

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н.В. Омельченко

О С Н О В Ы СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебно-методическое пособие
для выполнения контрольных заданий
по дисциплинам «Силовая электроника»,
«Силовые полупроводниковые преобразователи электроэнергии»
на тему: «Основы разработки и расчёт типового
полупроводникового преобразователя электроэнергии»
для студентов очной и заочной форм обучения
направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Севастополь
СевГУ
2019

УДК 621.314(076)
ББК 31.264.5я73
О572

Р е ц е н з е н т ы:

А.В. Углов – канд. техн. наук, доцент
К.П. Путилин – канд. техн. наук, доцент

Омельченко Н.В.

О572 Основы силовой электроники: учеб.-метод. пособие для выполнения контрольных заданий. – Севастополь: СевГУ, 2019. - 28 с.: ил.

В учебно-методическом пособии изложены требования к оформлению, общий порядок выполнения контрольного задания, подробно рассмотрен пример с последовательностью проведения расчётов, в приложениях приведены параметры современных транзисторов и диодов, а так же типовые участки схем силовых преобразователей электроэнергии. Предложенный пример является частным случаем выполнения задания и не отображает типовой алгоритм расчёта параметров. Пособие не содержит универсального алгоритма расчета, т.к. варианты заданий индивидуальны и помимо различных параметров предполагают различного вида схемные решения.

УДК 621.314(076)
ББК 31.264.5я73

Учебно-методическое пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Электроэнергетические системы АС», протокол № 10 от 11 января 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Современный человек не представляет своего существования без электричества, различных электрических и электронных устройств. Выработка электроэнергии и её распределение сопряжено с регулированием работы механизмов, которое в большинстве случаев осуществляется с помощью электронных устройств. Исполнительные органы, приводящие в движение механизмы и преобразователи родов и свойств тока, используемые в цепях питания всех без исключения электронных устройств, являются устройствами силовой электроники.

Силовая электроника – это область техники, связанная с управлением потоками электроэнергии посредством мощных электронных приборов, которые, как правило, работают в ключевых режимах, пропуская или блокируя поток электроэнергии, что позволяет изменением алгоритмов их переключения управлять усредненными значениями мгновенной мощности, токов и напряжений по требуемым законам. Это интенсивно развивающаяся область науки и техники, охватывающая по существу все сферы деятельности человека, — промышленность, добывающие отрасли, транспорт, связь. Основными элементами силовой электроники служат полупроводниковые приборы, обладающие характеристикой ключевого элемента, которые коммутируют (включают и отключают) участки электрической цепи. Главным фактором, определяющим значимость и перспективность устройств силовой электроники, является их способность управлять на повышенных частотах большими потоками мощности практически по любому закону модуляции энергетических импульсов при минимальных мощностях, затрачиваемых на управление, что приводит к уменьшению размеров фильтров и значительной экономии ресурсов при производстве.

Выбор полупроводников оказывает существенное влияние на работу электрических систем, т.к. некорректный подбор типов транзисторов, диодов, тиристоров приводит к неэффективному использованию полупроводниковых элементов, возможному увеличению тепловых потерь, как следствие перегреву устройств, росту перенапряжений, выходу силовых преобразователей из строя, приводящих к повреждению и простоя подключенного к ним оборудования.

Целью контрольного задания является ознакомление студентов с конструкциями и принципом работы устройств силовой электроники, формированием навыков и умений анализировать и составлять принципиальные электрические схемы преобразователей электроэнергии, рассчитывать нагрузки на элементы полученных схем.

Пособие составлено на основе стандартного подхода к проектированию и расчёту силовых преобразователей, применяемого конструкторскими бюро для нужд промышленности, упрощенного до академического уровня, характерного для студентов 3-го курса обучения по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОГО ЗАДАНИЯ

Рассчитать параметры и выбрать элементную базу (полупроводники) для силовой части устройства типа _____ **X** _____ выполненного по схеме _____ **Y** _____, номинальной выходной мощностью _____ **Z** _____, предназначенного для работы в _____ **W** _____ диапазоне температур. Входное напряжение устройства _____ **V** _____, выходное напряжение устройства _____ **M** _____. Частоту переключения ключей для всех преобразователей принять равной $f = 25$ кГц.

Тип устройства X:

- 1 – частотный преобразователь с явно выраженным звеном постоянного тока
- 2 – сварочный инвертор постоянного тока
- 3 – сварочный инвертор переменного тока
- 4 – 1-фазный инвертор напряжения (автономный) с синусоидальным выходным напряжением
- 5 – 1-фазный инвертор напряжения (автономный) с прямоугольным выходным напряжением («модифицированный, китайский синус»)
- 6 – 1-фазный ведомый инвертор тока
- 7 – 3-фазный ведомый инвертор тока
- 8 – зарядное устройство (для аккумуляторных батарей)

Схема устройства Y:

- 1 – без повышающего или понижающего промежуточного звена постоянного тока
- 2 – с повышающим преобразователем типа BOOST на шине постоянного тока
- 3 – с понижающим преобразователем типа BUCK на шине постоянного тока
- 4 – с 2-тактным полумостовым гальванически развязанным согласующим преобразователем на шине постоянного тока
- 5 – с 2-тактным мостовым гальванически развязанным согласующим преобразователем на шине постоянного тока

Выходная мощность устройства Z

(мощность в кВ·А указана для устройств с выходом переменного тока):

P	S
1 – 1,0 кВт	1,3 кВ·А
2 – 1,5 кВт	2,2 кВ·А
3 – 2,2 кВт	3,0 кВ·А
4 – 3,0 кВт	4,0 кВ·А
5 – 4,0 кВт	5,5 кВ·А
6 – 5,5 кВт	7,0 кВ·А
7 – 7,0 кВт	10 кВ·А
8 – 10 кВт	15 кВ·А
9 – 15 кВт	17 кВ·А
10 – 20 кВт	25 кВ·А
11 – 25 кВт	32 кВ·А
12 – 0,55 кВт	0,7 кВ·А
13 – 0,7 кВт	1,0 кВ·А

Температурный диапазон W:

1 – промышленный: -40 °С ... +85 °С

2 – коммерческий: 0 °С ... +70 °С

Входное напряжение V:

1 – переменный ток 3 фазы 220/127 В, питание линейным напряжением, $f = 50$ Гц

2 – переменный ток 1 фаза 220В, $f = 50$ Гц

3 – переменный ток 3 фазы 380/220 В, питание линейным напряжением, $f = 50$ Гц

4 – переменный ток 1 фаза 380 В, $f = 50$ Гц

5 – постоянный ток 12 В ± 10 %

- 6** – постоянный ток $24 \text{ В} \pm 10 \%$
- 7** – постоянный ток $48 \text{ В} \pm 10 \%$
- 8** – постоянный ток $110 \text{ В} \pm 10 \%$
- 9** – постоянный ток $220 \text{ В} \pm 10 \%$

Выходное напряжение устройства М:

- 1** – постоянный или переменный ток напряжением $U = 27 \text{ В}$
- 2** – постоянный или переменный ток напряжением $U = 45 \text{ В}$
- 3** – постоянный или переменный ток напряжением $U = 60 \text{ В}$
- 4** – для подключения электродвигателя, предназначенного для работы в сети 3-фазного переменного тока напряжением (линейным) $U = 220 \text{ В}$
- 5** – для подключения электродвигателя, предназначенного для работы в сети 3-фазного переменного тока напряжением (линейным) $U = 380 \text{ В}$
- 6** – $U = 220 \text{ В}$ (для 3-фазных устройств – линейное, для 1-фазных – фазное)
- 7** – $U = 380 \text{ В}$ (для 3-фазных устройств – линейное, для 1-фазных – фазное)
- 8** - постоянный ток напряжением $U = 14,6 \text{ В}$

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

№ варианта	X	Y	Z	W	V	M
1	1	1	10	2	3	5
2	6	2	1	1	8	6
3	7	5	1	2	7	6
4	1	2	2	1	9	4
5	1	2	1	1	1	5
6	6	2	2	2	9	7
7	7	4	2	1	8	6
8	1	3	1	1	3	4
9	1	4	1	2	7	4
10	7	2	2	1	8	6
11	6	4	2	2	9	6
12	1	2	2	1	2	5
13	1	2	3	2	8	4
14	6	4	3	1	9	6
15	1	5	2	2	8	5
16	1	2	1	2	9	4

№ варианта	X	Y	Z	W	V	M
17	7	5	1	1	7	6
18	6	2	1	2	7	6
19	1	1	8	1	3	4
20	1	2	3	2	2	5
21	7	1	2	1	8	6
22	1	3	3	1	4	4
23	1	5	1	2	7	5
24	1	3	2	1	3	4
25	6	2	2	1	9	6
26	7	4	3	2	9	7
27	1	4	2	1	8	4
28	8	5	1	2	7	1
29	1	1	7	2	1	4
30	7	4	3	1	8	6
31	1	1	4	2	4	5
32	6	1	2	1	9	6
33	1	2	5	1	2	5
34	1	3	4	2	4	4
35	1	1	8	1	1	5
36	1	2	5	2	1	5
37	7	2	1	1	8	6
38	1	1	6	2	2	4
39	6	2	2	1	9	6
40	1	1	10	2	1	4
41	8	3	1	2	2	1
42	1	3	3	1	4	4
43	1	1	9	1	3	5
44	7	2	1	1	8	6
45	6	2	2	2	2	6
46	1	5	6	2	9	4
47	1	4	5	2	8	5
48	8	3	1	2	8	3
49	1	1	8	2	4	5

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

№ варианта	X	Y	Z	W	V	M
1	2	4	7	2	2	2
2	3	5	6	1	4	1
3	4	2	5	2	7	6
4	5	2	6	1	6	6
5	2	5	8	1	3	1
6	3	4	9	2	9	3
7	5	4	6	1	6	6
8	4	5	7	1	7	7
9	3	5	8	2	3	3
10	2	4	9	1	1	3

X	Y	Z	W	V	M	X
11	4	5	6	2	6	6
12	5	4	7	1	7	7
13	8	3	3	2	1	1
14	3	4	9	1	4	1
15	2	5	10	2	3	2
16	8	3	2	2	2	8
17	7	5	6	1	8	6
18	5	2	5	2	6	6
19	8	3	2	1	1	8
20	3	5	10	2	9	3
21	4	2	6	1	7	7
22	5	4	7	1	8	6
23	8	5	4	2	1	1
24	5	4	6	1	7	7
25	4	5	5	1	6	6
26	3	4	6	2	3	1
27	2	4	7	1	9	1
28	8	5	3	2	2	1
29	6	5	5	2	7	6
30	5	2	5	1	7	6
31	4	2	6	2	6	6
32	3	5	7	1	2	3
33	2	5	8	1	4	2
34	1	1	10	2	1	4
35	2	4	10	1	1	2
36	8	5	2	2	2	8
37	4	5	5	1	8	7
38	3	5	8	2	1	3
39	2	4	9	1	2	1
40	5	5	5	2	8	6
41	3	4	9	2	3	1
42	2	5	10	1	3	3
43	4	4	5	1	7	6
44	8	3	3	1	1	1
45	5	2	6	2	7	6
46	7	4	4	2	8	6
47	2	4	9	2	1	1
48	3	5	10	2	4	2
49	4	2	5	2	8	7
50	1	1	8	2	4	5

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОГО ЗАДАНИЯ

I) Составить структурную (функциональную) схему устройства, отобразить входные и выходные напряжения.

II) Изобразить собранную электрическую принципиальную схему в соответствии со структурной (функциональной) схемой со всеми элементами силовых цепей: полупроводниками, индуктивностями, ёмкостями.

III) Рассчитать напряжения на основных участках схемы (между структурными блоками).

IV) Определить коэффициенты преобразования статических преобразователей, если таковые входят в состав схемы.

V) Рассчитать токи во всех звеньях постоянного тока схемы.

VI) Вычислить токи во всех элементах схемы в соответствии с их режимами работы.

VII) Выбрать полупроводниковые элементы (диоды и транзисторы). Указать номинальные напряжения конденсаторов, используемых в схеме.

VIII) Выполнить тепловой расчет элементов схемы и проверку на допустимость использования.

При выборе элементной базы разрешается пользоваться любыми источниками документации элементной базы при условии, что копию технической документации на полупроводник (диод, транзистор) необходимо приложить к работе в распечатанном виде с обозначением его точной модели.

ПРИМЕР РАСЧЁТА С ПОЯСНЕНИЯМИ

Задание

Рассчитать параметры и выбрать элементную базу (полупроводники) для силовой части устройства типа сварочный инвертор постоянного тока, выполненного по схеме без повышающего или понижающего промежуточного звена постоянного тока, номинальной выходной мощностью $P = 4,0$ кВт, предназначенного для работы в промышленном диапазоне температур T : -40 °С ... $+85$ °С. Входное напряжение устройства – одна фаза переменного тока напряжением $U_{BX} = 220$ В, выходное напряжение – постоянный ток напряжением $U_{ВЫХ} = 0,45$ В.

Пояснения к пунктам

I) Разработка структурной / функциональной схемы

На структурной / функциональной схеме должны быть отражены основные блоки, применяемые в устройстве. Разделение на блоки целесообразно проводить по роду тока либо по величине напряжения. Разработку схемного решения следует осуществлять в соответствии с вариантом зада-

ния и исходя из общепринятых принципов формирования схемы из отдельных блоков.

В **примере** функциональная схема, изображённая на рис. 1, будет состоять из набора блоков:

- 1) выпрямителя;
- 2) мостового или полумостового 2-тактного преобразователя, в состав которого входит инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный высокой частоты, трансформатор и выпрямитель на вторичной стороне высокочастотного трансформатора;
- 3) сглаживающего токо-инерционного дросселя с ограничителем перенапряжений (ОПН), который необходимо устанавливать по причине присутствия на выходе устройства электрической дуги.

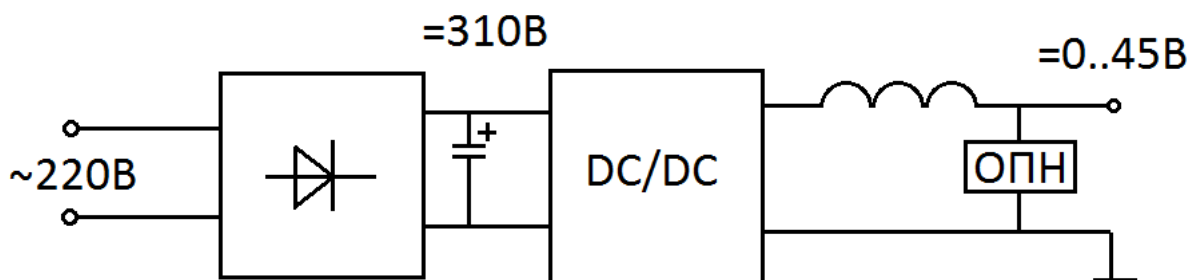


Рисунок 1. Функциональная схема

II) Изображение электрической принципиальной схемы

Электрическая принципиальная схема должна отображать все элементы, включенные в силовую схему. Транзисторы изображаются в соответствии с выбранным типом.

Для **примера** выберем:

- 1) входной выпрямитель – пассивный диодный выпрямитель, собранный по схеме Гретца (диоды D1 D2 D3 D4);
- 2) преобразователь постоянного тока, состоящий из 2-х тактного полумостового инвертора (транзисторы VT1 VT2), высокочастотного трансформатора (Т1) и полумостового выпрямителя (диоды D5 D6);
- 3) сглаживающий токо-инерционный дроссель с полупроводниковым ограничителем перенапряжений – двунаправленным супрессором VD7, представляющим собой симметричный защитный диод.

На рис. 2 представлена электрическая принципиальная схема для рассматриваемого примера.

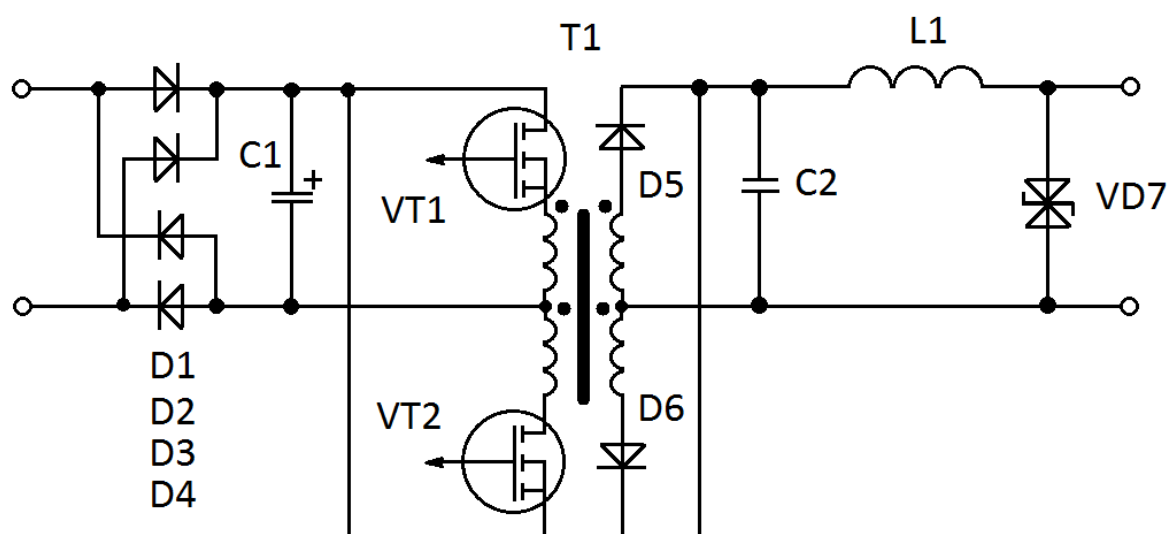


Рисунок 2. Электрическая принципиальная схема

III) Расчёт напряжений на основных участках схемы

Поскольку в схеме только одно неизвестное напряжение, необходимо рассчитывать его, приняв равным амплитудному значению входного напряжения:

$$U_{C1} = U_{BX} \cdot k_{\text{формы}}$$

$$U_{BX} = 220 \text{ В по заданию}$$

$k_{\text{формы}}$ – коэффициент формы, равный соотношению амплитуды синусоидального сигнала к его действующему значению $= 1,41(\sqrt{2})$ – выбирается таковым в связи с наличием накопительного конденсатора

$$U_{C1} = 220 \cdot 1,41 = 310 \text{ В}$$

IV) Расчёт коэффициентов преобразования статических преобразователей.

В составе схемы один статический преобразователь (преобразователь постоянного тока, среднее звено на функциональной схеме), входное напряжение $U_{BX} = 310 \text{ В}$, выходное напряжение $U_{ВЫХ} = 45 \text{ В}$, таким образом, коэффициент преобразования

$$K_{DC} = U_{ВЫХ} / U_{C1}$$

$$K_{DC} = 45/310 = 0,145$$

V) Расчёт токов во всех звеньях постоянного тока

С учётом того, что в задании указана выходная мощность устройства, расчёт необходимо начинать с наиболее близкого к выходу (или являющимся выходом) звена постоянного тока:

$$I_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВЫХ}}$$

$P_{\text{ВЫХ}} = 4 \text{ кВт}$ – выходная мощность по заданию для примера

$$I_{\text{ВЫХ}} = 4000/45 = 88,9 \text{ А}$$

Ток промежуточного звена постоянного тока (напряжением 310 В) рассчитывается как произведение коэффициента преобразования K_{DC} и $I_{\text{ВЫХ}}$:

$$I_{C1} = K_{DC} \cdot I_{\text{ВЫХ}}$$

$$I_{C1} = 0,145 \cdot 88,9 = 12,9 \text{ А}$$

Кроме того, можно учесть ориентировочный КПД преобразователя (η). Для преобразователей мощностью до 10 кВт целесообразно принимать $\eta = 90 \%$ на каждое звено, следовательно, ток I_{DC1} , взятый с учетом потерь, будет равен:

$$I_{DC1} = I_{C1} / \eta$$

$$I_{DC1} = 12,9 / 0,9 = 14,3 \text{ А}$$

VI) Расчёт токов во всех элементах схемы в соответствии с их режимами работы

Диоды D5 D6 составляют выпрямитель выходного звена постоянного тока и работают попеременно исходя из принципа действия 2-тактного преобразователя постоянного тока. Каждый диод пропускает полный выходной ток устройства в течение половины периода, тогда максимальные значения тока диодов:

$$I_{\text{MAX D5}} = I_{\text{MAX D6}} = I_{\text{ВЫХ}} = 88,9 \text{ А}$$

действующие значения тока диодов:

$$I_{D5} = I_{D6} = I_{\text{Вых}}/2 = 44,45 \text{ A}$$

Транзисторы VT1 VT2 также пропускают через себя весь ток звена постоянного тока, к которому они подключены в течение половины периода, следовательно,

максимальные значения тока транзисторов:

$$I_{\text{MAX VT1}} = I_{\text{MAX VT2}} = I_{DC1} = 14,3 \text{ A}$$

действующие значения тока транзисторов:

$$I_{VT1} = I_{VT2} = I_{DC1}/2 = 7,15 \text{ A}$$

Диоды D1 D2 D3 D4 входят в состав схемы Гретца и действующий ток через каждый диод будет равен половине суммарного тока звена постоянного тока:

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = I_{DC1}/2 = 7,15 \text{ A}$$

Максимальный ток в этой схеме следует принять много большим в связи с импульсным характером работы диода. В основной электрической схеме устройства используется конденсатор, из-за которого диод находится в открытом состоянии очень короткое время (10 % - 15 % от периода вместо стандартных 50 %). Это связано с тем, что на ёмкости напряжение падает достаточно медленно, даже когда сварочный инвертор работает на полной нагрузке. Таким образом, необходимо при выборе диода учесть допустимый («максимальный» или «повторяющийся импульсный») ток:

$$I_{\text{MAX D1}} = I_{D1}/0,1 = 7,15/0,1 = 71,5 \text{ A}$$

VII) Выбор полупроводниковых элементов

Параметры, указываемые производителем полупроводников, не должны значительно превышать требуемые, так как выбор слишком мощного полупроводника с неоправданно большим запасом влечёт неоптимальность и удорожание конструкции.

Рекомендуемые допуски по параметрам:

Допустимый запас по току:

- не более чем в 1,7 раза по одному из параметров (максимальный или номинальный ток), за исключением полупроводников с токами менее 15 А.

Допустимый запас по напряжению:

- для полупроводников, работающих при напряжении до 100 В не более, чем в 5 раз (большая часть силовых полупроводников выпускается на напряжения 200 В и выше);

- для полупроводников, работающих при напряжении до 200 В не более, чем в 3 раза;

- для всех остальных полупроводников – не более чем в 2,5 раза (диапазон 2–2,5 раза допустим для диодов и транзисторов, работающих при напряжении 550 В – 650 В).

Во всех случаях недопустимо оставлять запас по напряжению менее 15 % от расчётного.

Не следует выбирать быстро переключающиеся полупроводники там, где это не требуется, то есть, для использования быстродействующих диодов в сетевом выпрямителе должно быть основание, например, высокие требования по току.

Допустимо применение готовых модульных сборок элементов с последующим тепловым расчетом.

Для диодов **D5 D6** подобран тип VS-60EPU02 со следующими параметрами:

- длительно допустимый ток 60 А,

запас составляет $\frac{60-44,5}{44,5} = 34,8\%$ от расчётного;

- предельно допустимый ток 800 А;

- рабочее напряжение 200 В;

запас составляет $\frac{200-45}{45} = 340\%$ - 3,4 раза от расчётного;

- время закрывания 50 нс – незначительно по сравнению с периодом рабочей частоты преобразователя $T = 1/f = 1/25000 = 40$ мкс. Диод можно использовать в выбранном месте;
- термосопротивление кристалл-корпус $0,7$ °К/Вт (°Кельвин/Ватт);
- прямое падение напряжения $U_{пр} = 0,81$ В;
- сопротивление в открытом состоянии и потери на переключение производителем не указаны, можно пренебречь ими при тепловом расчете.

Для транзисторов **VT1 VT2** выбран тип IRG4PC30KD со следующими параметрами:

длительно допустимый ток 16 А. Запас составляет $\frac{16-7,15}{7,15} = 123,7\%$ от расчетного;

предельно допустимый ток 58 А;

рабочее напряжение 600 В. Запас составляет $\frac{600-310}{310} = 93\%$ от расчётного;

время открывания 160 нс + закрывания 42 нс = 202 нс незначительно по сравнению с периодом рабочей частоты преобразователя ($T = 1/f = 1/25000 = 40$ мкс);

транзистор можно использовать в выбранном месте;

термосопротивление кристалл-корпус $1,2$ °К/Вт;

прямое падение напряжения 2,21 В;

потери на переключение 1,18 мДж.

Для диодов **D1 D2 D3 D4** подобран тип STTH60L06 со следующими параметрами:

длительно допустимый ток 60 А;

предельно допустимый повторяемый ток 90 А. Запас составляет $\frac{90-71,5}{71,5} = 26,7\%$ от расчётного;

рабочее напряжение 600 В. Запас составляет $\frac{600-310}{310} = 93\%$ от расчётного;

время закрывания 70 нс. Проверка не требуется, диоды работают при сетевой частоте 50 Гц;

термосопротивление кристалл-корпус $0,75^{\circ}\text{K/Вт}$;

прямое падение напряжения 1,2 В;

сопротивление в открытом состоянии и потери на переключение производителем не указаны, пренебречь ими при тепловом расчёте.

Напряжения на конденсаторах U_C выбираются как ближайшие (в сторону «больших») из стандартного ряда относительно действующих значений, исходя из запаса не менее 15 % от расчётного:

$$U_C = (6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000) \text{ В}$$

VIII) Уточнённый тепловой расчёт в общем виде

1) Определить максимальную скважность открывания транзистора за период широтно-импульсной модуляции (ШИМ) K_S - коэффициент, характеризующий время работы транзистора на расчетном токе. Выбор зависит от схемы, в которой работает ключ:

- частотные преобразователи, инверторы 0 % - 100 % ($K_S = 1$)
- понижающие, повышающие, прямоходовые, обратногоходовые преобразователи 0 % - 50 % ($K_S = 0,5$)

2) Определить коэффициент формы выходного тока преобразователя, проходящего через ключ K_f (следует применять, если ранее в расчете тока транзистора не была учтена форма тока устройства):

- частотные преобразователи, инверторы с синусоидальным выходным напряжением $K_f = 0,709$
- инверторы с прямоугольным выходным напряжением, понижающие, повышающие, прямоходовые, обратногоходовые преобразователи $K_f = 1,0$

3) Определить коэффициент K_t , характеризующий работу транзистора на номинальном токе в течение длительного времени. K_t зависит от схемы, в которой используется транзистор:

- мостовая схема Гретца, в том числе инверторы и двухтактные преобразователи $K_t = 0,5$
- мост Ларионова $K_t = 0,333$

- понижающие, повышающие, прямоходовые, обратногоходовые преобразователи $K_t = 1,0$

4) Рассчитать потери на переключение с учетом корректирующих коэффициентов:

$$P_s = K_s \cdot K_f \cdot K_t \cdot f \cdot P_{sw} \cdot I / I_n, \text{ где}$$

f – частота переключения ключей в устройстве,

P_{sw} – потери на переключение при номинальном токе,

I – расчётный ток транзистора,

I_n – номинальный (максимальный) ток транзистора

Формула учитывает нормирование потерь к проходящему через транзистор току. В реальности зависимость потерь на переключения от тока транзистора носит приблизительно линейный характер.

5) Вычислить статические потери в транзисторе:

$$\text{Для IGBT: } P_{st} = K_s \cdot K_f \cdot K_t \cdot dU \cdot I, \text{ где}$$

dU – прямое падение напряжения

$$\text{Для MOSFET: } P_{st} = K_s \cdot K_f \cdot K_t \cdot R_j \cdot I^2, \text{ где}$$

R_j – сопротивление открытого канала транзистора

6) Рассчитать полное тепловыделение на транзисторе. Проверить, может ли его корпус отводить расчётное количество тепла. Сравнить с максимальной рассеиваемой мощностью, данной в документации:

$$P_t = P_{st} + P_{sw};$$

$$P_t < P_{MAX}, \text{ где}$$

P_{MAX} – максимальная рассеиваемая мощность

Если условие не удовлетворяется, смотреть пояснение к проверке в пункте 9.

7) Определить суммарное тепловое сопротивление перехода корпус-кристалл и корпус-радиатор

$$R_{te} = R_{tj} + R_{tc}, \text{ где}$$

R_{tj} – термическое сопротивление кристалл-корпус,

R_{tc} – термическое сопротивление корпус – радиатор, для всех вариантов задания следует принять равным 0,12 °K/Вт (°Кельвин/Ватт)

8) Рассчитать перегрев кристалла транзистора относительно радиатора:

$$dT = P_t \cdot R_{te}$$

9) Определить температуру кристалла транзистора и проверить на допустимость:

$$T = T_c + dT, \text{ где}$$

T_c – температура радиатора, выбирается в зависимости от температурного диапазона устройства, принимается равной верхней границе температурного диапазона:

- коммерческий температурный диапазон: 0 °C ... +70 °C

- промышленный температурный диапазон: -40 °C ... +85 °C

10) Выполнить проверку $T < 125$ °C.

Если расчётное значение удовлетворяет этому условию, то выбранный транзистор может работать в преобразователе при заданных параметрах расчетного тока, температуры, частоты переключения ключей. В противном случае следует принять меры:

Для IGBT: выбрать другой транзистор, рассчитанный на больший ток, с меньшим термическим сопротивлением или меньшим прямым падением напряжения.

Для MOSFET: выбрать транзистор с лучшими параметрами, либо увеличить количество параллельно включенных транзисторов. В таком случае ток одного транзистора (ранее рассчитанного) разделится пропорционально между ними. После принятия мер по снижению тепловыделения следует повторить тепловой расчет.

ПЕРЕЧЕНЬ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ

1. Классификация устройств силовой электроники.
2. Диод. Схема замещения в открытом и закрытом состояниях. ВАХ диода. Основные параметры. Ожидаемая осциллограмма при работе в составе выпрямителя.
3. Принципы работы схем выпрямителей, основанные на диодах:
 - схема Гретца. Ожидаемая осциллограмма;
 - схема Ларионова. Ожидаемая осциллограмма.
4. Ключевые схемы замещения мостовых схем Грета, Ларионова.
5. Понятие о биполярных транзисторах IGBT. Основные параметры. Преимущества и недостатки.
6. Понятие о полевых транзисторах МОП (MOSFET). Основные параметры. Преимущества и недостатки.
7. BUCK – прямой понижающий импульсный преобразователь постоянного напряжения (DC/DC). Схема электрическая принципиальная. Назначение элементов. Принцип работы.
8. BOOST – прямой повышающий импульсный преобразователь постоянного напряжения (DC/DC). Схема электрическая принципиальная. Назначение элементов. Принцип работы.
9. Что такое широтно-импульсная модуляция (ШИМ)?
10. Трансформаторные преобразователи. Однотактный прямоходовой преобразователь с ШИМ. Схема работы стабилизатора напряжения на прямоходовом однотактном преобразователе.
11. Трансформаторные преобразователи. Двухтактный полумостовой преобразователь. Схема. Особенности применения. Достоинства и недостатки.
12. Трансформаторные преобразователи. Двухтактный мостовой преобразователь. Схема. Особенности применения. Достоинства и недостатки.
13. Однофазный мостовой инвертор напряжения с ШИМ на основной частоте.
14. Частотный преобразователь. Назначение. Звенья структурной схемы ЧП. Принципиальная схема звена постоянного тока (ЗПТ) преобразователя частоты. Принцип работы.
15. Принципиальная схема мостового трёхфазного инвертора преобразователя частоты. Принцип действия. Работа VT.
16. Сварочный инвертор. Схема. Принцип работы. Возможные комбинации звеньев.
17. В чём разница между сварочным инвертором постоянного тока и сварочным инвертором переменного тока.
18. Зарядное устройство. Схема, назначение, принцип действия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. К.П.Путилин, П.А.Максимюк, А.А.Старочкин. Основы корабельной преобразовательной техники: Учеб.пособие. Севастополь: СВВМИУ, 1986. 192 с.
2. Зиновьев, Г. С. Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров / Г. С. Зиновьев. 5-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2015. 667 с. (Серия: Бакалавр. Академический курс). ISBN 978-5-9916-1972-1
3. Семенов Б.Ю. Силовая электроника. От простого к сложному. Издательство: СОЛОН-Пресс, 2015. 416 с. ISBN: 978-5-91359-148-7
4. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника Издательство: ИД МЭИ, 2016. 632 с. ISBN: 978-5- 383-01023-5
5. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учебник и практикум для академического бакалавриата / Ю. К. Розанов, М. Г. Лепанов; под ред. Ю. К. Розанова./ М.: Издательство Юрайт, 2018. 206 с. (Серия: Бакалавр. Академический курс). ISBN 978-5-9916-9440-7

Приложение А

Параметры транзисторов IGBT

Тип	Длительный Ток*, А	Максимальный Ток*, А	Напряжение, В	Потери на пере- ключение**, мДж	Термическое со- противление кристалл- корпус	Прямое падение напряжения	Максимальная рассеиваемая мощность***, Вт	Тип корпуса
IRG4PH50UD	25	45	1200	6.38	0.64	2.78	78	TO-247
IRG4PH40UD	21	41	1200	7.04	0.77	2.43	65	TO-247
IRG4PH30KD	10	20	1200	1.56	1.2	3.10	42	TO-247
IRG4PH20KD	5	11	1200	0.89	2.1	3.17	24	TO-247
IRG4PC60UD	40	75	600	4.9	0.24	1.5	210	TO-247
IRG4PC50UD	27	55	600	2.3	0.64	1.65	78	TO-247
IRG4PC40UD	20	40	600	4.7	0.77	1.5	65	TO-247
IRG4PC30KD	16	34	600	1.18	1.2	2.21	42	TO-247
IGW15T120	15	30	1200	4.1	1.1	1.7	110	TO-247
IGW25N120H3	25	50	1200	43	0.46	2.05	156	TO-247
IGW75N65H5	75	120	650	4.0	0.38	1.65	198	TO-247
IGW60T120	60	100	1200	15,8	0,33	1,7	375	TO-247
IRG7PH28UD	15	30	1200	1.4	1.09	1.95	46	TO-247
IRG7PH35UD	20	50	1200	2,87	0,7	1.9	70	TO-247
IRG7PH37KD	25	45	1200	2,7	0,6	1,9	86	TO-247
IRG7PH42UD	45	85	1200	4,96	0,39	1,7	130	TO-247
IRG7PH46UD	40	108	1200	6,4	0,32	1,7	156	TO-247
IRG7PH50UD	50	140	1200	7,8	0,27	1,7	278	TO-247

*Номинальный ток транзистора

** При номинальном токе

*** По данным производителя кристалла транзистора

Параметры транзисторов MOSFET

Тип	Длительный Ток*, А	Максимальный Ток*, А	Напряжение, В	Термическое со- противление кристалл- корпус,,	Сопротивление открытого канала транзистора, мОм	Максимальная рассеиваемая мощность***, Вт	Тип корпуса
IRFP2907Z	90	120	75	0,49	4,5	310	TO-247
IRFP3077	120	140	75	0,44	2,8	310	TO-247
IRFP4368	195	250	75	0,29	1,46	310	TO-247
IRFP4410Z	69	97	100	0,65	7,2	230	TO-247
IRFP4468	195	200	100	0,29	2,0	520	TO-247
IRFP4310Z	95	134	100	0,54	4,8	280	TO-247
IRFP4110	120	130	100	0,4	3,7	370	TO-247
IRFP4568	121	171	150	0,29	4,8	517	TO-247
IRFP4321	55	78	150	0,49	12	310	TO-247
IRFP4227	46	65	200	0,45	21	330	TO-247
IRFP4668	92	130	200	0,29	8	520	TO-247
IRFP4332	40	57	250	0,42	29	360	TO-247
IRFP4768	66	93	250	0,29	14,5	520	TO-247
IRFP4229	31	44	250	0.49	38	310	TO-247
IPW60R099	24	37	650	0.45	99	278	TO-247
IPW60R070	33.8	53.5	650	0.32	70	390	TO-247
IPW60R330	7.6	12.0	650	1.35	330	93	TO-247
IPW60R041P	49	77.5	650	0.26	41	481	TO-247

*Номинальный ток транзистора

** При номинальном токе

*** По данным производителя кристалла транзистора

Потери на переключение у MOSFET производителем не указаны из-за их малых значений.

Параметры некоторых современных диодов

Тип	Длительный Ток*, А	Максимальный Ток*, А	Напряжение, В	Термическое сопротивление кристалл- корпус, °С/Вт	Прямое падение напряжения, В	Максимальная рассеиваемая мощность***, Вт	Тип корпуса
IDW100E60	96	150	600	0,4	1,65	198	TO-247
IDH20G120	20	27	1200	0,35	2,5	330	TO-220
IDW75D65	75	150	650	0,46	1,32	163	TO-247
IDW30E65	30	60	650	1,06	1,35	142	TO-247
IDW15E65	15	30	650	1,75	1,6	85	TO-247
IDP40E65	40	80	650	0,75	1,6	200	TO-247
IDP45E60	47	71	600	0,8	1,5	187	TO-247
IDH16G120	16	25	1200	0,46	2,25	250	TO-220
IDH08G120	8	22,8	1200	0,92	2,25	126	TO-220
IDH16G65	16	34	650	0,9	1,25	97	TO-220
IDH20G120	20	56	1200	0,35	2,0	330	TO-220
IDH10G120	10	31,9	1200	0,7	2	165	TO-220
IDP12E120	17	28	1200	1,3	1,7	96	TO-220
IDW50E60	50	80	600	0,8	1,65	187	TO-247
SDP04S60	4	5,6	600	4,1	1,7	36,5	TO-220
IDH12S60	12	18	600	1,3	1,7	115	TO-220

Рекомендуемые сайты для поиска типов полупроводников:

<https://www.digikey.com/products/en/discrete-semiconductor-products>

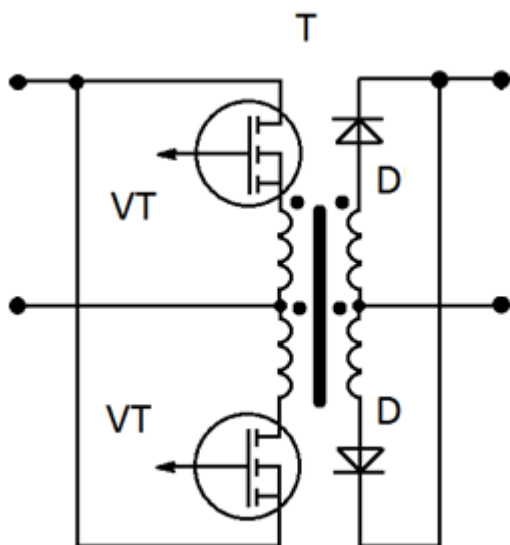
https://eu.mouser.com/Semiconductors/Discrete-Semiconductors/_/N-awhng/

Типовые схемные решения

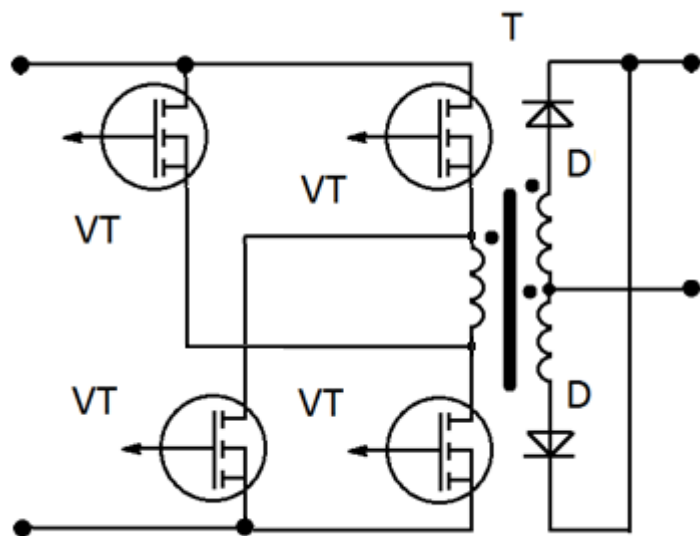
(без накопительных и рабочих конденсаторов,

вход - слева, выход - справа):

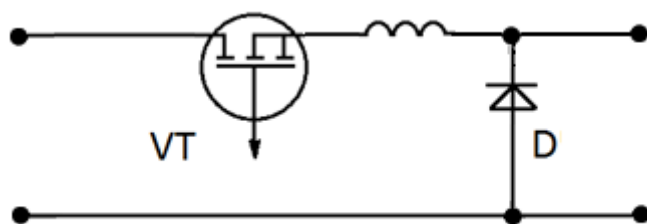
- 1) 2-тактный полумостовой гальванически развязанный преобразователь постоянного тока



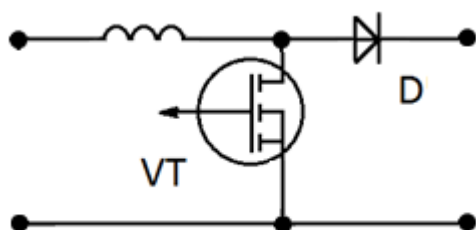
- 2) 2-тактный мостовой гальванически развязанный преобразователь постоянного тока (вторичная обмотка может быть выполнена без средней точки, тогда требуется применять со стороны с/вторичной обмотки трансформатора выпрямитель, собранный по схеме Гретца)



3) Понижающий преобразователь типа BUCK



4) Повышающий неинвертирующий преобразователь типа BOOST



Приложение В

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой

«Электроэнергетические системы атомных станций»

(Подпись)

(Ф.И.О.)

«__» _____ 201__ года.

З а д а н и е

для выполнения РГЗ (К/Р) по дисциплине «Силовая электроника» /

«Силовые полупроводниковые преобразователи электроэнергии»

Тема: Основы разработки и расчёт

типового полупроводникового преобразователя электроэнергии

Вариант №-

Постановка задачи и исходные данные для расчёта:

1. Тип силовая часть устройства – **X**
2. Тип схемного решения – **Y**
3. Номинальная выходная мощность - **Z**
4. Диапазон температур – **W**
5. Входное напряжение устройства – **V**
6. Выходное напряжение устройства – **M**
7. Частота переключения ключей для всех преобразователей - **$f = 25$ кГц.**

ПОРЯДОК РАБОТЫ:

1. Составить структурную (функциональную) схему устройства, отобразить входные и выходные напряжения.
2. Изобразить собранную электрическую принципиальную схему в соответствии со структурной (функциональной) схемой со всеми элементами силовых цепей (L, C).
3. Рассчитать напряжения на основных участках схемы (между структурными блоками).
4. Определить коэффициенты преобразования статических преобразователей, если таковые входят в состав схемы.
5. Рассчитать токи во всех звеньях постоянного тока схемы.
6. Вычислить токи во всех элементах схемы в соответствии с их режимами работы.
7. Выбрать полупроводниковые элементы (диоды и транзисторы). Указать номинальные напряжения конденсаторов, используемых в схеме.
8. Выполнить тепловой расчет элементов схемы и проверку на допустимость использования.

Дата выдачи задания “__” _____ 201__ г.

Срок сдачи задания “__” _____ 201__ г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Постановка задачи и исходные данные для выполнения контрольного задания.....	5
Варианты заданий для студентов очной формы обучения.....	7
Варианты заданий для студентов заочной формы обучения.....	8
Порядок выполнения контрольного задания	10
Пример расчёта с пояснениями.....	10
Перечень контрольных вопросов	20
Библиографический список.....	21
Приложение А Параметры некоторых современных транзисторов и диодов	22
Приложение Б Типовые схемные решения	25
Приложение В Образец задания для выполнения РГЗ (К/Р).....	27

Омельченко Наталья Викторовна

О С Н О В Ы СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Учебно-методическое пособие
для выполнения контрольных заданий*

В авторской редакции

Изд. № 190/18. Объем 1,75 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»