Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Махаева Наталья Юрьевна
Должность: Проректор по учебной и воспитательной работе, молодежной политике ФГБОУ ВО "Ярославский ГАУ"
Дата подписания: 02.02.2024 11:01:58
Уникальный программный ключ:
fa349ae3f25a4564...

Научная статья
УДК 636.08
doi:10.35694/YARCX.2022.57.1.012

РАСЧЁТ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Елена Владимировна Шешунова[1], Владимир Викторович Шмигель[2], Артем Сергеевич Угловский[3]
[1, 2, 3]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
[3]a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786

Реферат. В данной статье была разработана структурная схема высоковольтного источника питания со вспомогательными элементами, выполнен расчёт умножителя напряжения на высоковольтных диодах. Коэффициент полезного действия выпрямителя составил 83,4%. В схеме умножения напряжения выбран газосветный трансформатор марки ТГ-1020-К-У2. Соединение трансформатора выполнено по двухтактной схеме со средней точкой регулирования, регулирующий элемент состоит из двух транзисторов – VT1 и VT2. Данная схема позволяет увеличить выходную мощность по сравнению со схемами, где использован один транзистор в качестве регулирующего.

Ключевые слова: *коэффициент полезного действия, выпрямитель, газосветный трансформатор, транзисторы, умножитель напряжения*

CALCULATION OF HIGH-VOLTAGE POWER SUPPLY FOR ELECTRICAL INSTALLATIONS

Elena V. Sheshunova[1], Vladimir V. Shmigel[2], Artem S. Uglovskiy[3]
[1, 2, 3]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
[3]a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID0000-0002-5678-4786

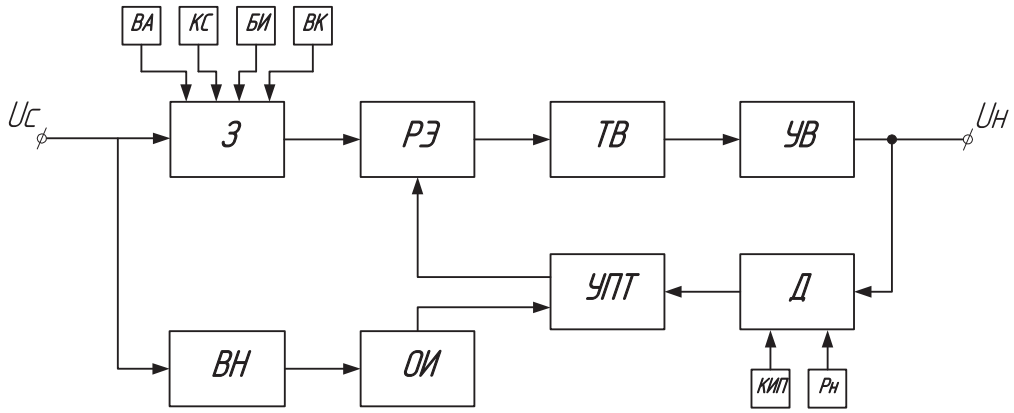
Abstract. In this article, a structural diagram of a high-voltage power supply with auxiliary elements was developed, a voltage multiplier on high-voltage diodes was calculated. The conversion efficiency was 83.4%. In the voltage multiplication circuit a gas-discharge transformer of grade TG-1020-K-U2 was selected. Transformer connection is made according to push-pull circuit with a control midpoint, regulating element consists of two transistors – VT1 and VT2. This circuit allows to increase output power compared to circuits where one transistor is used as regulating one.

Keywords: *conversion efficiency, rectifier, gas-discharge transformer, transistors, voltage multiplier*

Введение. На сегодняшний день в выборе высоковольтного источника питания все пользователи стремятся использовать малогабаритные устройства. Достичь этого можно, используя схемные решения на высокой частоте. Расчёты таких устройств приводятся в технической литературе. В связи с этим научный и практический интерес представляет расчёт высоковольтного источника питания на промышленной частоте 50 Гц.

Методика. На основании ТУ и рекомендаций литературы [1; 2; 3] за основу расчёта принимаем структурную схему высоковольтного источника питания, показанную на рисунке 1.

Согласно структурной схеме источник работает следующим образом. Напряжение сети (U_c) через блок защиты и регулирующий элемент (РЭ) подаётся на высоковольтный трансформатор (ТВ). Напряжение вторичной обмотки трансформатора умножается, преобразовывается в постоянное, а также сглаживается при помощи высоковольтного умножителя (УВ) и подаётся на нагрузку. Для поддержания выходного напряжения с заданной точ-



З – узел защиты источника, ВА – автоматический выключатель, КС – лампа контроля сетевого напряжения, БИ – блокировка источника, ВК – концевой выключатель, РЭ – регулирующий элемент, ТВ – высоковольтный трансформатор, УВ – высоковольтный умножитель, Д – делитель, КИП – контрольно измерительный прибор, Рн – регулятор выходного напряжения, УПТ – усилитель постоянного тока, ОИ – опорный источник, ВН – низковольтный выпрямитель.

Рисунок 1 – Структурная схема высоковольтного источника питания со вспомогательными элементами

ностью между выходом источника регулирующим элементом применяется обратная связь, состоящая из делителя напряжения (Д), усилителя постоянного тока (УПТ) и опорного источника (ОИ). В цепи обратной связи часть напряжения снимается с делителя выходного напряжения и сравнивается с напряжением опорного источника. Сигнал рассогласования поступает на вход усилителя, где он усиливается и подаётся на регулирующий транзистор. В зависимости от величины сигнала, поступающего на вход, изменяется его внутреннее сопротивление и соответственно происходит падение напряжения на переходе эмиттер-коллектор, компенсируя отклонения напряжения сети или изменения тока нагрузки.

Производим расчёт узлов, входящих в неё. Расчёт узлов будем вести со стороны высокого напряжения, а полученные результаты будут являться исходными для дальнейших расчётов.

Выполним расчёт схемы умножения.

Исходные данные: номинальное выпрямленное напряжение (при номинальном напряжении сети) (U_0) – 50000 В; номинальный выпрямленный ток (I_0) – 0,05 мА; амплитуда пульсации выпрямленного напряжения ($U_{0\sim}$) – ≤ 2500 В; напряжение питающей сети (U_c) – 220 ±5% В (a_c = 0,05, b_c = 0,05); частота сети (f) – 50 Гц.

Выбираем несимметричную схему многократного умножения [4; 5], представляющую собой каскадное соединение вентильно-конденсаторных узлов, напоминающих по своей конфигурации треугольники (рис. 2) с числом каскадов умножения k = 2. Число вентилей в схеме n = 4.

Находим коэффициент, зависящий от схемы выпрямления (умножения) k_r [6]:

$$k_r = \frac{3 \cdot 10^3}{k^2}; \qquad (1)$$

k_r = 750.

Определяем активное сопротивление обмоток трансформатора [3]:

$$r_{тр} \cong k_r \frac{U_0 \times 10^{-3}}{I_0 f B_{макс}} \sqrt[4]{\frac{sfB_{макс}}{U_0 I_0}}, \qquad (2)$$

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 –

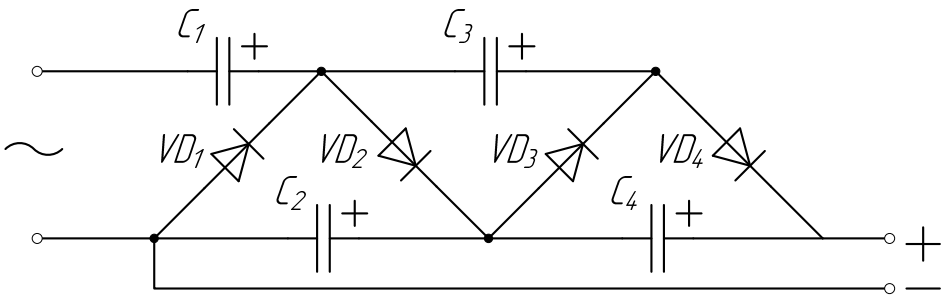


Рисунок 2 – Несимметричная схема умножения

для магнитопроводов типа ШЛ и ОЛ, s = 2 – для магнитопроводов типа ПЛ); $k_г$ – коэффициент, зависящий от схемы выпрямления (умножения).

$$r_{тр} \cong 333{,}3 \cdot \frac{50000 \cdot 10^{-3}}{0{,}05 \cdot 50 \cdot 1{,}6} \sqrt[4]{\frac{2 \cdot 50 \cdot 1{,}6}{50000 \cdot 0{,}05}} = 4715{,}38 \text{ Ом}.$$

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

$$U_{обр} = \frac{\sqrt{2}U_0}{k} \cdot B \quad (3)$$

$$U_{обр} = \frac{\sqrt{2} \cdot 50000}{2} \cdot 1 = 35355{,}34 \text{ В}.$$

Выбираем в качестве вентилей диоды HVM14 [6; 7] из расчёта 1 вентиль = 3 последовательно соединённых диода.

Параметры составного вентиля: постоянное обратное напряжение ($U_{обр}$) – 42000 В; средний прямой ток ($I_{пр\ ср}$) – 350 мА; падение напряжения на вентиле ($U_{пр}$) – 42 В; средний обратный ток ($I_{обр\ ср}$) – 5 мкА.

Сопротивление фазы умножителя:

$$r = r_{тр} + \frac{r_{пр}}{k}, \quad (4)$$

где $r_{пр}$ – суммарное активное прямое сопротивление одновременно работающих вентилей [6; 7]:

$$r = 4715{,}38 + \frac{4 \cdot 42}{2} = 4795{,}37 \text{ Ом}.$$

Определяем параметр A, зависящий от угла отсечки, по формуле [6]:

$$A = \frac{\pi n^2 r I_0}{2U_0}, \quad (5)$$

$$A = \frac{3{,}14 \cdot 4^2 \cdot 4795{,}37 \cdot 0{,}05}{2 \cdot 50000} = 0{,}12.$$

По кривым рис. 3–7, 3–8, 3–9 [6, с. 147–158] определяем коэффициенты B, D, F, H.

B = 0,9; D = 2,2; F = 6,7; H = 200.

Определяем параметры трансформатора [3].

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

$$U_{2ном} = \frac{U_0}{n} \cdot B, \quad (6)$$

$$U_{2ном} = \frac{50000}{4} \cdot 0{,}9 = 11250 \text{ В};$$

при $U_{с\ мин}$ = 209 В:

$$U_{2мин} = \frac{U_0(1-b_c)}{n} \cdot B, \quad (7)$$

$$U_{2мин} = \frac{50000 \cdot (1-0{,}05)}{4} \cdot 0{,}9 = 10687 \text{ В};$$

при $U_{с\ макс}$ = 231 В:

$$U_{2макс} = \frac{U_0(1+a_c)}{n} \cdot B, \quad (8)$$

$$U_{2макс} = \frac{50000 \cdot (1+0{,}05)}{4} \cdot 0{,}9 = 11812 \text{ В}.$$

Определяем коэффициент трансформации по формуле:

$$k_т = \frac{U_н}{U_{н\,с}}, \quad (9)$$

$$k_т = \frac{11250}{220} = 51{,}14.$$

Ток вторичной обмотки:

$$I_2 = \frac{k}{\sqrt{2}} I_0 D, \quad (10)$$

$$I_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot 0.05 \cdot 2{,}2 = 0{,}156.$$

Действующий ток первичной обмотки:

$$I_1 = I_2 k_т, \quad (11)$$

$$I_1 = 0{,}156 \cdot 51{,}14 = 7{,}95 \text{ А}.$$

Типовая мощность трансформатора:

$$P_{тип} = \frac{n}{2\sqrt{2}} BDP_0 \approx 2 \cdot U_{2ном} \cdot I_2, \quad (12)$$

$$P_{тип} = 2 \cdot 11250 \cdot 0{,}156 = 3500{,}17 \text{ ВА}.$$

Определяем параметры вентилей.

Обратное напряжение по формуле (3):

$$U_{обр} = \frac{\sqrt{2}U_0}{k} \cdot B,$$

$$U_{обр} = \frac{\sqrt{2} \times 50000}{2} \cdot 0{,}9 = 39283{,}71 \text{ В} < 42000 \text{ В}$$

Максимальный выпрямленный ток одного вентиля:

$$I_{пр\ срмакс} = I_0 F, \quad (13)$$

$$I_{пр.срмакс} = 0{,}05 \cdot 6{,}7 = 0{,}335 \text{ А} < 0{,}35 \text{ А}.$$

Действующий ток вентиля:

$$I_{пр\ ср} = I_0 D, \quad (14)$$

$$I_{пр.ср} = 0{,}05 \cdot 2{,}2 = 0{,}11 \text{ А} < 0{,}35 \text{ В}.$$

Следовательно, вентили выбраны правильно.

Определяем параметры конденсаторов в схеме [6; 7].

Определяем значение ёмкости звена умножителя:

$$C = \frac{U_0 100 H}{n^2 m r f U_{0\sim}}, \quad (15)$$

где C – ёмкость, мкФ; m – номер гармоники (m = 1 – для схем однополупериодной и удвоения напряжения, m = 2 – для однофазной мостовой и двухполупериодной).

$$C = \frac{50000 \cdot 100 \cdot 200}{4^2 \cdot 1 \cdot 4795{,}37 \cdot 50 \cdot 2500} = 0{,}104 \text{ мкФ}.$$

Напряжение на конденсаторе в схеме (кроме первого C_1):

$$U_c = 2U_{2ном}, \quad (16)$$

$$U_c = 2 \cdot 11250 = 22500 \text{ В}.$$

Учитывая особенности работы схемы умножения, ёмкость первого конденсатора C_1 выбирается равной 2C, а напряжение $Uc = U_{2ном}$.

Набираем необходимую ёмкость из высоковольтных конденсаторов типа К75-97 на 10кВ [6]. Для C_1 – один конденсатор выбранного типа, для C_2–C_4 – два последовательно соединённых конденсатора.

Частота основной гармоники:

$$f = mf_c, \quad (17)$$

$$f = 1 \cdot 50 = 50 \text{ Гц}.$$

Коэффициент пульсации:

$$k_п = \frac{U_{0\sim}}{U_0} \cdot 100, \quad (18)$$

$$k_п = \frac{2500}{50000} \cdot 100 = 5\ \%.$$

Для выпрямителей (в том числе для выпрямителей с умножением напряжения) $k_п$ не должно превышать 10% [8; 9], в нашем случае $k_п$ = 5%<10%, что удовлетворяет данному условию.

Определяем коэффициент полезного действия умножителя:

$$\eta = \frac{P_{0ном}}{P_1} = \frac{U_{0ном} I_{0ном}}{I_{0ном} U_{0ном} + P_{тр} + n_в P_{дср} + P_{всп}}, \quad (19)$$

где P_1 – мощность, потребляемая от сети, Вт; $P_{тр}$ – потери мощности в трансформаторе, Вт; $P_{д.ср}$ – потери мощности в одном вентиле, Вт; $P_{всп}$ – потери мощности на вспомогательных элементах умножителя, Вт; $n_в$ – общее количество вентилей в умножителе.

$$P_{дср} \approx (U_{пр} + I_{пр.срмакс} r_{диф}) I_{пр.ср} \frac{t_в}{T_c}, \quad (20)$$

где $U_{пр}$ – падение напряжения на вентиле в прямом направлении; $I_{прср\ макс}$, $I_{пр.ср}$ – максимальное и среднее значение тока вентиля, А; $r_{диф}$ – внутреннее сопротивление вентиля, Ом; $t_в$ – время протекания прямого тока вентиля ($t_в = 0{,}5 \times T_c$), с; $f_c = 1/T_c$ – частота питающей сети, откуда $T_c = 1/f_c = 1/50 = 0{,}02$ с.

$$P_{дср} \approx (42 + 0{,}335 \cdot 40) \cdot 0{,}05 \cdot \frac{0{,}5 \cdot 0{,}02}{0\ 02} = 1{,}385 \text{ Вт},$$

$$P_{тр} = (1 - \eta_{тр}) P_{тип}, \quad (21)$$

где $\eta_{тр}$ = 0,86 [9];

$$P_{тр} = (1 - 0{,}86) \cdot 3500{,}17 = 490{,}025 \text{ Вт}.$$

$$\eta = \frac{50000 \times 0{,}05}{50000 \cdot 0\ 05 + 490\ 025 + 4 \cdot 1\ 385} = 0{,}834.$$

Коэффициент полезного действия выпрямителя составляет 83,4%.

В результате расчётов высоковольтного умножителя и выбора элементов схема примет вид (рис. 3).

Выбор силового высоковольтного трансформатора.

Для опытного образца ВИП-50-50 нами был выбран газосветный трансформатор марки ТГ-1020-К-У2 [3].

Характеристики высоковольтного трансформатора ТГ-1020-К-У2 (ТУ 16-517, 747-73): частота сети – 50 Гц; первичное напряжение – 200 В; вторичное напряжение на холостом ходу – 10000 ± 1000 В; вторичное напряжение при номинальной нагрузке – 9000 ± 600 В; вторичный ток при номинальной нагрузке – 20 ± 1 мА; вторичный ток

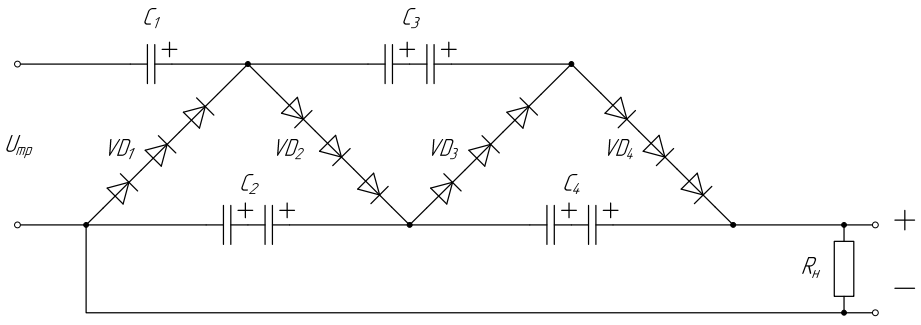


Рисунок 3 – Несимметричная схема умножения (практический вариант)

при коротком замыкании – 28 мА; потребляемая мощность не более – 200 ВА; мощность вторичной цепи – не менее 180 ВА; коэффициент $\cos\varphi$ при номинальной нагрузке – не менее 0,75; габаритные размеры: длина, ширина, высота – 215×147×170 мм; общий вес – не более 8 кг.

По типовой мощности и параметрам первичной и вторичной обмоток выбираем 8 трансформаторов. Первичные и вторичные обмотки трансформаторов соединяем параллельно (рис. 4).

При параллельном соединении первичных и вторичных обмоток двух выбранных трансформаторов выходное напряжение останется равным 10000 В, но выходной ток при этом вырастет в 2 раза и составит 40 мА [3].

Соединив соответственно восемь трансформаторов, мы получим устройство, эквивалентное одному трансформатору с входным напряжением

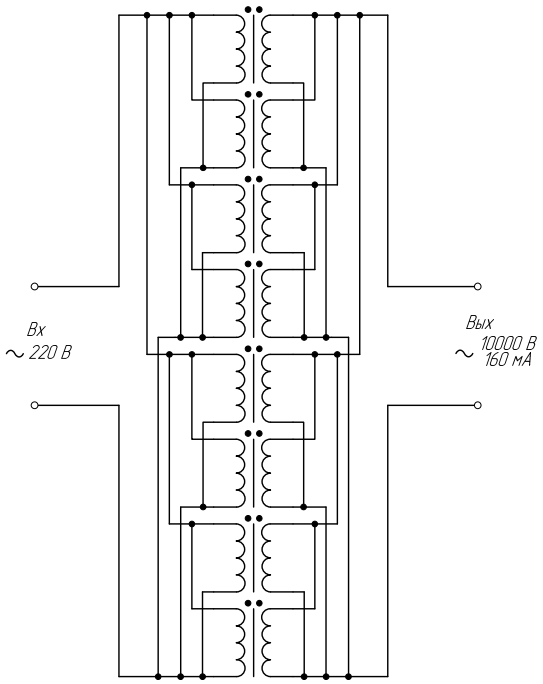


Рисунок 4 – Параллельное соединение первичных и вторичных обмоток восьми трансформаторов

220 В, выходным – 10000 В и током при номинальной нагрузке 160 мА.

Данная схема соединения будет работать эффективно, т.к. трансформаторы идентичны. Необходимым условием нормальной работоспособности является объединение между собой одноимённых выводов обмоток, когда начало одной обмотки подключено к началу другой, а также соединены концы этих обмоток.

Расчёт регулирующего элемента.

Исходные данные: минимальное напряжение сети ($U_{с\ мин}$) – 209 В; максимальное напряжение сети ($U_{с\ мин}$) – 231 В; номинальный ток нагрузки ($I_{н}$) – 0,05 А; минимальный ток нагрузки ($I_{н\ мин}$) – 0,005 А; частота сети (f) – 50 Гц.

Согласно ТУ выбираем двухтактную схему со средней точкой регулирования, выполненную по методу, описанному в [8]. Регулирующий элемент состоит из двух транзисторов VT_1 и VT_2, включённых по встречно-последовательной схеме, каждый из которых зашунтирован в непроводящем направлении диодами VD_1 и VD_2 (рис. 5). Данная схема позволяет увеличить выходную мощность, по сравнению со схемами, где использован один транзистор в качестве регулирующего.

При минимальном напряжении сети напряжение на регулирующем транзисторе минимально, а остальное подводимое напряжение прикладывается к трансформатору TV. Отсюда следует, что номинальные параметры трансформатора необходимо определять при пониженном значении напряжения сети. Учитывая это, действующее напряжение на первичной обмотке трансформатора TV находим по формуле (22):

$$U_{1тр} = U_{смин} - U_{рэмин}, \qquad (22)$$

где $U_{с\ мин}$ – минимальное напряжение сети, В; $U_{рэмин}$ – минимальное действующее напряжение на регулирующем элементе, В.

Определим минимальное действующее напряжение на регулирующем элементе:

$$U_{рэмин} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}(U_{ксрмин} + nU_{0в}), \qquad (23)$$

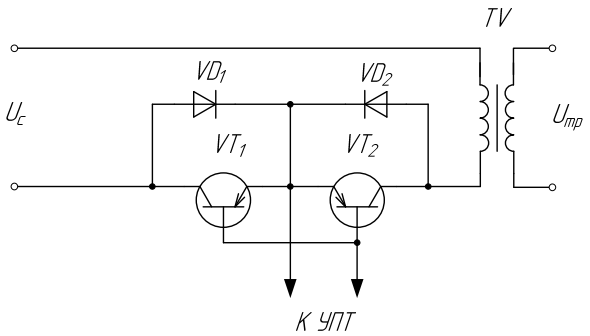


Рисунок 5 – Схема регулирующего элемента

где n – количество последовательно соединённых вентилей; $U_{к\ ср\ мин}$ – напряжения на эмиттер-коллекторном переходе (выбирается в пределах 3–8 В); $U_{0в}$ – напряжения на коммутирующих вентилях (зависит от их типа и составляет 0,3–1,5 В).

$$U_{рэмин} = \frac{3,14}{2\sqrt{2}} \cdot (2 + 2 \cdot 1,5) = 5,5\ В,$$

$$U_{1тр} = 209 - 5,5 = 203,5\ В.$$

Зная выходную мощность стабилизатора, с учётом КПД схемы и $\cos\varphi_{тр}$ трансформатора, найдём действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора по формуле:

$$I_{1тр} = \frac{P_н}{U_{1тр}\eta_{сх}\cos\varphi_{тр}}, \quad (24)$$

где $\eta_{сх} = \eta_в\eta_{тр}$ – КПД силовой части стабилизатора, равный произведению КПД выпрямителя $\eta_в$ и трансформатора $\eta_в$; $P_н$ – выходная мощность источника, Вт.

$$I_{1тр} = \frac{50000 \times 0,05}{203,5 \times 0,86 \times 0,83 \times 0,75} = 19,74\ А.$$

Полученные данные позволяют произвести расчёт регулирующего элемента, который сводится к определению режимов его работы, выбору коммутирующих вентилей и силового транзистора, работающего в ключевом режиме.

Найдём действующее значение тока коллектора силового транзистора:

$$I_к = I_{1тр}, \quad (25)$$

$$I_к = 19,74\ А.$$

Среднее значение тока коллектора связано с током первичной обмотки трансформатора соотношением:

$$I_{кср} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{1тр}, \quad (26)$$

$$I_{кср} = \frac{2\sqrt{2}}{3,14} \times 19,74 = 17,78\ А.$$

Как видно из схемы (рис. 5) первичный ток трансформатора в течение одного полупериода протекает через диод VD_1, а в течение второго – через диод VD_2, поэтому среднее значение тока диода будет равно току коллектора (27):

$$I_{0в} = I_{кср}, \quad (27)$$

$$I_{0в} = 17,78\ А.$$

Средняя за период мощность, рассеиваемая на регулирующем транзисторе, зависит от кратности изменений напряжений сети и выходной мощности источника питания и может быть найдена из выражения (28):

$$P_к^I = \left(\Delta U_с + 1,11 U_{ксрмин}\right) I_к, \quad (28)$$

где $\Delta U_с = U_{с\ макс} - U_{с\ мин}$ – заданные колебания напряжения сети.

Учитывая, что каждый из транзисторов в схеме работает в течение одного полупериода, то рассеиваемая мощность делится между двумя транзисторами, а выражение (28) примет вид:

$$P_к^I = \frac{(\Delta U_с + 1,11 U_{ксрмин}) I_к}{2}, \quad (29)$$

$$P_к^I = \frac{(231 - 209 + 1,11 \times 2) \times 19,74}{2} = 478,1\ Вт.$$

Напряжение на коллекторе регулирующего транзистора довольно сильно зависит от величины нагрузки. При уменьшении тока нагрузки, за счёт внутреннего сопротивления умножителя, напряжение на регулирующем транзисторе увеличится, а его амплитудное значение будет равно (30):

$$U'_{кмакс} = \sqrt{2}(U_{смакс} - U_{1трмин}), \quad (30)$$

где $U_{1тр\ мин}$ – напряжение на трансформаторе при сбросе нагрузки (31):

$$U_{1трмин} = \frac{1}{N\sqrt{2}}(U_н - \Delta I_н r), \quad (31)$$

$\Delta I_н$ – заданные изменения тока нагрузки (32):

$$\Delta I_н = I_н - I_{нмин}, \quad (32)$$

r – полное сопротивление фазы умножителя по формуле (4):

$$r = r_{тр} + r_{пр},$$

N – коэффициент передачи напряжения с первичной обмотки трансформатора на выход источника питания (33):

$$N = \frac{U_н}{U_{1тр}}, \quad (33)$$

$$U_{1трмин} = \frac{1}{\frac{50000}{203,5}\cdot\sqrt{2}} \cdot (50000 - (0,05 - - 0,005) \cdot 4795,38) = 143,3 \text{ В},$$

$$U'_{кмакс} = \sqrt{2} \cdot (231 - 143,3) = 124,08 \text{ В}.$$

Обратное напряжение, прикладываемое к коммутирующим вентилям, найдём по формуле (34):

$$U_{обр} \approx U^{I}_{кмакс}, \quad (34)$$

$$U_{обр} = 124,08 \text{ В}.$$

Исходя из полученных данных, в качестве коммутирующих вентилей выбираем диоды 2Д2990В [6; 4] со следующими параметрами: постоянное обратное напряжение ($U_{обр}$) – 200В; средний прямой ток ($I_{пр\,ср}$) – 20 А; падение напряжения на вентиле ($U_{пр}$) – 1,4 В; средний обратный ток ($I_{обр\,ср}$) – 11 мА.

В качестве регулирующего органа выбираем два n-p-n транзистора типа КТ879А [6; 4] со следующими параметрами: наибольшее напряжение коллектор-эмиттер ($U_{кэ}$) – 150 В; наибольшее напряжение коллектор-база ($U_{кб}$) – 150 В; наибольший ток коллектора ($I_к$) – 50 А; наибольшая мощность, рассеиваемая транзистором ($P_к$) – 250 Вт; обратный ток коллектора ($I_{кб\,0}$) – 3 мА.

При заданных условиях эксплуатации, t = 35°С окружающей среды, рассеиваемая мощность транзистора снижается по закону (35):

$$P_к = \frac{(200 - T_к)}{0\,7}, \quad (35)$$

$$P_к = \frac{(200-35)}{0\,7} = 235,7 \text{ Вт}.$$

Полученное значение удовлетворяет требованию по рассеиваемой мощности, но для более эффективной работы транзисторов под нагрузкой

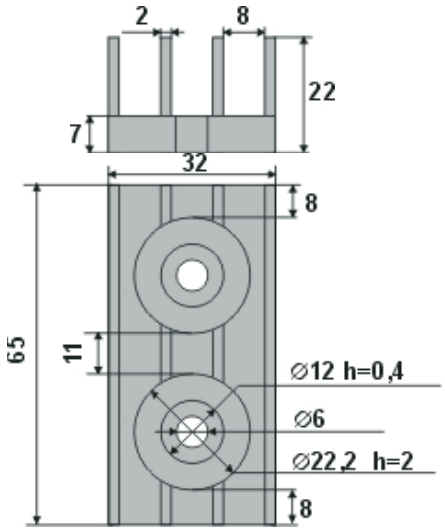


Рисунок 6 – Теплоотвод Р-202

примем ребристый теплоотвод, спроектированный под два транзистора (рис. 6) модели Р-202.

Вывод. Таким образом, авторами разработана структурная схема высоковольтного источника питания со вспомогательными элементами на промышленной частоте 50 Гц.

Выполнен расчёт умножителя напряжения на высоковольтных диодах. Коэффициент полезного действия выпрямителя составил 83,4%. В схеме умножения напряжения выбран газосветный трансформатор марки ТГ-1020-К-У2. Соединение трансформатора выполнено по двухтактной схеме со средней точкой регулирования, регулирующий элемент состоит из двух транзисторов – VT1 и VT2. Данная схема позволяет увеличить выходную мощность, по сравнению со схемами, где использован один транзистор в качестве регулирующего.

Проведённый расчёт позволил создать высоковольтный источник на 60 кВ, который используется в технологических устройствах в лаборатории кафедры «Электрификация» ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА.

Список источников

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

2. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства : учебник / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2020. – 682 с. – ISBN 978-5-16-004658-7. – URL: https://znanium.com/catalog/product/1062340 (дата обращения: 22.03.2022). – Текст : электронный.

3. 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).

4. 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).

5. 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. – URL: https://www.iprbookshop.ru/28768.html (дата обращения: 06.01.2022). – Текст : электронный.

6. Литвинов, И. И. Электроника. Проектирование источника питания микроэлектронных устройств : учебное пособие / И. И. Литвинов, М. А. Купарев, В. Е. Глазырин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – 115 с. – ISBN 978-5-7782-4279-1. – URL: https://rucont.ru/efd/774961 (дата обращения: 06.01.2022). – 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. – ISBN 5-94074-059-6. – URL: https://rucont.ru/efd/203169 (дата обращения: 06.01.2022). – Текст : электронный.

8. 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).

9. 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. – URL: https://www.iprbookshop.ru/90414.html (дата обращения: 06.01.2022). – Текст : электронный.

References

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

2. Tkachenko, F. A. Elektronnye pribory i ustrojstva : uchebnik / F. A. Tkachenko. – Minsk : Novoe znanie ; Moskva : INFRA-M, 2020. – 682 s. – ISBN 978-5-16-004658-7. – URL: https://znanium.com/catalog/product/1062340 (data obrashcheniya: 22.03.2022). – Tekst : elektronnyj.

3. Khnykov, A. V. Teoriya i raschet transformatorov istochnikov vtorichnogo elektropitaniya / A. V. Khnykov. – Moskva : SOLON-Press, 2016. – 125 c. – ISBN 5-98003-060-3. – Tekst : elektronnyj // Elektronno-bibliotechnaya sistema IPR BOOKS : [sajt]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/90370.html (data obrashcheniya: 06.01.2022).

4. Bishop Ouen. Elektronnye skhemy i sistemy / Bishop Ouen. — Saratov : Profobrazovanie, 2017. – 576 c. – ISBN 978-5-4488-0039-9. – Tekst : elektronnyj // Elektronno-bibliotechnaya sistema IPR BOOKS : [sajt]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/64067.html (data obrashcheniya: 06.01.2022).

5. Sem'yan, A. P. 500 skhem dlya radiolyubitelej. Istochniki pitaniya / A. P. Sem'yan. – Sankt-Peterburg : Nauka i Tekhnika, 2007. – 408 c. – ISBN 978-5-94387-372-0. – URL: https://www.iprbookshop.ru/28768.html (data obrashcheniya: 06.01.2022). – Tekst : elektronnyj.

6. Litvinov, I. I. Elektronika. Proektirovanie istochnika pitaniya mikroelektronnykh ustrojstv : uchebnoe posobie / I. I. Litvinov, M. A. Kuparev, V. E. Glazyrin. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2020. – 115 s. – ISBN 978-5-7782-4279-1. – URL: https://rucont.ru/efd/774961 (data obrashcheniya: 06.01.2022). – Tekst : elektronnyj.

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

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

Tekst : elektronnyj // Elektronno-bibliotechnaya sistema IPR BOOKS : [sajt]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/98790.html (data obrashcheniya: 06.01.2022).

9. Gejtenko, E. N. Istochniki vtorichnogo elektropitaniya. Skhemotekhnika i raschet : uchebnoe posobie / E. N. Gejtenko. – Moskva : SOLON-PRESS, 2016. – 447 c. – ISBN 978-5-91359-025-1. – URL: https://www.iprbookshop.ru/90414.html (data obrashcheniya: 06.01.2022). – Tekst : elektronnyj.

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.

Артем Сергеевич Угловский – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия», spin-код: 3717-5731.

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, Professor, Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agricultural Academy", spin-code:5673-4145.

Artem S. Uglovskiy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agricultural Academy", spin-code: 3717-5731.

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