Научная статья
УДК 636.08
doi:10.35694/YARCX.2022.58.2.015

РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТОВ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Елена Владимировна Шешунова[1], Владимир Викторович Шмигель[2]
[1, 2]Ярославская государственная сельскохозяйственная академия, Ярославль, Россия
[1]e.sheshunova@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-7805-5656
[2]v.shmigel@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-7265-831X

Реферат. Для проектирования источника питания авторы применили двухполупериодную схему выпрямления с ёмкостным фильтром. В расчётной части источника питания подобраны балластные резисторы, транзисторы типа КТ208М и стабилитроны. Важной составляющей источника является расчёт мощности трансформатора и его активного сопротивления обмоток. Коэффициент полезного действия выпрямителя составил 71%, коэффициент пульсации выпрямителя – 1,3. Для защиты регулирующего элемента от токов короткого замыкания со стороны трансформатора установлен предохранитель ПВ-25 А.

Ключевые слова: *источник питания, трансформатор, предохранитель, стабилитрон, транзистор*

CALCULATION OF POWER SUPPLY ELEMENTS FOR ELECTRICAL PROCESS INSTALLATIONS

Elena V. Sheshunova[1], Vladimir V. Shmigel[2]
[1, 2]Yaroslavl State Agricultural Academy, Yaroslavl, Russia
[1]e.sheshunova@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-7805-5656
[2]v.shmigel@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-7265-831X

Abstract. To design the power supply the authors used a full-wave rectification circuit with a capacitive filter. Ballast resistors, KT208M type transistors and stabilitron tubes are selected in the calculated part of the power supply. An important component of the power supply is the calculation of the transformer power and its copper resistance. The conversion efficiency was 71%, the pulsation factor of the rectifier was 1.3. To protect the control element from short-circuit currents a fuse PV-25 A is installed from the transformer side.

Keywords: *power supply, transformer, fuse, stabilitron tube, transistor*

Введение. Требования, предъявляемые к электропитанию для установок в сельском хозяйстве, столь же различны, как и номенклатура самих приборов, которые только по напряжению занимают диапазон от 10 до 50 кВ. Иногда серийно выпускаемая продукция не удовлетворяет требованиям по электрической части, и нужны специально разработанные высоковольтные источники. Это касается электросепараторов, установок по выращиванию хлореллы, озонаторов, аэроионизаторов и т.п. В статье рассматриваются особенности конкретного исполнения источников, расчёты и выбор электрических компонентов схемы, а также данные по их применению, что может представлять интерес для разработчиков и заказчиков.

Методика. Для большинства вторичных источников, используемых для питания радиотехнической аппаратуры, электронных функциональных преобразователей, систем автоматического регулирования и другой аппаратуры, нестабильность выходного напряжения при изменениях питающего напряжения не превышает 0,1–0,08% [1; 2; 3], что соответствует коэффициенту стабилизации по входному напряжению $(k_{ст})_U \approx 200 \div 250$.

Коэффициент стабилизации опорного источника обычно выбирается в 2–3 раза выше необходимого коэффициента стабилизации схемы стабилизатора и составляет:

$$(k_{ст})_{оп} = (2 \div 3)(k_{ст})_U \approx 400 \div 750. \quad (1)$$

С точки зрения надёжности и высоких показателей стабилизации наиболее подходящей схемой измерительного элемента является схема, в которой питание опорного источника осуществляется от вспомогательного низковольтного выпрямителя при каскадном включении параметрических стабилизаторов, выполненных на кремниевых стабилитронах [4].

Для определения напряжения, силы тока и мощности источника применён вольтметр марки Э 365.1-1 с пределом измерения 50 В. Аппарат измеряет напряжение косвенным методом, поэтому показания вольтметра надо умножать на 1000, чтобы получить реальные значения выходного напряжения. Миллиамперметр с пределом измерений 0–50 мА марки М42300 подключается последовательно с резистором и не вносит изменения в цепь.

Для экстренного отключения источника от сети, в случае возникновения угрозы для жизни и здоровья обслуживающего персонала либо в случае возникновения неполадок в работе устройства, в цепь первичной сети установлен конечный выключатель.

Приведённая схема измерительного элемента источника питания является универсальной, так как она может быть применена для стабилизаторов с различным выходным напряжением от 250 В до 50 кВ (рис. 1).

Схема содержит двухполупериодный выпрямитель на диодах VD_1 и VD_2, двухкаскадный параметрический стабилизатор на стабилитронах VD_3–VD_5 и делитель выходного напряжения.

В качестве опорного источника напряжения выбираем стабилитрон Д818Г [5] с параметрами:

– напряжение стабилизации ($U_{оп}$) – 8,55–9,45 В;

– пределы тока стабилизации ($I_{оп}$) – 3–33 мА;

– дифференциальное сопротивление ($R_д$) – 18 Ом;

– температурный коэффициент напряжения (ТКН) – ±18 мВ/°С.

Для предварительного каскада стабилизации выбираем два стабилитрона Д814Д [5], включённые последовательно.

Параметры стабилитрона Д814Д следующие:

– напряжение стабилизации – 11,5–14 В;

– пределы тока стабилизации – 1–24 мА;

– дифференциальное сопротивление – 18 Ом;

– температурный коэффициент напряжения – +13,3 мВ/°С.

При данном опорном источнике коэффициент передачи измерительного элемента будет равен [6; 7]:

$$m \approx \frac{U_{оп}}{U_н}, \qquad (2)$$

$$m = \frac{9}{50000} = 18 \cdot 10^{-5}.$$

По формуле (3) находим коэффициент стабилизации опорного источника:

$$(k_{ст})_{оп} = \frac{U_{опмакс}}{U_{оп1мин}}\left(\frac{U_{вспмин} - U_{опмакс}}{R_д I_{оп}}\right), \qquad (3)$$

где $U_{оп\,макс}$ – максимальное напряжение на стабилитроне VD_5; $U_{оп1\,мин}$ – минимальное напряжение на стабилитронах VD_3, VD_4; $R_д$ – дифференциальное сопротивление на стабилитроне VD_5; $I_{оп}$ – ток стабилизации стабилитрона VD_5.

$$(k_{ст})_{оп} = \frac{9{,}45}{23} \cdot \left(\frac{23-9{,}45}{18 \cdot 0\,01}\right) = 31.$$

Необходимый коэффициент стабилизации предварительного каскада может быть найден из соотношения:

$$(k_{ст})_{оп1} = \frac{(2-3)(k_{ст})_U}{(k_{ст})_{оп}}, \qquad (4)$$

$$(k_{ст})_{оп1} = \frac{500}{31} = 16{,}13,$$

$(k_{ст})_{оп}$ принимаем равным 16.

По формуле (5) определяем минимальное напряжение вспомогательного выпрямителя для питания опорного источника:

$$U_{всп} = \frac{U^2_{оп1\,макс}}{U_{оп1\,мин} - (k_{ст})_{оп1} R_{Д1} I_{оп1}}, \qquad (5)$$

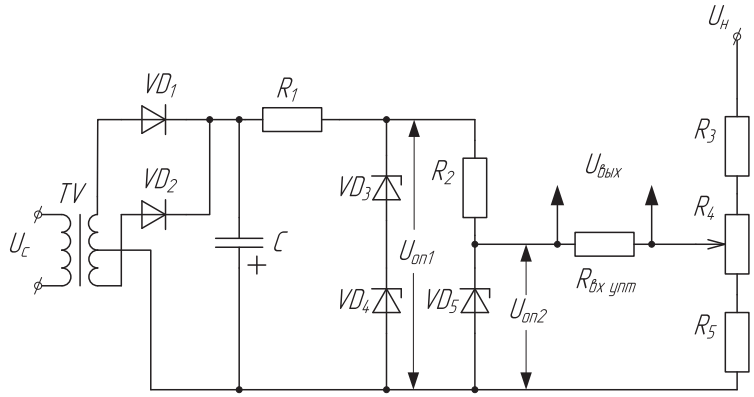

Рисунок 1 – Схема измерительного элемента

где $U_{оп1\ макс}$ – максимальное напряжение на стабилитронах VD_3, VD_4 предварительного каскада; $U_{оп1\ мин}$ – минимальное напряжение на стабилитронах VD_3, VD_4 предварительного каскада; $R_{д1}$ – дифференциальное сопротивление на стабилитроне VD_3, VD_4 предварительного каскада; $I_{оп1}$ – ток стабилизации стабилитрона предварительного каскада.

$$U_{всп} = \frac{28^2}{23-16\cdot 36\cdot 0{,}012} = 47\ В.$$

Величину балластных резисторов R_1, R_2 определим по формуле:

$$R_б = \frac{U_{0вх}-U_{оп}}{I_{оп}+I_{н.оп}}. \quad (6)$$

Выбираем резисторы типов МЛТ-2-1к и МЛТ-0,5-1,5к [7].

Параметры резистора МЛТ-2-1к:

– допустимая мощность рассеивания (P_R) – 2 Вт;

– сопротивление (R) – 1000 Ом;

– наибольшее рабочее напряжение (U_R) – 350 В.

Параметры резистора МЛТ-0,5-1,5к:

– допустимая мощность рассеивания – 0,5 Вт;

– сопротивление – 1500 Ом;

– наибольшее рабочее напряжение – 250 В.

Результаты исследования. Проведём расчёт вспомогательного низковольтного выпрямителя.

Исходные данные:

– номинальное выпрямленное напряжение (при номинальном напряжении сети) (U_0) – 47 В;

– номинальный выпрямленный ток (I_0) – 50 мА;

– амплитуда пульсации выпрямленного напряжения ($U_{0\sim}$) – ≤ 2 В;

– напряжение питающей сети (U_c) (a_c = 0,05, b_c = 0,05) – 220 ± 5% В;

– частота сети (f_c) – 50 Гц.

Выбираем двухполупериодную схему выпрямления с ёмкостным фильтром на выходе (рис. 2).

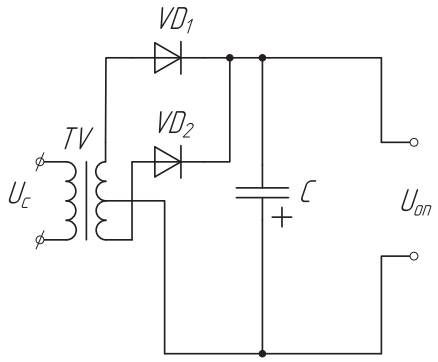

Рисунок 2 – Двухполупериодная схема выпрямления с ёмкостным фильтром

Выбираем коэффициент, зависящий от схемы выпрямления $k_г$ [5; 6], $k_г = 4{,}7 \cdot 10^3$.

Определяем активное сопротивление обмоток трансформатора:

$$r_{тр} \cong k_г \frac{U_0 \times 10^{-3}}{I_0 f B_{макс}} \sqrt[4]{\frac{s f B_{макс}}{U_0 I_0}},$$

где $B_{макс}$ – максимальная индукция в магнитопроводе для трансформаторов до 1000 В·А, принимается 1,2…1,6 Тл;

s – число стержней магнитопровода трансформатора, несущих обмотки (s = 1 – для магнитопроводов типа ШЛ и ОЛ, s = 2 – для магнитопроводов типа ПЛ); $k_г$ – коэффициент, зависящий от схемы выпрямления.

$$r_{тр} \cong 4{,}7 \cdot 10^3 \cdot \frac{47 \times 10^{-3}}{0{,}012 \times 50 \times 1{,}2} \cdot$$

$$\cdot \sqrt[4]{\frac{2 \times 50 \times 1{,}2}{47 \times 0{,}012}} = 196{,}84\ Ом$$

Задавшись предварительно значением параметра B = 1, находим величину обратного напряжения $U_{обр}$:

$$U_{обр} = 2{,}85 \cdot U_0 \cdot B,$$

$$U_{обр} = 2{,}85 \cdot 47 \cdot 1 = 133{,}95\ В.$$

Выбираем в качестве вентилей диоды Д223Б [7].

Параметры вентиля:

– постоянное обратное напряжение ($U_{обр}$) – 150 В;

– средний прямой ток ($I_{пр\ ср}$) – 5 мА;

– падение напряжения на вентиле ($U_{пр}$) – 1 В;

– средний обратный ток ($I_{обр\ ср}$) – 1 мкА.

Сопротивление фазы выпрямителя [1; 2]:

$$r = r_{тр} + n_в r_{диф}, \quad (7)$$

где $r_{диф}$ – дифференциальное сопротивление вентиля; $n_в$ – количество последовательно включённых и одновременно работающих вентилей.

$$r = 196{,}84 + 1 \cdot 6{,}67 = 210{,}17\ Ом.$$

Определяем параметр A, зависящий от угла отсечки, по формуле [1]:

$$A = \frac{\pi r I_0}{p U_0}, \quad (8)$$

где p – число импульсов выпрямленного напряжения (p = 2 – для двухполупериодных схем выпрямления).

$$A = \frac{3{,}14 \cdot 210{,}17 \cdot 0{,}05}{2 \times 47} = 0{,}35.$$

По кривым [1, с. 147–158] определяем коэффициенты B, D, F, H.

B = 1,1; D = 2; F = 5,2; H = 550.

Определяем параметры трансформатора [8].

Действующее напряжение вторичной обмотки при $U_{с\ ном}$ = 220 В:

$$U_{2ном} = U_0 \cdot B, \quad (9)$$

$$U_{2ном} = 47 \cdot 1{,}1 = 52\ В;$$

при $U_{с\ мин}$ = 209 В:

$$U_{2мин} = U_0(1 - b_c) \cdot B, \quad (10)$$

$$U_{2мин} = 47 \cdot (1 - 0{,}05) \cdot 1{,}1 = 49{,}1\ В$$

при $U_{с\ макс}$ = 231 В:

$$U_{2макс} = U_0(1 + a_c) \cdot B, \quad (11)$$

$$U_{2макс} = 47 \cdot (1 + 0{,}05) \cdot 1{,}1 = 54{,}28\ В.$$

Определяем коэффициент трансформации по формуле:

$$k_т = \frac{U_н}{U_{н.с}}, \quad (12)$$

$$k_т = \frac{52}{220} = 0{,}235.$$

Ток вторичной обмотки:

$$I_2 = 0{,}5 \cdot I_0 D, \quad (13)$$

$$I_2 = 0{,}5 \cdot 0{,}05 \cdot 2 = 0{,}05\ А.$$

Действующий ток первичной обмотки:

$$I_1 = 0{,}707 \cdot \frac{DI_0}{k_т}, \quad (14)$$

$$I_1 = 0{,}707 \cdot \frac{2 \cdot 0{,}05}{0{,}235} = 0{,}3\ А.$$

Типовая мощность трансформатора:

$$P_{тип} = 0{,}85 \cdot BDP_0, \quad (15)$$

$$P_{тип} = 0{,}85 \cdot 1{,}1 \cdot 2 \cdot 0{,}05 \cdot 47 = 4{,}4\ ВА.$$

Выбираем трансформатор ОСМ1-0,02 220/56 с параметрами [8]:

– частота сети – 50 Гц;
– первичное напряжение – 220 В;
– вторичное напряжение – 56 В;
– потребляемая мощность – не более 20 ВА;
– мощность вторичной цепи – не менее 15 ВА;
– коэффициент cosφ при номинальной нагрузке – не менее 0,75;
– габаритные размеры длина, ширина, высота – 60×46×50 мм;
– общий вес – не более 0,52 кг.

Определяем параметры вентилей [9].

Обратное напряжение определяем по формуле:

$$U_{обр} = 2{,}82 \cdot B \cdot I_0,$$

$$U_{обр} = 2{,}82 \cdot 1{,}1 \cdot 47 = 145{,}794\ В < 150\ В.$$

Средний ток одного вентиля:

$$I_{пр.срмакс} = 0{,}5 \cdot I_0, \quad (16)$$

$$I_{пр.срмакс} = 0{,}5 \cdot 0{,}05 = 0{,}025\ А < 0{,}05\ А.$$

Действующий ток вентиля:

$$I_{пр.ср} = 0{,}5 \cdot I_0 D, \quad (17)$$

$$I_{пр\ ср} = 0{,}5 \cdot 0{,}05 \cdot 2 = 0{,}05\ А = 0{,}05\ В.$$

Следовательно, вентили выбраны правильно.

Определяем параметры ёмкостного фильтра.

Определяем значение ёмкости фильтра [4; 9]:

$$C = \frac{100H}{r \cdot k_п}, \quad (18)$$

где C – ёмкость, мкФ; $k_п$ – коэффициент пульсации в процентах ($k_п$ = 2%).

$$C_ф = \frac{100 \cdot 550}{210{,}17 \cdot 2} = 130{,}85\ мкФ.$$

Выбираем электролитический конденсатор типа К50-6 200 мкФ на 50 В [7].

Частота основной гармоники:

$$f = mf_c, \quad (19)$$

$$f = 2 \cdot 50 = 100\ Гц.$$

Коэффициент пульсации:

$$k_п = \frac{H}{rC_ф}, \quad (20)$$

$$k_п = \frac{550}{210{,}17 \cdot 200} \cdot 100 = 1{,}3\ \%.$$

Для выпрямителей $k_п$ = 1,3% < 2%, что удовлетворяет условию.

Определяем коэффициент полезного действия умножителя:

$$\eta = \frac{P_{0ном}}{P_1} = \frac{U_{0ном} I_{0ном}}{I_{0ном} U_{0ном} + P_{тр} + n_в P_{дср} + P_{всп}},$$

$$P_{дср} \approx (U_{пр} + I_{пр.срмакс} r_{диф}) I_{пр.ср} \frac{t_в}{T_c},$$

$$P_{тр} = (1 - \eta_{тр}) P_{тип},$$

где $\eta_{тр}$ = 0,83 [8].

$$P_{дср} \approx (1 + 0{,}13 \cdot 6{,}67) \cdot 0{,}05 \cdot \frac{0{,}5 \cdot 0{,}02}{0\ 02} = 0{,}05\ Вт,$$

$$P_{тр} = (1 - 0{,}83) \cdot 5{,}17 = 0{,}88\ Вт,$$

$$\eta = \frac{47 \times 0{,}05}{47 \times 0\ 05 + 0\ 87 + 2 \cdot 0\ 05} = 0{,}71.$$

Коэффициент полезного действия выпрямителя составляет 71%.

Выполним расчёт усилителя постоянного тока.

В качестве усилителя постоянного тока, на основе рекомендации литературы [5; 6], примем схему усилительного каскада (рис. 3), состоящую из двух транзисторов – VT_1 и VT_2 с общим эмиттером. Транзистор VT_1 работает в режиме усиления напряжения, VT_2 – в режиме эмиттерного повторителя. Эмиттерная связь между транзисторами осуществляется с помощью резистора R_3. Источником питания служит предварительный каскад опорного источника на стабилитронах VD1, VD2 с напряжением $U_{оп}$.

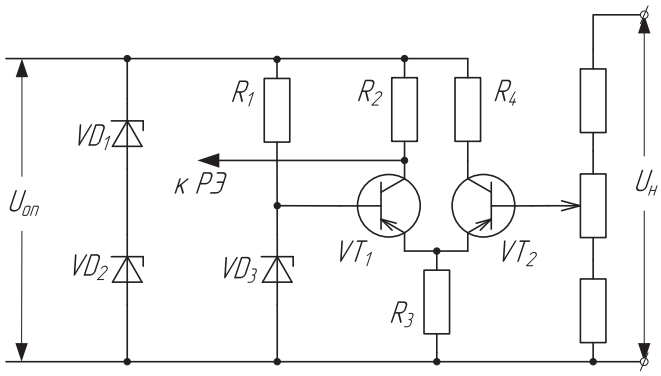

Рисунок 3 – Схема усилителя постоянного тока

Коллекторное напряжение усилительного транзистора VT_1 является разностью напряжений стабилизации стабилитронов U_{VD2} и U_{VD3} и равно

$$U_{кVT1} = U_{VD2} - U_{VD3} = 13 - 9 = 4\ В, \quad (21)$$

где U_{VD2}, U_{VD3} – напряжение стабилизации стабилитронов VD_1 и VD_2.

С целью получения лучшей температурной стабильности усилителя токи коллекторов транзисторов VT_1 и VT_2 примем примерно равными [9; 10], т.е. $I_{кVT1} \approx I_{кVT2} = 4В$.

Падение напряжения на резисторе R_2 практически равно напряжению стабилизации стабилитрона VD_1, а сопротивление рассчитываем по формуле (22):

$$R_2 = \frac{U_{VD1}}{I_{кVT1}}, \quad (22)$$

$$R_2 = \frac{13}{1{,}2} \cdot 10^3 = 10{,}8\ кОм.$$

Сопротивление нагрузки R_4 транзистора VD_1 выбирается из условия:

$$R_4 \simeq (0{,}8 \div 0{,}9)R_2, \quad (23)$$

$$R_4 \simeq 0{,}9 \cdot 10 = 9{,}75\ кОм.$$

Поскольку через резистор R_3 протекает сумма токов VT_1 и VT_2, то его сопротивление можно рассчитать по формуле (24):

$$R_3 = \frac{U_{VD3} - U_{бэ1}}{I_{к1} + I_{к2}}, \quad (24)$$

где $I_{к1}$, $I_{к2}$ – коллекторный ток транзисторов VT_1 и VT_2.

$$R_3 = \frac{9}{(1{,}2 + 1{,}2) \cdot 10^{-3}} = 3{,}75\ кОм.$$

Резисторы R_2, R_3, R_4 выбираем типа МЛТ-0,25 11 кОм, МЛТ-0,25 3,9 кОм, МЛТ-0,25 8,2 кОм соответственно [10].

Определим коллекторное напряжение на транзисторе VT_1:

$$U_{кVT1} = U_{VD1} + U_{VD2} - (U_{VD3} + I_{кт1}R_2), \quad (25)$$

$$U_{кVT1} = 13 + 13 - (9 + 1{,}2 \cdot 9{,}75) = 5{,}3\ В$$

При выборе транзисторов для усилителя необходимо учесть, что их допустимое коллекторное напряжение должно удовлетворять неравенству [9; 10]:

$$U_{кVT1} = U_{кVT2} \leq U_{VD1} + U_{VD2} - U_{VD3} \leq U_{кдоп}, \quad (26)$$

$$5{,}3 = 5{,}3 \leq 13 + 13 - 9 \leq 60.$$

Следовательно, условие выполняется.

Для данной схемы выберем транзисторы типа КТ208М [9; 10] с параметрами:

– наибольшее напряжение коллектор-эмиттер ($U_{кэ}$) – 80 В;

– наибольшее напряжение коллектор-база ($U_{кб}$) – 80 В;

– наибольший ток коллектора ($I_к$) – 150 мА;

– наибольшая мощность рассеиваемая транзистором ($P_к$) – 200 мВт;

– обратный ток коллектора ($I_{кб\,0}$) – 1 мкА;

– статический коэффициент передачи тока ($h_{21\,э}$) – 120.

Определяем коэффициент усиления усилителя по формуле (27):

$$k_у \approx \frac{R_2}{r_{вх}A + R_2\frac{r_б}{r_к}B}, \quad (27)$$

где $A = 1 + R_э/r_{вх} + R_б/r_{вх}\beta$; $B = 1 + R_б/r_б$.

В практических схемах обычно $r_{вх} \approx 25$ Ом, $A \approx 3$, $r_б \approx 250$ Ом, $B \approx 2$, $r_к \approx 500$ кОм [10].

$$k_у \approx \frac{11 \cdot 10^3}{25 \cdot 3 + 11\frac{250}{500 \cdot 10^3} \cdot 2} = 146{,}65\,.$$

Расчёт выходного сравнивающего делителя контрольно измерительного прибора.

В качестве выходного делителя напряжения выбираем цепочку последовательно соединённых резисторов (рис. 4). Делитель также имеет потенциометр, позволяющий изменять соотношение плеч делителя и тем самым компенсировать разброс опорного напряжения, а также устанавливать необходимый уровень выходного напряжения [4; 6].

Сопротивление резистора R_1 определяем по формуле (28):

$$R = \frac{U_0}{I_0}, \quad (28)$$

$$R = \frac{50000}{0{,}05} = 1000000 \text{ Ом}.$$

Выбираем высоковольтный резистор RI80 с сопротивлением 1 МОм и максимальной рассеиваемой мощностью 2500 Вт.

Определяем сопротивление на резисторе R_3 и потенциометре R_2 при максимальном значении его сопротивления, при условии что $U_1 \leq U_{кбVT2}$ = 80 В [10]:

$$R_3 + R_2 = \frac{U_1}{U_0 - U_1} R_1,$$

$$R_3 + R_2 = \frac{80}{50000 - 80} \cdot 10^6 = 1602 \text{ Ом}, \quad (29)$$

Из доступных номиналов и моделей выбираем резистор МЛТ-2-1 кОм и потенциометр РП-80-360 Ом [10].

Тогда напряжение U_1 на низком плече делителя будет равно:

$$U_1 = U_0 \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad (30)$$

$$U_1 = 50000 \cdot \frac{360 + 1000}{10^6 + 360 + 1000} = 67{,}9 \text{ В}$$

Вольтметр подключаем параллельно резистору R_3 (рис. 4) и проверяем напряжение на нём.

$$U_{pV} = U_0 \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad (31)$$

$$U_{pV} = 50000 \cdot \frac{1000}{10^6 + 360 + 1000} = 49{,}9\text{В}.$$

Следовательно, выбираем вольтметр марки Э 365.1-1 [10] с пределом измерения 50 В. Аппарат измеряет напряжение косвенным методом, поэтому показания вольтметра надо умножать на 1000, чтобы получить реальные значения выходного напряжения.

Амперметр подключается последовательно с резистором R_3 и не вносит изменения в цепь. Выбираем миллиамперметр с пределом измерений 0–50 мА марки М42300 [10].

Выполним расчёт контроля напряжения и защиты источника.

Высоковольтный источник питания [11] необходимо защитить от аномалий сетевого напряжения, а также защитить обслуживающий персонал от угрозы поражения высоким напряжением.

Для защиты источника от токов короткого замыкания (КЗ), перегрузок, колебаний электрического напряжения и других сбоев, возникающих на стороне питающей сети, установим автоматический выключатель (рис. 5).

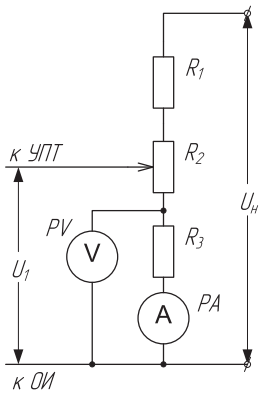

Рисунок 4 – Схема выходного сравнивающего делителя контрольно-измерительного прибора

Действующий ток первичной обмотки трансформатора составляет $I_{д1}$ = 19,74 А, следовательно, из номинального ряда выбираем двухполюсный автоматический выключатель ВА 47-29 с номинальным током 25А [1].

Для защиты регулирующего элемента от токов короткого замыкания со стороны трансформатора установим предохранители на входе и выходе РЭ. Ток плавкой вставки равен:

$$I_{пв} \geq 1{,}15 I_{д1}, \quad (32)$$

$$I_{пв} \geq 1{,}15 \cdot 19{,}74 = 22{,}7 \text{ А}.$$

Выбираем предохранитель ПВ-25 А.

Для экстренного отключения источника от сети, в случае возникновения угрозы для жизни и здоровья обслуживающего персонала либо в случае возникновения неполадок в работе устройства, в цепь первичной сети установим конечный выключатель. В качестве конечного выключателя выберем аварийную кнопу выключения M22-DR-R [1].

Для контроля сетевого напряжения применена неоновая лампа ТН-0,2.

Номинальный ток неоновой лампы $(I_л) - 1 \cdot 10^{-3}$ А.

Рассчитываем добавочный резистор в цепи неоновой лампы:

$$R = \frac{U_c}{I_л}, \quad (33)$$

$$R = \frac{220}{10^{-3}} = 220 \cdot 10^3 \text{Ом}.$$

Принимаем резистор МЛТ-0,5 220 кОм [10].

Таким образом, нами выполнен расчёт контроля напряжения и защиты источника.

Выводы. Для проектирования источника питания была выбрана двухполупериодная схема выпрямления с ёмкостным фильтром, рассчитана схема усилителя постоянного тока. В расчётной части источника питания были подобраны бал-

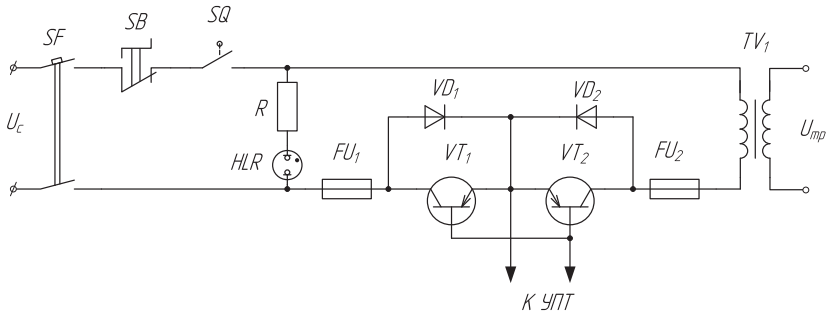

Рисунок 5 – Схема узла защиты источника

ластные резисторы, транзисторы типа КТ208М и стабилитроны. Рассчитана мощность трансформатора и его активное сопротивление обмоток. Коэффициент полезного действия выпрямителя составил 71%, коэффициент пульсации выпрямителя – 1,3%, что удовлетворяет предъявляемым требованиям. Для защиты регулирующего элемента от токов короткого замыкания со стороны трансформатора установлен предохранитель ПВ-25 А.

Список источников

1. Быков, С. В. Источники питания : учебное пособие / С. В. Быков, М. М. Бабичев, А. А. Аравенков. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2019. – 94 с. – ISBN 978-5-7782-4083-4. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/98790.html (дата обращения: 06.01.2022).

2. Гейтенко, Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет : учебное пособие / Е. Н. Гейтенко. – Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2016. – 447 с. – ISBN 978-5-91359-025-1. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/90414.html (дата обращения: 06.01.2022).

3. Современная электроника. – Электрон. дан. – Издательство : СТА-Пресс, 2021. – № 7. – С. 76. – Текст : электронный.

4. Литвинов, И. И. Электроника. Проектирование источника питания микроэлектронных устройств / И. И. Литвинов, М. А. Купарев, В. Е. Глазырин. – 115 с. – ISBN 978-5-7782-4279-1. – URL: https://rucont.ru/efd/774961 (дата обращения: 06.01.2022). – Текст : электронный.

5. Кашкаров, А. П. Оригинальные конструкции источников питания / А. П. Кашкаров, А. С. Колдунов. – Москва : ДМК-Пресс, 2010. – 161 с. : ил. – ISBN 978-5-94074-634-8. – URL: https://rucont.ru/efd/203224 (дата обращения: 06.01.2022). – Текст : электронный.

6. Источники питания. Электронные компоненты. – Электрон. дан. – Издательство: ООО «ИД Электроника», 2020. – № 3. – С. 36–100. – Текст : электронный.

7. Варламов, В. Р. Современные источники питания : справочник / В. Р. Варламов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : ДМК-Пресс, 2009. – 220 с. : ил. – (Справочник). – ISBN 5-94074-059-6. – ISBN 978-5-94074-059-6. – URL: https://rucont.ru/efd/203169 (дата обращения: 06.01.2022). – Текст : электронный.

8. Хныков, А. В. Теория и расчет трансформаторов источников вторичного электропитания / А. В. Хныков. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2016. – 125 с. – ISBN 5-98003-060-3. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/90370.html (дата обращения: 06.01.2022).

9. Бишоп Оуэн. Электронные схемы и системы / Бишоп Оуэн. – Саратов : Профобразование, 2017. – 576 с. – ISBN 978-5-4488-0039-9. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/64067.html (дата обращения: 06.01.2022).

10. Семьян, А. П. 500 схем для радиолюбителей. Источники питания / А. П. Семьян. – Санкт-Петербург : Наука и Техника, 2007. – 408 с. – ISBN 978-5-94387-372-0. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/28768.html (дата обращения: 06.01.2022).

11. Шешунова, Е. В. Расчёт высоковольтного источника питания для электротехнологических установок / Е. В. Шешунова, В. В. Шмигель, А. С. Угловский. – Текст : непосредственный // Вестник АПК Верхневолжья. – 2022. – № 1 (57). – С. 77–85. – ISBN 1998-1635.

References

1. Bykov, S. V. Istochniki pitanija : uchebnoe posobie / S. V. Bykov, M. M. Babichev, A. A. Aravenkov. – Novosibirsk : Novosibirskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet, 2019. – 94 c. – ISBN 978-5-7782-4083-4. –

Tekst : jelektronnyj // Jelektronno-bibliotechnaja sistema IPR BOOKS : [sajt]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/98790.html (data obrashhenija: 06.01.2022).

2. Gejtenko, E. N. Istochniki vtorichnogo jelektropitanija. Shemotehnika i raschet : uchebnoe posobie / E. N. Gejtenko. – Moskva : SOLON-PRESS, 2016. – 447 c. – ISBN 978-5-91359-025-1. – Tekst : jelektronnyj // Jelektronno-bibliotechnaja sistema IPR BOOKS : [sajt]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/90414.html (data obrashhenija: 06.01.2022).

3. Sovremennaja jelektronika. – Jelektron. dan. – Izdatel'stvo : STA-Press, 2021. – № 7. – S. 76. – Tekst : jelektronnyj.

4. Litvinov, I. I. Jelektronika. Proektirovanie istochnika pitanija mikrojelektronnyh ustrojstv / I. I. Litvinov, M. A. Kuparev, V. E. Glazyrin. – 115 s. – ISBN 978-5-7782-4279-1. – URL: https://rucont.ru/efd/774961 (data obrashhenija: 06.01.2022). – Tekst : jelektronnyj.

5. Kashkarov, A. P. Original'nye konstrukcii istochnikov pitanija / A. P. Kashkarov, A. S. Koldunov. – Moskva : DMK-Press, 2010. – 161 s. : il. – ISBN 978-5-94074-634-8. – URL: https://rucont.ru/efd/203224 (data obrashhenija: 06.01.2022). – Tekst : jelektronnyj.

6. Istochniki pitanija. Jelektronnye komponenty. – Jelektron. dan. – Izdatel'stvo: OOO «ID Jelektronika», 2020. – № 3. – S. 36–100. – Tekst : jelektronnyj.

7. Varlamov, V. R. Sovremennye istochniki pitanija : spravochnik / V. R. Varlamov. – 2-e izd., ispr. i dop. – Moskva : DMK-Press, 2009. – 220 s. : il. – (Spravochnik). – ISBN 5-94074-059-6. – ISBN 978-5-94074-059-6. – URL: https://rucont.ru/efd/203169 (data obrashhenija: 06.01.2022). – Tekst : jelektronnyj.

8. Khnykov, A. V. Teorija i raschet transformatorov istochnikov vtorichnogo jelektropitanija / A. V. Khnykov. – Moskva : SOLON-Press, 2016. – 125 c. – ISBN 5-98003-060-3. – Tekst : jelektronnyj // Jelektronno-bibliotechnaja sistema IPR BOOKS : [sajt]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/90370.html (data obrashhenija: 06.01.2022).

9. Bishop Ouehn. Jelektronnye shemy i sistemy / Bishop Ouehn. – Saratov : Profobrazovanie, 2017. – 576 c. – ISBN 978-5-4488-0039-9. – Tekst : jelektronnyj // Jelektronno-bibliotechnaja sistema IPR BOOKS : [sajt]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/64067.html (data obrashhenija: 06.01.2022).

10. Sem'yan, A. P. 500 shem dlja radioljubitelej. Istochniki pitanija / A. P. Sem'yan. – Sankt-Peterburg : Nauka i Tehnika, 2007. – 408 c. – ISBN 978-5-94387-372-0. – Tekst : jelektronnyj // Jelektronno-bibliotechnaja sistema IPR BOOKS : [sajt]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/28768.html (data obrashhenija: 06.01.2022).

11. Sheshunova, E. V. Raschyot vysokovol'tnogo istochnika pitaniya dlya elektrotekhnologicheskih ustanovok / E. V. Sheshunova, V. V. Shmigel', A. S. Uglovskij. – Tekst : neposredstvennyj // Vestnik APK Verhnevolzh'ya. – 2022. – № 1 (57). – S. 77–85. – ISBN 1998-1635.

Сведения об авторах

Елена Владимировна Шешунова – кандидат технических наук, доцент, декан инженерного факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия», spin-код: 4860-1126.

Владимир Викторович Шмигель – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия», spin-код: 5673-4145.

Information about the authors

Elena V. Sheshunova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agricultural Academy", spin-code: 4860-1126.

Vladimir V. Shmigel – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agricultural Academy", spin-code: 5673-4145.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.