка наматывается после первичной (или наоборот), $p = 2$.

$$L_s = 0,05 \frac{1 \cdot 104}{(2-1)^2 \cdot 5,25 \cdot 50 \cdot 1,6} \cdot \sqrt[4]{\frac{10,4 \cdot 5,25}{1 \cdot 50 \cdot 1,6}} \approx 0,003.$$

Определим тангенс угла φ , характеризующего соотношение между индуктивным и активным сопротивлениями фазы выпрямителя:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{2\pi f_c L_s}{r} \right), \quad (24)$$

где $r = 2r_{\text{диф}} + r_T = 2 \cdot 0,09 + 0,095 = 0,275$ Ом.

$$\varphi = \arctg \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,001}{0,275} \right) \approx \arctg(114) = 49^\circ.$$

Определим основной расчётный коэффициент A_0 :

$$A_0 = \frac{I_0 r}{m U_0},$$

где m — число фаз выпрямления, которое равно числу импульсов тока через ёмкость фильтра C_0 за период.

$$A_0 = \frac{5,25 \cdot 0,275}{2 \cdot 10,4} = 0,07.$$

Считая угол $\varphi = 45^\circ$, по графикам [3] находим вспомогательные коэффициенты $B_0 = 1,16$, $D_0 = 1,88$, $F_0 = 4,52$. Находим коэффициент H_{02} (по φ , A_0 , $m = 2$): $H_{02} = 14000$.

Определим ЭДС фазы вторичной обмотки трансформатора E_2 по формуле

$$E_2 = B_0 \cdot E_0,$$

где $E_0 = U_0$.

$$E_2 = 1,16 \cdot 10,4 = 12,06 \text{ В.}$$

Уточним значение обратного напряжения по более точной формуле

$$U_{\text{обрн}} = \sqrt{2} E_2 = \sqrt{2} \cdot 12,06 \approx 17,06 \text{ В.}$$

Уточнённое напряжение прямого импульсного тока

$$I_{\text{прн}} = \frac{I_0 F_0}{2} = \frac{5,25 \cdot 4,52}{2} = 11,87 \text{ А.}$$

Действующее значение тока вторичной обмотки рассчитаем по формуле

$$I_2 = D_0 \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 1,88 \cdot \frac{5,25}{\sqrt{2}} \approx 6,98 \text{ А.}$$

Входную ёмкость фильтра C_0 , мкФ определяем по формуле

$$C_0 = \frac{H_{02}}{rf_c k_{\text{по1}}} \cdot 100, \quad (25)$$

где $k_{\text{по1}}$ — коэффициент пульсаций на входе фильтра, который во избежание необходимости применения конденсаторов очень большой ёмкости рекомендуется выбирать не менее 2-3%, но и не более 10% чтобы не возростала ошибка при определении параметров выпрямителя.

Для $k_{\text{по1}} = 10\%$:

$$C_0 = \frac{14000}{0,275 \cdot 50 \cdot 10} \cdot 100 = 10180 \text{ мкФ}.$$

Амплитуда пульсаций первой гармоники:

$$U_{01\sim} = \frac{k_{\text{по1}} U_0}{100}; \quad (26)$$

$$U_{01\sim} = \frac{10 \cdot 10,4}{100} = 1,04 \text{ В}.$$

Рабочее напряжение конденсатора должно быть не менее

$$U_c = \sqrt{2} E_2 = \sqrt{2} \cdot 12,06 \approx 15 \text{ В}.$$

Выбираем три конденсатора К50-24 с параметрами $U = 15 \text{ В}$, $C = 4700 \text{ мкФ}$, включённых параллельно [6].

Определим коэффициент трансформации

$$n = \frac{E_2}{U_1} = \frac{12,06}{220} \approx 0,055.$$

Действующее значение тока первичной обмотки трансформатора (без учета тока холостого хода) определим как

$$I_1 = n \cdot I_2 = 0,055 \cdot 6,98 \approx 0,384 \text{ А}.$$

2.2 Расчёт однофазного трансформатора

Исходными данными для расчёта трансформатора являются: назначение, условия работы и требуемый срок службы; напряжение и частота питающей сети, электрическая схема трансформатора; действующие напряжения вторичных обмоток; допустимые напряжения короткого замыкания U_K или наличие тока холостого хода I_{0X} (при наличии ограничений по этим параметрам) [3].

Расчёт трансформатора состоит из следующих этапов: выбор конструктивного исполнения, типа магнитопровода, расчётных критериев; расчёт габаритной мощности, определение типоразмера магнитопровода; выбор электромагнитных нагрузок: индукции, плотности тока; электрический расчёт трансформатора.

2.2.1 Расчёт габаритной мощности

Габаритная мощность ТММ определяется в зависимости от электрической схемы рассчитываемого трансформатора. Для ТММ преобразователей напряжения при работе на выпрямитель:

$$P_r = \frac{\sum P_2}{2\psi} (1 + \psi); \quad (27)$$

$$P_2 = E_2 \cdot I_2; \quad (28)$$

$$\psi = \eta_T \cdot \cos \varphi \approx \eta_T, \quad (29)$$

где $\sum P_2 = P_2$ — суммарная выходная мощность;

η_T — КПД трансформатора, который выбирается по графику в зависимости от суммарной выходной мощности.

Для $P_2 = 12,06 \cdot 6,98 = 84,2 \text{ В} \cdot \text{А}$ $\eta_T = 0,87$. Подставив эти значения в формулу (27), получим:

$$P_T = \frac{84,2}{2 \cdot 0,87} (1 + 0,87) \approx 90,49 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

2.2.2 Выбор типоразмера магнитопровода

По найденному значению габаритной мощности и заданным условиям расчёта ($f_c = 50 \text{ Гц}$) выбираем типоразмер магнитопровода ШЛ20×40.

Трансформатор броневое типа $f = 350 \text{ Гц}$; $\Delta T_{\text{ксп}} = 55^\circ \text{C}$; сталь 3412(Э320) с толщиной $\delta = 0,35 \text{ мм}$; $a = 20 \text{ мм}$; $b = 40 \text{ мм}$; $c = 20 \text{ мм}$.

Для магнитопровода ШЛ20×40:

$W_0 = 4,3 \text{ виток/В}$ — число витков на 1 вольт ЭДС, индуцируемой в обмотке трансформатора;

$U_k = 8,0\%$ — напряжение короткого замыкания;

$j = 2,6 \text{ А/мм}^2$ — плотность тока.

2.2.3 Электрический расчет трансформатора

Падение напряжения в обмотках определяется по формуле

$$U_k \approx U_{ka} = 0,01 j \rho k_{cx} W_0 l_W, \quad (30)$$

где $k_{cx} = 2$ — коэффициент, характеризующий схемное выполнение обмоток ТММ. Коэффициент характеризует отношение выходной мощности обмоток без средней точки к суммарной выходной мощности;

$\rho = \rho_0 [1 + 0,004 (T - T_0)]$ — удельное сопротивление провода обмотки. Для меди ($T_0 = 15^\circ \text{C}$; $T = 30^\circ \text{C}$; $\rho_0 = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$;

l_W — коэффициент, который рассчитывается по следующей формуле:

$$l_W = a \cdot \Phi_{iW} = a \cdot \left(\frac{\pi c}{a} + \frac{2b}{a} + 2 \right) \approx 182,8.$$

Подставив найденные значения в формулу (30), получим:

$$U_k = 0,01 \cdot 2,6 \cdot 0,018 \cdot 2 \cdot 3,9 \cdot 182,8 \approx 0,7 \text{ В}.$$

Число витков первичной W_1 и вторичной W_2 обмоток

$$W_1 = W_0 \cdot U_1 \cdot \left(1 - \frac{U_k}{2} \right) = 3,9 \cdot 220 \cdot \left(1 - \frac{0,085}{2} \right) = 829;$$

$$W_2 = W_0 \cdot U_2 \cdot \left(1 - \frac{U_k}{2} \right) = 3,9 \cdot 12,09 \cdot \left(1 - \frac{0,085}{2} \right) = 49.$$

Сечение q_i и диаметр d_i провода i -й обмотки определяются по формуле:

$$q_i = \frac{I_i}{j}; \quad (31)$$

$$d_i = 1,13 \cdot \sqrt{q_i}. \quad (32)$$

Подставив ранее найденные значения токов обмоток I_i в формулу (31), получим:

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{I_1}{j} = \frac{0,384}{2,6} \approx 0,15 \text{ мм}^2; \\ d_1 &= 1,13 \cdot \sqrt{q_1} = 1,13 \cdot \sqrt{0,15} \approx 0,43 \text{ мм}; \\ q_2 &= \frac{I_2}{j} = \frac{6,98}{2,6} \approx 2,69 \text{ мм}^2; \\ d_2 &= 1,13 \cdot \sqrt{q_2} = 1,13 \cdot \sqrt{2,69} \approx 1,85 \text{ мм}. \end{aligned}$$

На основании расчётных данных выбираем марку обмоточного провода — ПЭВ-2 (провод медный, круглого сечения, изолированный лаком ВЛ-931, с изоляцией нормальной толщины). Диаметр провода по меди, сечение провода и диаметр провода с изоляцией:

- для первичной обмотки: $d_1 = 0,44$ мм; $q_1 = 0,15$ мм²; $d_{\text{и1}} = 0,5$ мм;
- для вторичной обмотки: $d_1 = 1,88$ мм; $q_1 = 2,776$ мм²; $d_{\text{и1}} = 3$ мм.

3 Особенности конструкции спроектированного стабилизатора

Спроектированный стабилизатор напряжения имеет $U_c = 220$ В и $U_n = 5$ В и состоит из понижающего трансформатора с типоразмером магнитопровода ШЛ20×40, выпрямительного моста на диодах, ёмкостного фильтра и блока стабилизации, выполненного на микросхеме К140УД6.

На выходе вторичной обмотки трансформатора $I_2 = 6,98$ А и $U_2 = 12,06$ В, что соответствует входным параметрам диодного моста. Диодный мост состоит из четырёх диодов типа КД202А. Данный тип диодов имеет параметры, соответствующие расчётным $U_{\text{обр}u} = 50$ В, $I_{\text{пр}cp} = 3,5$ А.

Для сглаживания токовых пиков в схему включён ёмкостный фильтр. Имея амплитуду пульсаций напряжения источника питания $U_{m \text{пульс п}} = 0,1$ В и $U_{\text{п min}} = 9,4$ В получаем коэффициент пульсаций:

$$\frac{U_{m \text{пульс п}}}{U_{\text{п min}}} \cdot 100\% \approx 1\%.$$

Для подавления пульсаций первичного источника питания необходим фильтр, состоящий из трёх конденсаторов марки К50-24-4700 мкФ × 15 В.

В соответствии с током нагрузки $I_n = 5$ А в цепь включили мощный транзистор VT1 марки КТ927В. Мощность рассеяния данного транзистора велика $P_p = U_{\text{рЭ}} I_k = 4,3 \cdot 5,25 = 22,6$ Вт, что требует установки ребристого радиатора.

Блок стабилизации смонтирован на разъёмной плате. В качестве разъёма выбран разъём марки СН053-20, имеющий 20 выводов, что полностью соответствует спроектированной плате. На плате размещаются:

- транзистор средней мощности марки КТ630Б (коэффициент усиления РЭ по напряжению с учётом параметров транзисторов в режиме, близком к граничному $K_{\text{рЭв}} = 10$);
- стабилитрон марки КС139А с $\mu_{\text{ст ном}} = -0,1\%/^{\circ}\text{C}$ и $U_{\text{ст ном}} = 3,9$ В;
- балластный резистор $R_6 = R_1 = 71$ Ом марки С2-23-0,062-71 Ом ±5%;
- микросхема К140УД6, выполняющая роль усилителя сигнала рассогласования, имеет $K_{\text{ОУ}} = 30000$;

- резисторы, входящие в цепи смещения ОУ и ООС ($\beta_{OC} = 0,78$):
 - $R2$ марки С2-23-0,062-390 кОм $\pm 5\%$;
 - $R3$ марки С2-23-0,062-110 кОм $\pm 5\%$;
- конденсаторы $C1 - C3$ марки К5О-24-4700 мкФ $\times 15$ В.

4 Принцип работы спроектированного стабилизатора

Понижающий трансформатор подает на вход выпрямительного моста переменное напряжение $U \approx 12$ В. С выпрямителя на вход блока стабилизации поступает выпрямленное напряжение $U_0 \approx 10,4$ В.

При изменении стабилизированного напряжения $U_n = 5$ В на величину $\Delta U_n = 0,1$ мВ происходит пробой стабилитрона КС139А и через него идёт ток $I_{cmном} = 10$ мА. Операционный усилитель К140УД6 усиливает положительное напряжение, в результате чего закрывается транзистор $VT2$, который управляет выходным транзистором $VT1$. При закрытии $VT2$ закрывается $VT1$, в результате чего напряжение U_n на выходе стабилизатора понижается до тех пор, пока не станет равным величине $U_n = 5$ В. При понижении напряжения на нагрузке U_n на величину $\Delta U_n = 0,1$ мВ стабилитрон закрывается, ОУ усиливает отрицательное напряжение и выдаёт его на базу $VT2$, в результате чего транзистор $VT1$ открывается, что приводит к увеличению U_n . Таким образом происходит поддержание $U_n = 5$ В на выходе стабилизатора.

Список литературы

1. Источники вторичного электропитания / Букреев С.С., Головацкий В.А., Гулякович Г.Н. и др.; Под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1983. — 280 с.
2. Полупроводниковые приборы: транзисторы. Справочник / Аронов В.Л., Баюков А.В., Гицкевич А.Б. и др.; Под ред. Н.Н. Горюнова. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 904 с.
3. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Найвельт Г.С., Надель К.Б., Хусаинов Р.И. и др.; Под ред. Г.С. Найвельта. — М.: Радио и связь, 1983. — 576 с.
4. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник / Аронов В.Л., Баюков А.В., Гицкевич А.Б. и др.; Под ред. Н.Н. Горюнова. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 744 с.
5. Резисторы: Справочник / Андреев Ю.Н., Антонин А.И., Иванов Д.М. и др.; Под ред. И.И. Четверткова. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 352 с.
6. *Г.А., Горячева.* Конденсаторы: Справочник / Горячева Г.А., Доброммыслов Е.Р. — М.: Радио и связь, 1984. — 88 с.

А Варианты заданий для курсовой работы

Ниже приведены варианты заданий для выполнения курсовой работы. Таблица 1— данные для транзисторной схемы управления РЭ, таблица 2— для схемы управления на ОУ.

Таблица 1: Транзисторная схема управления РЭ

№ вар.	$U_c, В$	$f_c, Гц$	$a_c, \%$	$b_c, \%$	$U_H, В$	$U_H^{max}, В$	$U_H^{min}, В$	$I_H^{max}, А$	$I_H^{min}, А$	$t_{окр}^{max}, С$	$t_{окр}^{min}, С$	$K_{ст}$	r_H	$U_{пул}, мВ$	$\gamma_H, мВ/°С$
1	220	50	10	15	15	18	13	1,5	0	60	-60	> 300	< 0,2	5	< 5
3	120	500	15	15	27	32	24	0,8	0	60	-60	> 400	< 0,1	2	< 3
5	220	50	10	10	20	23	18	1,5	0,1	60	-60	> 350	< 0,1	3	< 10
7	40	1000	10	10	6	8	5	1,2	0,5	60	-60	> 100	< 0,1	10	< 15
9	220	50	10	15	34	40	30	0,5	0,1	60	-60	> 300	< 0,2	5	< 5
11	36	400	10	15	12	15	10	1,8	0	60	-60	> 400	< 0,2	10	< 10
13	220	50	10	15	54	60	50	0,3	0	60	-60	> 100	< 0,1	5	< 5
15	220	50	10	15	18	21	15	0,6	0	60	-60	> 400	< 0,2	5	< 2
17	120	400	10	15	15	20	12	0,6	0,1	60	-60	> 400	< 0,1	10	< 10
19	220	50	10	15	9	11	6	1,2	0	60	-60	> 300	< 0,5	5	< 10
21	220	50	10	15	11	12	10	0,6	0	40	-35	> 300	< 0,1	10	< 15
23	36	400	10	15	17	19	14	0,5	0	35	-35	> 400	< 0,1	15	< 10

Таблица 2: Схема управления на ОУ

№ вар.	$U_H, В$	$I_H, А$	$\delta U_H, \%$	$\delta U_H, \%$	$U_{m, пул}, В$	$U_{m, пул, нагр}, мВ$	$\Delta U_H, мВ$	$f_{пул}, Гц$	$T, °С$
2	6	4	± 2	+15 -10	0,1	5	0,1	100	± 60
4	12	0,4	$\pm 0,5$	± 15	0,2	10	0,05	100	± 60
6	24	0,5	± 1	± 15	0,5	15	0,8	100	± 60
8	15	1	$\pm 0,5$	± 10	0,1	10	0,2	1000	± 60
10	6	1,5	$\pm 0,5$	± 10	0,3	10	0,1	800	± 60
12	7	2,5	± 1	± 10	0,1	5	0,1	100	± 60
14	10	4,5	± 1	± 15	0,1	5	0,3	100	± 60
16	12	1	$\pm 0,5$	± 10	0,1	10	0,1	800	± 60
18	15	2	± 1	± 10	0,05	5	0,2	100	± 60
20	9	0,8	± 1	± 15	0,1	10	0,1	100	± 60
22	18	0,5	± 2	± 10	0,1	5	0,3	800	± 60
24	10	1	± 1	± 15	0,2	10	0,1	100	± 60

Содержание

Введение	2
1 Проектирование стабилизатора	3
1.1 Анализ требований технического задания	3
1.2 Выбор функционально-необходимой части	3
1.3 Расчёт регулирующего элемента	3
1.4 Расчёт источника эталонного напряжения	6
1.5 Расчёт усилителя сигнала рассогласования	6
1.6 Определение ёмкости выходного конденсатора	8
2 Расчёт выпрямителя с ёмкостным фильтром	8
2.1 Выбор и расчёт схемы выпрямителя	8
2.2 Расчёт однофазного трансформатора	11
2.2.1 Расчёт габаритной мощности	11
2.2.2 Выбор типоразмера магнитопровода	12
2.2.3 Электрический расчет трансформатора	12
3 Особенности конструкции спроектированного стабилизатора	13
4 Принцип работы спроектированного стабилизатора	14
Список литературы	15
А Варианты заданий для курсовой работы	16

Рассмотрено на заседании кафедры «Приборы управления»

Протокол №___ от «___»_____20___ г.

Зав.кафедрой

Распопов В.Я.