

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Судовое электрооборудование»

А. К. Пронина

СУДОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И СИЛОВАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Методические указания

к практическим работам

по дисциплине

для студентов специальности

26.05.07 – «Эксплуатация судового электрооборудования

и средств автоматики»

очной и заочной форм обучения

Часть 2

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 621.314:629.5(076.5)

ББК 31.264.5:39.46я73

П81

Р е ц е н з е н т :

С.А. Конева – доцент кафедры «Судовое электрооборудование»,
канд. техн. наук, доцент

Пронина А.К.

П81 Судовая электроника и силовая преобразовательная техника: методические указания к практическим работам по дисциплине для студентов специальности 26.05.07 – «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» очной и заочной форм обучения : [в 2 ч.]. Часть 2/ А.К. Пронина ; Севастопольский государственный университет, Морской институт, кафедра «Судовое электрооборудование». – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2021. – 27 с. – Текст : электронный.

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.07 – Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, выполняющих практические работы по дисциплине «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника».

УДК 621.314:629.5(076.5)

ББК 31.264.5:39.46я73

Рассмотрено и рекомендовано кафедрой «Судовое электрооборудование» Морского института ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» в качестве методических указаний по дисциплине «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника» для студентов специальности 26.05.07 — Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, протокол № 9 от 19 мая 2021 г.

© Пронина А.К., 2021
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Практическая работа № 1	5
Тема: Расчет маломощных однофазных выпрямителей	5
Практическая работа № 2	10
Тема: Расчет мощных трехфазных выпрямителей	10
Практическая работа № 3	17
Тема: Расчет трехфазного мостового инвертора	17
Практическая работа № 4	23
Тема: Расчет Г-образного LC-фильтра.....	23
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	27

ВВЕДЕНИЕ

Практические работы по курсу «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника» имеют целью закрепить теоретические знания по соответствующему курсу, развить у студентов навыки самостоятельных расчетов преобразовательных электронных устройств на полупроводниковых элементах, научить грамотно и целенаправленно проводить расчеты типовых схем преобразователей, при этом знать принцип действия, технические характеристики и эксплуатационные свойства элементной базы судовых преобразовательных устройств. А также использовать полученные расчетные данные для построения работоспособных электронных узлов и блоков систем силовой преобразовательной техники.

В результате освоения дисциплины СЭиСПТ обучающиеся по специальности «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» готовятся к решению инженерных задач и должны обладать профессиональными компетенциями (ПК), предусмотренными ФГОС ВО и конвенцией ПДНВ-95.

В процессе выполнения практических работ, являющихся важной составляющей для профессиональной подготовки судовых электромехаников в обеспечение раздела АП/6 Конвенции ПДНВ-95 (Функция – Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления), студент приобретает знания и умения, позволяющие овладеть элементами компетенций судовых электромехаников в сфере «Наблюдение за эксплуатацией электрических и электронных систем, а также систем управления», а именно: Знание основ электроники и силовой электроники (ПСК-4).

В рамках настоящего практического задания предусматривается формирование у студентов в соответствии с ФГОС следующих профессиональных компетенций: ПК-2 способностью и готовностью к самостоятельному обучению в новых условиях производственной деятельности с умением установления приоритетов для достижения цели в разумное время; ПК-9 способностью и готовностью осуществлять выбор электрооборудования и элементов систем автоматики для замены в процессе эксплуатации судового оборудования.

Практические работы выполняются самостоятельно и за отчетный период производится сдача работ. При выполнении практической работы студентам необходимо проработать теоретический материал, написать: тему работы; изобразить электронную схему устройства с описанием работы; произвести расчет, согласно полученного варианта, используя исходные данные; ответить письменно на контрольные вопросы.

К сдаче представляется отчет, содержащий стандартный титульный лист, номер и тема практической работы, вопросы задания, схема электронного устройства с описанием принципа его работы, исходные данные, согласно варианта (списочный номер по журналу); ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 1

Тема: Расчет маломощных однофазных выпрямителей

Задание:

1. Определить электрические нагрузки на вентили в схемах.
2. Охарактеризовать элементы и принцип работы однофазных выпрямителей на полупроводниковых диодах.
3. Произвести расчет и сделать выбор вентилей схем выпрямителей.
4. Определить основные параметры входного трансформатора.
5. Ответить в письменной форме на контрольные вопросы.

Общие сведения

В судовых электроустановках встречается ряд потребителей электрической энергии, которые требуют для своей работы постоянное напряжение (зарядка аккумуляторов, питание радиоэлектронной аппаратуры, систем автоматики, электропривод и т. д.). В настоящее время в большинстве случаев для получения постоянного напряжения применяют статические преобразователи переменного тока в постоянный ток (выпрямители), выполненные на основе полупроводниковых диодов или тириستоров.

Полупроводниковые выпрямители имеют малые весовые и габаритные показатели, отличаются высокой надежностью в работе, большим сроком службы, высоким значением КПД, простотой конструкции, постоянной готовностью к работе. Полупроводниковые диоды преобразуют переменное напряжение в пульсирующее выпрямленное напряжение, что обеспечивает одностороннее протекание тока в нагрузке. Они имеют вибро- и ударопрочные конструкции, работают при высокой влажности и любом положении.

Выпрямители классифицируются по различным признакам:

- 1) числу фаз вторичной обмотки трансформатора (одно- и трехфазные);
- 2) форме выпрямленного напряжения (одно- и двухполупериодные);
- 3) схеме соединения вентилей (с последовательным включением вентилей и вторичной обмотки и мостовые);
- 4) мощности (маломощные – 100 Вт, средней мощности – 5 кВт и мощные – свыше 5 кВт);
- 5) напряжению;
- 6) частоте выпрямленного тока (промышленной частоты – 50 Гц, повышенной частоты – от 400 до 1000 Гц и высокой частоты – свыше 1000 Гц).

Задача расчета: определить электрические нагрузки на вентили в схемах рис. 1.1, а,б,в) и сделать выбор вентилей, определить основные параметры трансформатора. Основными исходными данными для расчета выпрямителей являются параметры нагрузки, для питания которой предназначен выпрямитель. Эти параметры задаются двумя величинами из следующих четырех: U_d –

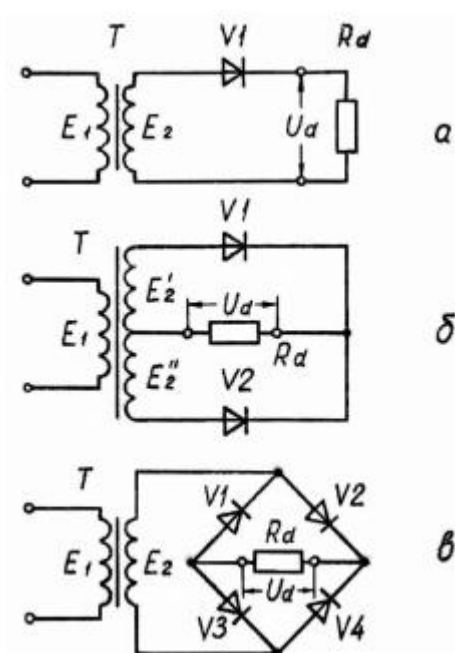


Рис.1.1 - Схемы выпрямителей:
однофазная однополупериодная схема (а),
нулевая двухполупериодная (б);
мостовая (в)

среднее значение напряжения на нагрузке; I_d – среднее значение тока нагрузки; P_d – средняя мощность нагрузки; R_d – сопротивление нагрузки.

Дополнительными данными для расчета являются напряжение питающей сети U_c , температура окружающей среды $t_{окр}$, частота питающей сети f_c и др.

Пример расчета: исходные данные:

$$U_d = 150 \text{ В},$$

$$R_d = 350 \text{ Ом},$$

$$U_c = 220 \text{ В}.$$

1. Определяем параметры нагрузки:

а) ток нагрузки

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{150}{350} = 0.43 \text{ А};$$

б) мощность нагрузки

$$P_d = U_d I_d = 150 \cdot 0.43 = 64.5 \text{ Вт}.$$

2. Определяем основные параметры вентилей:

а) средний прямой ток, протекающий через вентили:

– для однополупериодной схемы

$$I_a = I_d = 0.43 \text{ А};$$

– для двухполупериодной схемы со средней точкой и для мостовой схемы

$$I_a = \frac{I_d}{2};$$

б) амплитуда обратного напряжения (предварительно):

– для однополупериодной схемы и двухполупериодной схемы со средней точкой

$$U_{обр.т} = \pi U_d = 3.14 \cdot 150 = 471 \text{ В};$$

– для мостовой схемы

$$U_{обр.т} = \frac{\pi}{2} U_d.$$

3. По найденным величинам I_a и $U_{обр.т}$ производим выбор вентиля.

Для установки в схему выбираем кремниевый вентиль типа КД202С со следующими основными параметрами.

Максимально допустимый анодный ток (среднее значение)

$$I_{a \text{ макс доп}} = 3.5 \text{ А (с радиатором)};$$

$$I_{a \text{ макс доп}} = 1.5 \text{ А (без радиатора)}.$$

Максимально допустимое обратное напряжение (амплитудное значение)

$$U_{обр\ макс\ доп} = 600\ В.$$

Прямое падение напряжения при номинальном анодном токе

$$U_0 = 0.9\ В.$$

Определяем основные параметры трансформатора:

а) суммарное активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке

$$R_{mp} = R_d \nu = 350 \cdot 0.049 = 17.2\ Ом,$$

где ν – коэффициент, определяемый по графику как функция активной мощности трансформатора (рис. 1.2);

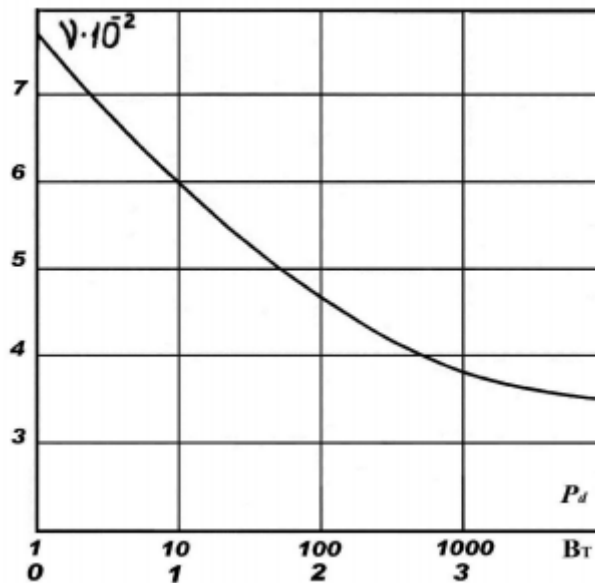


Рис. 1.2 – Зависимость коэффициента ν от мощности трансформатора

б) приближенное значение сопротивления вентиля в прямом включении

$$R_d = \frac{U_0}{I_{a.макс.доп}} = \frac{0.9}{3.5} = 0.26\ Ом;$$

в) действующее значение ЭДС вторичной обмотки с учетом падения напряжения на диоде и активном сопротивлении обмоток трансформатора:

– для однополупериодной схемы

$$E_2 = 2.22 U_d + I_d (R_{mp} + R_d) = 2.22 \cdot 150 + 0.43(17.2 + 0.26) = 341\ В;$$

– для двухполупериодной схемы со средней точкой

$$E_2 = 1.11 U_d + I_d (R_{mp} + R_d);$$

– для мостовой схемы

$$E_2 = 1.11 U_d + I_d (R_{mp} + 2R_d);$$

г) коэффициент трансформации

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{220}{341} = 0.645;$$

д) действующее значение тока вторичной обмотки:

– для однополупериодной схемы

$$I_2 = \frac{\pi}{2} I_d = 1.57 \cdot 0.43 = 0.675 \text{ A};$$

– для двухполупериодной схемы со средней точкой

$$I_2 = \frac{\pi}{4} I_d;$$

– для мостовой схемы

$$I_2 = 1.11 I_d;$$

е) действующее значение тока первичной обмотки:

– для однополупериодной схемы

$$I_1 = 1.21 \frac{I_d}{n} = 1.21 \frac{0.43}{0.645} = 0.81 \text{ A}.$$

– для схемы со средней точкой и мостовой схемы

$$I_1 = 1.11 \frac{I_d}{n};$$

ж) типовая мощность трансформатора (без учета подмагничивания сердечника):

– для однополупериодной схемы

$$P_{mp} = \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{2} = \frac{220 \cdot 0.81 + 341 \cdot 0.675}{2} = 204 \text{ Вт}.$$

– для схемы со средней точкой

$$P_{mp} = \frac{E_1 I_1 + 2 E_2 I_2}{2};$$

– для мостовой схемы

$$P_{mp} = \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{2};$$

з) типовая мощность трансформатора с учетом подмагничивания сердечника постоянной составляющей тока вторичной обмотки (только для однополупериодной схемы)

$$P'_{mp} \approx 1.1 P_{mp} = 1.1 \cdot 204 = 224 \text{ Вт}.$$

5. Уточняем величину обратного напряжения на вентиле

– для однополупериодной схемы

$$U_{обр\ m} = \sqrt{2} E_2 = 1.41 \cdot 341 = 482 \text{ В},$$

что вполне допустимо для выбранного вентиля;

– для схемы со средней точкой

$$U_{обр\ m} = 2 \sqrt{2} E_2;$$

– для мостовой схемы

$$U_{обр\ m} = \sqrt{2} E_2.$$

Задание для самостоятельной работы

Рассчитать выпрямитель, работающий на активную нагрузку. Параметры нагрузки указаны в табл. 1.1

Таблица 1.1 - Параметры нагрузки R_d U_d и номера вариантов

Сопротивление нагрузки R_d , Ом	Напряжение на нагрузке U_d , В				
	50	75	100	125	150
100	1	2	3	4	5
150	6	7	8	9	10
200	11	12	13	14	15
250	16	17	18	19	20
300	21	22	23	24	25
350	26	27			

Напряжение сети принять равным 220 В.

Контрольные вопросы

1. Однофазная однополупериодная схема выпрямления. Принцип работы. Временные диаграммы.
2. Однофазная двухполупериодная схема выпрямления с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора. Принцип работы. Временные диаграммы
3. Мостовая схема выпрямления. Принцип работы. Временные диаграммы.

Практическая работа № 2

Тема: Расчет мощных трехфазных выпрямителей

Задание:

1. Определить параметры вентиля трехфазного мостового выпрямителя.
2. Охарактеризовать элементы и принцип работу трехфазных выпрямителей на полупроводниковых диодах
3. С учетом исходных данных: характера нагрузки (активно-индуктивная), температуры окружающей среды, тока и напряжения нагрузки определить: основные параметры нагрузки, падения напряжения входного трансформатора, потери в вентилях, суммарные потери в выпрямителе.
4. Ответить в письменной форме на контрольные вопросы

Общие сведения

Схемы выпрямителей трехфазного тока применяются для питания потребителей средней и большой мощности. Они подключаются к источникам питания через трехфазные трансформаторы и имеют меньший коэффициент пульсаций, что значительно снижает габаритные размеры сглаживающих фильтров. Кроме того, их применение обеспечивает равномерную загрузку сети трехфазного тока и более высокий коэффициент использования трансформатора.

В качестве потребителей электроэнергии трехфазных выпрямителей может использоваться статическая нагрузка активного или активно-индуктивного характера, а также динамическая нагрузка в виде электродвигателей постоянного тока.

В зависимости от числа и способа включения вентилях (мощные выпрямительные диоды и тиристоры называют вентилями) различают две основные схемы выпрямления: с нулевым выводом и мостовая схема.

Трехфазная мостовая схема выпрямления (схема Ларионова).

Мостовая схема (рис. 2.1, а) является наиболее распространенной в области больших и средних мощностей. Схема состоит из двух комплектов вентилях. Три вентиля соединены катодами и образуют анодную группу, а вентили, соединенные анодами – катодную группу. Каждый комплект по отношению к трансформатору представляет собой рассмотренный ранее выпрямитель с нулевым выводом. В любой момент времени в анодной группе будет открыт только один диод, потенциал анода которого является максимальным. Также в любой момент времени в катодной группе открыт один диод, на катоде которого потенциал имеет максимальное отрицательное значение. Временные диаграммы работы схемы приведены на рис. 2.1, б. Для разгрузки рисунка показана только положительная часть графиков линейных ЭД.

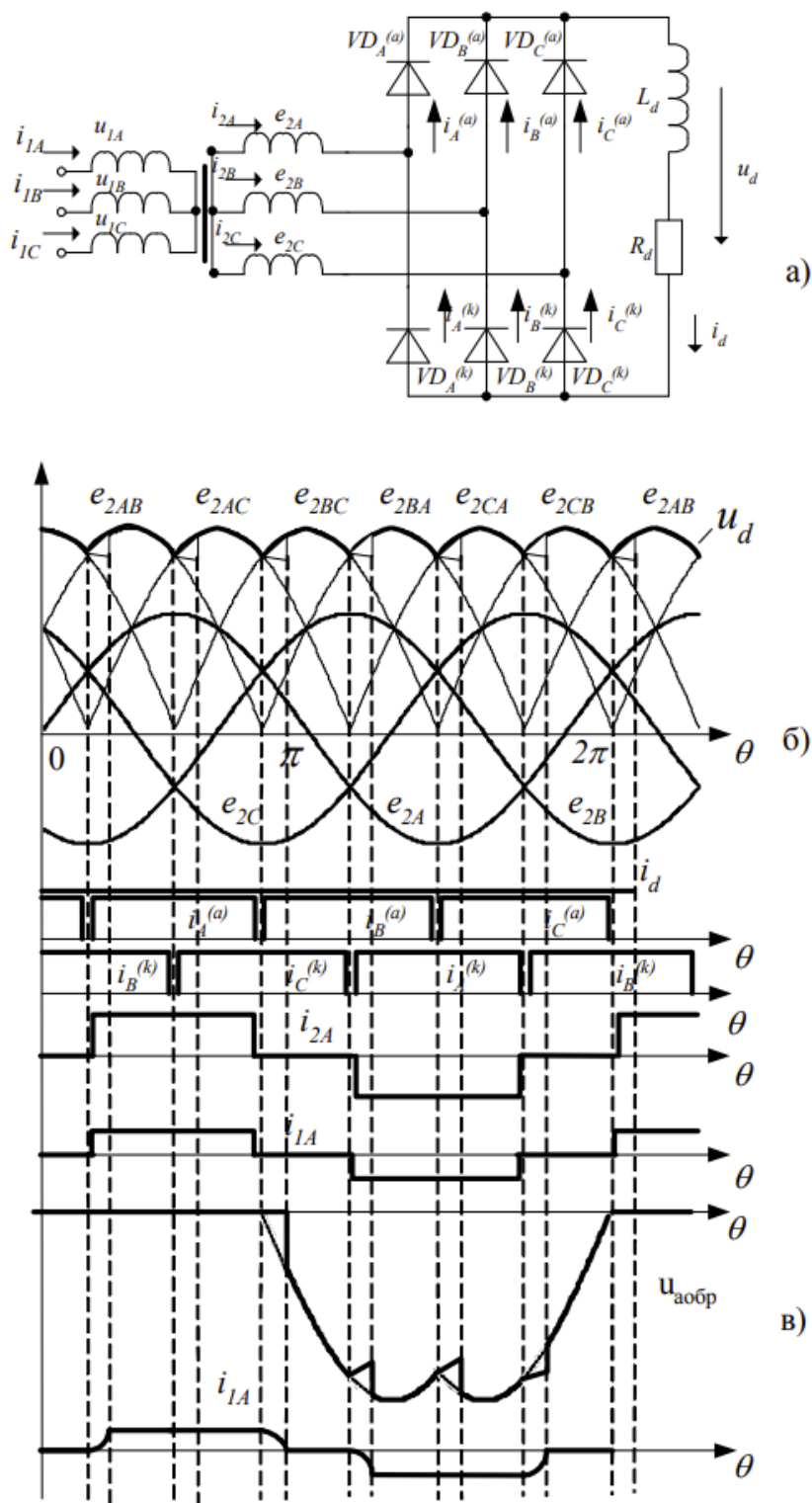


Рис. 2.1 – Схема (а) и временные диаграммы работы трехфазной мостовой схемы выпрямления без учета явления коммутации (б) и его учетом (в)

Рассмотрим интервал фаз $[0; \pi/6]$. Ток в этот момент времени будет протекать через открытый диод $VD(a)$ А (фаза А, анодная группа), через нагрузку, открытый диод $VD(k)$ В и замыкаться через обмотки фаз А и В. При этом ток в фазе С равен нулю: $i_c=0$. Таким образом, интервал проводимости каждого вентиля составляет $2/3 \pi$, а интервал совместной работы двух вентиляей

равен $\pi/3$. За один период напряжения питания происходит шесть переключений клапанов. Схема работает в шесть тактов, в связи с чем ее называют шестипульсной. Так как графики катодной и анодной групп симметричны, то нагрузка будет подключена к линейному напряжению U_{AB} вторичной обмотки трансформатора и результирующее напряжение будет в 2 раза больше напряжения каждой группы. Среднее значение выходного напряжения выпрямителя находят по среднему значению напряжения за период повторяемости $\pi/3$:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3}\sqrt{2}E_2 \cos \theta d\theta = 2,34E_{2\phi}.$$

Период пульсаций выпрямленного напряжения в шесть раз меньше периода напряжения сети, и коэффициент пульсаций равен $q=0,06$. Ток нагрузки из-за наличия индуктивности хорошо сглажен и представлен прямой линией со значением $I_d = \frac{U_d}{R_d}$. Длительность протекания тока через открытый клапан составляет $2\pi/3$, поэтому среднее значение тока через клапан можно найти так же, как и в нулевой схеме

$$I_a = \frac{I_d}{3}.$$

При открытом состоянии двух клапанов другие четыре клапана закрыты приложенным к ним обратным напряжением. Амплитуда обратного напряжения на диоде равна амплитуде линейного напряжения

$$U_{обр\max} = E_{2\text{лн}} = \sqrt{3}\sqrt{2}E_{2\phi} = 1,05U_d.$$

Кривая тока вторичной обмотки трансформатора определяется токами двух клапанов, подключенных к данной фазе. Он является переменным, имеет форму прямоугольных импульсов с амплитудой I_d и паузой между импульсами длительностью $\pi/3$. Постоянная составляющая во вторичном токе отсутствует, поэтому ток i_1 в первичной обмотке представляет собой чередующиеся разнополярные импульсы, разделенные бестоковыми паузами. Такая форма сигнала ближе к синусоидальной, но амплитуды высших гармоник достаточно велики

Для расчета сечений проводов обмоток определим действующие значения токов

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} I_d^2 d\theta} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d, \quad I_1 = \frac{1}{k_T} \sqrt{\frac{2}{3}} I_d.$$

Отсутствие подмагничивания сердечника и более полное использование трансформатора позволяет уменьшить его габаритную мощность до значения, определяемого выражением

$$S_T = S_1 = S_2 = 3\sqrt{\frac{2}{3}} I_d \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_d = 1,045 P_d.$$

Задача расчета: определить параметры вентиля трехфазного мостового выпрямителя (рис. 2.2), сделать выбор вентиля и определить условия их охлаждения.

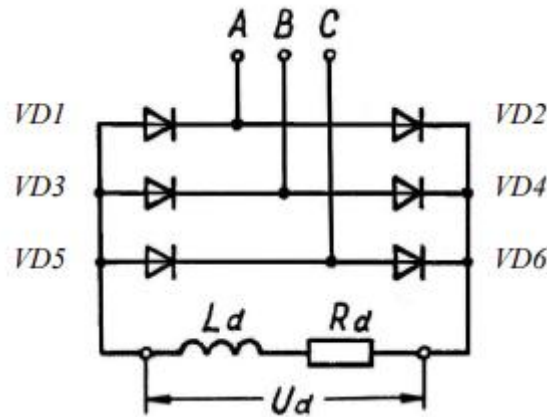


Рис. 2.2 – Схема трехфазного мостового выпрямителя

Исходными данными для расчета мощных выпрямителей являются параметры нагрузки – ток и напряжение (сопротивление, мощность). Важным параметром является температура окружающего воздуха, используемого для охлаждения вентиля, $t_{\text{охл}}^0$.

Кроме этого, во внимание принимается характер нагрузки – активная либо индуктивная, т.к. это влияет на форму кривой тока в вентиле и, следовательно, на величину допустимых токовых нагрузок. **Пример расчета:** в качестве исходных данных для примера расчета принимаем следующие:

$$\begin{aligned} U_d &= 50 \text{ В}; \\ I_d &= 80 \text{ А}; \\ t_{\text{охл}}^0 &= 60^0 \text{ С}. \end{aligned}$$

Нагрузка активно-индуктивная.

1. Определяем параметры нагрузки:

а) сопротивление нагрузки

$$R_d = \frac{U_d}{I_d} = \frac{50}{80} = 0.625 \text{ Ом};$$

б) мощность нагрузки

$$P_d = U_d I_d = 50 \cdot 80 = 4 \text{ кВт}.$$

2. Определяем активное сопротивление трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке

$$R_{mp} = R_d v = 0.625 \cdot 0.037 = 0.023 \text{ Ом},$$

где $v = 0.037$, определяется по графику (рис. 4).

3. Определяем падение напряжения в обмотках трансформатора

$$\Delta U_{\kappa} = \frac{A_0 e_{\kappa 3} \%}{100} U_d = \frac{0.5 \cdot 5.5}{100} 50 = 1.35 \text{ В},$$

где A_0 – коэффициент наклона внешней характеристики, для трехфазной мостовой схемы $A_0 = 0.5$; $e_{кз}$ % - напряжение короткого замыкания трансформатора, определяется по графику (рис. 2.3).

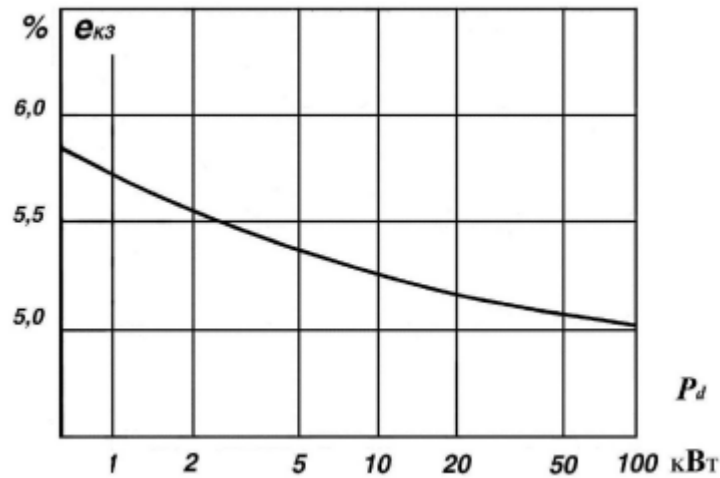


Рис. 2.3 – Зависимость максимально допустимого среднего тока от температуры окружающей среды

5. Принимая предварительно величину падения напряжения в вентиле $U_0 = 1$ В, определяем потери напряжения в вентилях

$$\Delta U_{\theta} = 2U_0 = 2 \text{ В}$$

6. Определяем суммарные потери напряжения в выпрямителе

$$\Delta U_{\Sigma} = \Delta U_{\text{тр}} + \Delta U_{\kappa} + \Delta U_{\theta} = 1.84 + 1.35 + 2.0 = 5.2 \text{ В.}$$

7. Определяем выходное напряжение холостого хода выпрямителя

$$U_{dxx} = U_d + \Delta U_{\Sigma} = 50 + 5.2 = 55.2 \text{ В.}$$

8. Определяем ЭДС вторичной обмотки трансформатора

$$E_{2\phi} = \frac{U_{dxx}}{2.34} = \frac{55.2}{2.34} = 23.5 \text{ В.}$$

9. Определяем параметры вентиля выпрямителя:

а) ток вентиля

$$I_a = \frac{1}{3} I_d = \frac{1}{3} 80 = 27.7 \text{ А;}$$

б) напряжение на вентиле

$$U_{обр\ m} = E_{2\ m} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} E_{2\phi} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 23.5 = 57.8 \text{ В.}$$

10. Производим выбор вентиля. Выбираем вентили кремниевые серии В. Предельно допустимые значения прямого тока диодов этой серии и условия охлаждения приведены в табл. 2. По найденному значению анодного тока с помощью этой таблицы определяем, что для установки в схему следует выбрать вентиль типа В 50 с принудительным воздушным охлаждением и скоростью обдува 6 м/с.

Таблица 2.1– Предельно допустимые значения прямого тока диодов серии В

Скорость обдува воздухом при $t_{\text{охл}}^0 = 40^\circ\text{C}$ $V_{\text{охл}}$, м/сек	Предельные точки с типовым охладителем $I_{\text{но}}, \text{A}$				
	В 10	В 25	В 50	В 200	В 320
0	10	-	-	-	-
3	-	35	-	-	-
6	-	-	50	-	-
12	-	-	-	180	320

Выполненный выбор вентиля носит предварительный характер, поскольку табл. 2.1 составлена для случая, когда вентиль работает в схеме однопериодного выпрямления напряжения синусоидальной формы с чисто активной нагрузкой (проводимости $\lambda = 180^\circ$). Кроме того, температура охлаждающего воздуха здесь принята равной 40° . Поэтому выбор вентиля нуждается в уточнении.

11. Уточняем выбор вентиля, пользуясь рис. 2.4, показывающим зависимость максимально допустимого среднего тока от температуры окружающей среды при прямоугольной форме тока и угле проводимости $\lambda = 120^\circ$ для различных вентилях серии В.

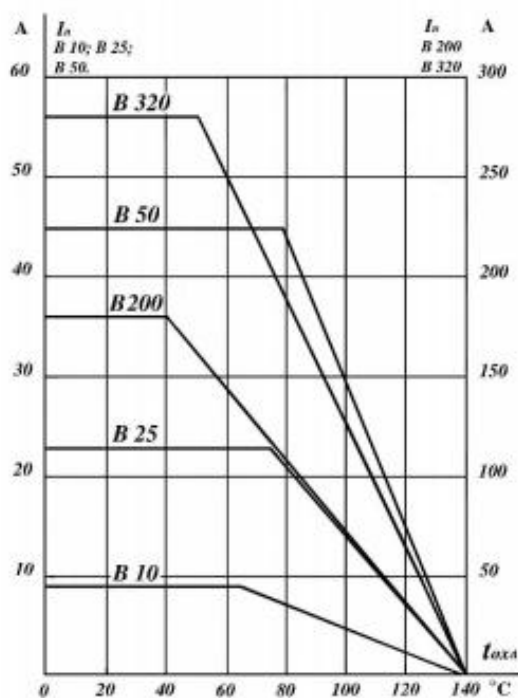


Рис. 2.4 – Зависимость максимально допустимого среднего тока от температуры окружающей среды

Определяем, что при температуре охлаждающегося воздуха, равной 60° , выбранный вентиль допускает протекание прямого тока I_n , равного 45А. Таким образом, выбранный вентиль удовлетворяет предъявленным требованиям по величине анодного тока, поскольку

$$I_n > I_a.$$

12. Определяем класс вентиля. В соответствии с найденной величиной обратного напряжения

$$U_{обр\ m} = 57.8\text{ В}$$

Выбираем вентили класса 1 с величиной допустимого обратного напряжения

$$U_{обр\ m\ макс\ доп} = 100\text{ В}.$$

Задание для самостоятельной работы

Произвести расчет мощного выпрямителя, выполненного по мостовой схеме с трехфазным питанием. Параметры нагрузки указаны в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры нагрузки для расчета выпрямителя

Ток нагрузки I_d , А	Напряжение нагрузки U_d , В					
	50	100	150	200	250	300
50	1	2	3	4	5	6
100	7	8	9	10	11	12
150	13	14	15	16	17	18
200	19	20	21	22	23	24
250	25	26	27			

Температуру охлаждающего воздуха принять согласно табл. 2.3.

Таблица 2.3

Последняя цифра шифра	Температура $t_{охл}$, °С
четная	50
нечетная	80

Частота питающей сети 50 Гц.

Практическая работа № 3

Тема: Расчет трехфазного мостового инвертора

Задание:

1. Изобразить схему и описание параллельного автономного инвертора тока.
2. С учетом исходных данных определить: значения входных токов и напряжения, мощность на выходе инвертора, параметры тиристоров и конденсаторов трехфазного мостового инвертора.
3. Ответить в письменной форме на контрольные вопросы.

Общие сведения

Однофазный параллельный автономный инвертор тока.

На рис. 3.1, а приведена схема однофазного параллельного АИТ на обычных тиристорах с неполной управляемостью, а на рис.3.1, б – временные диаграммы токов и напряжений в схеме. Запирание происходит с помощью энергии, запасенной в конденсаторе C_k .

Рассмотрим работу схемы. В момент t_1 после подачи управляющего импульса начинают проводить тиристоры V1, V2. Ток идет по пути «+», L_d , V1, $R_n \parallel C_k$, V2, «-». Под действием проходящего тока напряжение u_c на коммутирующем конденсаторе получает полярность, показанную на рис.3.1, а знаками «+», «-» без скобок.

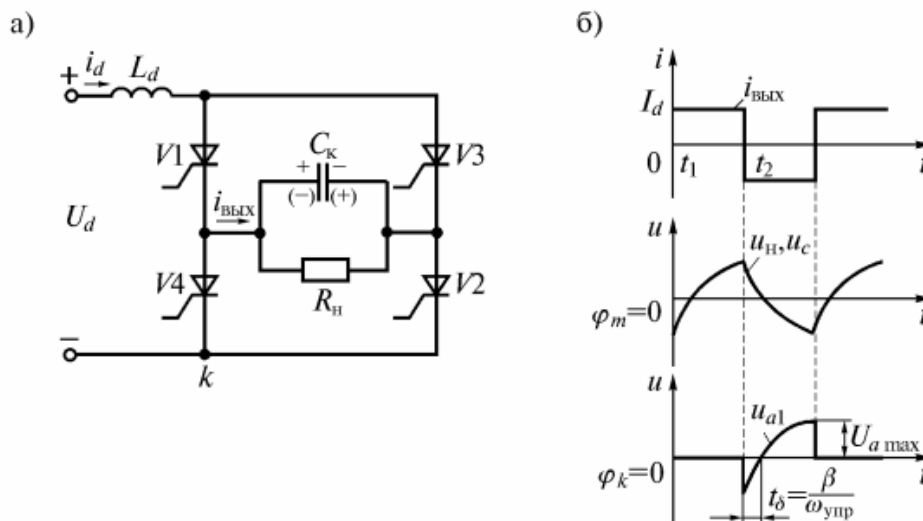


Рис. 3.1 – Параллельный АИТ (а), диаграммы токов и напряжений (б)

В момент t_2 включаются тиристоры V3, V4, и конденсатор C_k подключается к цепочкам V2, V4 и V3, V1 так, что его разрядный ток короткого замыкания направлен навстречу току в ранее проводивших тиристорах V1, V2. Они выключаются. Коммутация происходит практически мгновенно, так как мала индуктивность в контуре коммутации. Поэтому за время коммутации

напряжение на конденсаторе практически не успевает измениться. Ток через нагрузку меняет направление и конденсатор перезаряжается (знаки в скобках). Таким образом, коммутирующий конденсатор служит для выключения предыдущего вентиля при включении последующего. На диаграмме (см. рис. 3.1, б) показано, что в момент выключения $V1$ к нему прикладывается отрицательное напряжение, которое при перезарядке конденсатора меняет знак. Во избежание опрокидывания инвертора за время t_d должна восстановиться запирающая способность тиристоров в прямом направлении. Это время ограничивает частотные возможности тиристоров. АИТ могут работать до частот 2 - 2,5 кГц. При больших частотах тиристор не успевает восстановить запирающие свойства.

Рассмотрим качественно область возможной работы АИТ. АИТ «боится» коротких замыканий (КЗ), т.к. при этом коммутирующий конденсатор закорочен и нечем коммутировать. При уменьшении сопротивления нагрузки (приближении к КЗ) уменьшается время t_d . При достижении времени $t_{d_{\min}}$, равного времени восстановления запирающей способности тиристоров в прямом направлении, коммутация становится невозможной. Для оценки возможности работы на холостом ходу (ХХ) предположим, что АИТ идеален и $R_n = \infty$. При этом ничего не мешает коммутации, энергия непрерывно потребляется от источника, но нигде не рассеивается, следовательно, запасается в реактивных элементах. Поэтому напряжение на конденсаторе стремится к бесконечности. Таким образом, на холостом ходу АИТ работать не может.

Трехфазный параллельный инвертор тока.

На рис. 3.2 приведена схема трехфазного мостового параллельного инвертора тока с отсекающими диодами.

Порядок работы тиристоров в инверторе ($V1-V4$, $V1-V6$, $V3-V6$, $V3-V2$, $V5-V2$, $V5-V4$, $V1-VS4$, $V1-V6$,...): каждый тиристор (например, $V1$) работает $1/6$ часть периода в паре с одним тиристором ($V4$), а $1/6$ часть периода в паре с другим тиристором ($V6$) другой группы (анодной или катодной). Одновременно, за исключением времени коммутации, в инверторе открыты два тиристора - по одному в каждой группе, и угол проводимости (открытого состояния тиристора) λ составляет 120° . Коммутация в инверторе осуществляется с помощью коммутирующих конденсаторов $C1-C3-C5$ и $C2-C4-C6$, соединенных в треугольник (или в звезду). Конденсаторы должны обеспечивать запираение выходящих из работы тиристоров, создание необходимого угла опережения β и обеспечить компенсацию реактивной мощности.

В инверторе осуществляется междофазовая коммутация: запираение тиристора происходит при открытии тиристора другой фазы в своей группе. Например, для запираения тиристора $V1$ отпирается тиристор $V3$ (работали $VS1-V6$, вступают в работу $V3-V6$). Перед работой пары $V1-V6$ в работе находилась пара $V1-V4$, при которой произошел заряд коммутирующего конденсатора $C1$ с полярностью, указанной на рисунке. После перехода с $V1-V4$ на $V1-V6$ заряд $C1$ сохраняется, хотя некоторый разряд его через фазы нагрузки A и B имеет место. После отпираания $V3$ положительное (+) напря-

жение $C1$ прикладывается к катоду $V1$ и тиристор $V1$ закрывается. Ток разряда конденсатора, налагаясь на ток тиристора $V1$, уменьшает его до нуля, тем самым переводит как бы ток нагрузки с плеча $V1$ на плечо $V3$.

Во время перезаряда конденсатора $C1$ по цепи $(+U_d)-V3-C1-VD1$ -фаза А – фаза С- $VD6-V6-(-U_d)$, пока U_{C1} не уменьшится до нуля, поддерживается встречное напряжение на тиристоре $V1$, чем обеспечивается восстановление его запирающих свойств. Полный перезаряд $C1$ с полярностью, обратной указанной на рисунке, будет закончен после переключения тока с $V6$ на $V2$ при работе очередной пары $V3-V2$, это напряжение будет использовано для коммутации тока с $V2$ на $V4$.

Аналогично в цепи $V1-V6$ происходит работа тириستоров пары $V3-V2$, при перезаряде конденсатора $C3$ по цепи $(+U_d)-V5-C3-VD3-B-A-VD2-V2-(-U_d)$, пока U_{C3} не уменьшится до нуля, поддерживается встречное напряжение на тиристоре $V3$. Полный перезаряд $C3$ будет закончен после переключения тока с $V2$ на $V4$ при работе очередной пары $V5-V4$. И далее аналогично.

Для предотвращения разряда коммутирующих конденсаторов через нагрузку в инвертор вводят отсекающие диоды $VD1-VD6$. В трехфазном инверторе тока при перегрузках возможен срыв инвертирования из-за нарушения коммутации.

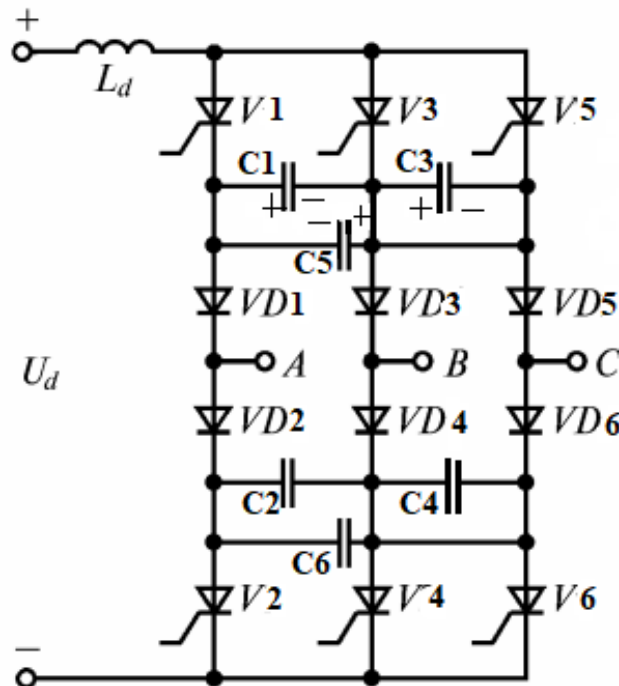


Рис. 3.2 – Трехфазный параллельный инвертор тока с отсекающими диодами

Задача расчета: рассчитать трехфазный инвертор тока. Определить входные параметры, выходную мощность инвертора. Рассчитать параметры и выбрать тиристоры в схему (рис. 3.2).

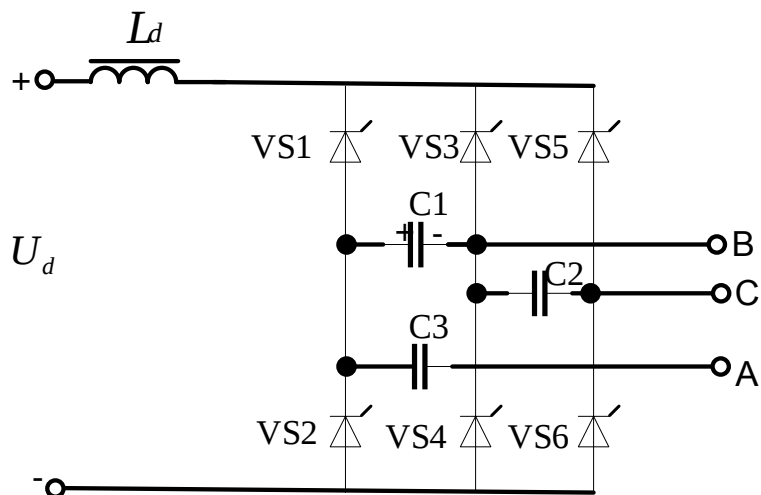


Рис. 3.2 – Схема трехфазного мостового параллельного инвертора тока

Исходные данные:

линейное напряжение на нагрузке $U_{нл}$ (В),

ток фазы нагрузки $I_{фн}$ (А);

диапазон изменения нагрузки $I_{н(min)} \dots I_{н(max)}$ (А);

выходная частота f (Гц);

коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi$

Пример расчета:

Автономный трехфазный инвертор тока (рис. 3.2)

Линейное напряжение на нагрузке $U_{нл} = 380\text{В}$,

ток фазы нагрузки $I_{фн} = 10\text{А}$;

диапазон изменения нагрузки $5 \dots 15\text{А}$;

выходная частота $f = 50\text{Гц}$;

коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,5$.

Выбираем трехфазную мостовую схему инвертора тока для которой коэффициент схемы:

$$k_{сх} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}.$$

Максимальная активная мощность на выходе инвертора

$$P_{нmax} = \frac{3U_{нф} \cdot I_{фнmax} \cdot \cos \varphi}{\eta_{и}} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 15 \cdot 0,5}{1} = 4950 \text{ Вт},$$

где $U_{нф} = U_{нл} / \sqrt{3} = 220 \text{ В}$; $\eta_{и}$ – КПД инверторного трансформатора

(обычно его значение в пределах $0,8 \dots 0,9$), так как принимается бес-трансформаторная схема, то $\eta_{и} = 1$.

Пренебрегая потерями в инверторе, запишем:

$$P_d = P_{нmax} = 4950 \text{ Вт}.$$

Минимальный угол запираания при $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с}$.

$$\beta_{min} = 360^\circ \frac{t_{выкл}}{T} = 360^\circ \frac{30 \cdot 10^{-6}}{0,02} = 0,54^\circ.$$

где $t_{выкл}$ - должно быть не менее времени восстановления для тиристорov. Обычно $t_{выкл} = (1,5 \dots 2)t_{восс}$. Принимаем $t_{выкл} = 30 \text{ мкс}$ при $\beta = 2^\circ$.

Напряжение на входе инвертора

$$U_d = \frac{U_{нф} \cdot k_{сх} \cdot \cos \beta_{min}}{n} = \frac{220 \cdot 3\sqrt{6} \cdot 0,999}{1 \cdot \pi} = 514,3 \text{ В}.$$

где $n = 1$ - коэффициент трансформации инверторного трансформатора при использовании безтрансформаторной схемы.

Входной ток инвертора

$$I_d = \frac{P_d}{U_d} = \frac{4950}{514} = 9,6 \text{ А},$$

Средний ток тиристора

$$I_a = k_{зт} \frac{I_d}{3} = 2 \frac{9,6}{3} = 6,4 \text{ А}.$$

где $k_{зт} = (1,8 \dots 2)$ – коэффициента запаса по току

Максимальное прямое напряжение на тиристорах и коммутирующих конденсаторах

$$U_{пр.max} = U_{с.max} = U_{л.max} = k_{зн} \sqrt{2} \cdot 380 = 537 \text{ В},$$

где $k_{зн} = (1,3 \dots 1,5)$ – коэффициента запаса по напряжению

Выбираем тиристор из справочника: ТЧ-16-9 тиристор частотный, максимальный средний ток 16А, 9 класс, повторное импульсное напряжение в обратном направлении 900 В.

Мощность конденсаторной батареи

$$Q_c = P_{нmax} (tg\varphi + tg\beta) = 4950(1,732 + 0,035) = 8746 \text{ Вар}.$$

Емкость коммутирующего конденсатора

$$C = \frac{Q_c}{3(U_{нл})^2 \omega} = \frac{8746}{3(380)^2 2\pi \cdot 50} = 64,3 \text{ мкФ}.$$

Выбираем конденсатор типа МБГВ металлобумажный герметизированный, однослойный высокоемкостной, напряжением 500,1000В емкостью 60-200мкФ.

Индуктивность входного дросселя

$$L_d = \frac{1}{144f} \cdot \left(\frac{U_d}{\cos \beta_{min}} \right)^2 \cdot \frac{\sin 2\beta}{P_{нmin}} = \frac{1}{144 \cdot 50} \left(\frac{514}{1} \right)^2 \cdot \frac{0,069}{1650} = 0,02 \text{ Гн},$$

где $P_{нmin}$ - минимальная активная мощность на выходе инвертора.

$$P_{\text{нmin}} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 5 \cdot 0,5}{1} = 1650 \text{ Вт.}$$

Задание на самостоятельную работу

Произвести расчет автономного инвертора тока, выполненного по мостовой схеме с трехфазной нагрузкой (рис. 3.2). Параметры нагрузки указаны в табл. 3.1

Для всех вариантов принимаем:

- Линейное напряжение на нагрузке $U_{\text{нл}} = 380 \text{ В}$;
- диапазон изменения нагрузки $5 \dots 30 \text{ А}$.

Таблица 3.1 – Параметры нагрузки для расчета схемы инвертора тока

Выходная частота $f = 50 \text{ Гц}$	Выходная частота $f = 100 \text{ Гц}$	Ток фазы нагрузки $I_{\text{фн}}$	Коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi$
1	2	5	0,5
3	4	10	0,55
5	6	15	0,6
7	8	20	0,65
9	10	25	0,7
11	12	30	0,6
13	14	20	0,5
15	16	10	0,7
17	18	15	0,6
19	20	5	0,55

Контрольные вопросы

1. Охарактеризовать элементы и принцип работы инверторов тока и напряжения на полупроводниковых приборах.
2. Особенности диаграмм изменения тока и напряжения в инверторах.
3. Назначение индуктивности и конденсаторов в схемах.
4. Схема и принцип работы параллельного АИТ

Практическая работа № 4

Тема: Расчет Г-образного LC-фильтра

Задание:

1. Охарактеризовать элементы и принцип работы силовых фильтров.
2. Изобразить схему Г-образного фильтра, основные характеристики и описание LC-фильтра.
3. С учетом исходных данных определить: коэффициент пульсации фильтра, параметры (емкости конденсатора и индуктивности катушки) LC-фильтра.
4. Ответить в письменной форме на контрольные вопросы.

Общие сведения

Сглаживающие фильтры включаются между выпрямителем (со стабилизатором) и нагрузкой для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения. Наиболее часто применяются фильтры, состоящие из дросселя и конденсатора или из резистора и конденсатора. Для характеристики фильтра используют коэффициент сглаживания, равный отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе фильтра:

$$S = \frac{q_1}{q_2},$$

где q_1 и q_2 – коэффициенты пульсаций выпрямленного напряжения на входе и выходе фильтра. Эффективность сглаживания пульсаций зависит от соотношения параметров элементов фильтров и нагрузки. Емкостный фильтр подключается параллельно нагрузке, поэтому для эффективного сглаживания пульсаций необходимо, чтобы реактивная проводимость конденсатора на частоте основной гармоники пульсации была намного больше проводимости нагрузки, т.е.

$$1/X_c \gg 1/R_d, \quad \omega C \gg 1/R_d \quad \text{или} \quad 1/\omega C \gg R_d.$$

Индуктивный фильтр включается последовательно с нагрузкой, поэтому для эффективного сглаживания пульсаций необходимо, чтобы реактивное сопротивление дросселя было намного больше сопротивления нагрузки

$$X_d \gg R_d \quad \text{или} \quad \omega L_d \gg R_d.$$

Для переменной составляющей пульсации выпрямленного напряжения индуктивность дросселя представляет собой реактивное сопротивление, поэтому напряжение пульсации на нагрузке будет ослаблено по сравнению с напряжением пульсации на входе фильтра. Величина ослабления зависит от соотношения сопротивлений дросселя и нагрузки. Г-образные LC-фильтры (рис. 4.1, а) применяются при повышенных токах нагрузки. КПД таких фильтров достаточно высок.

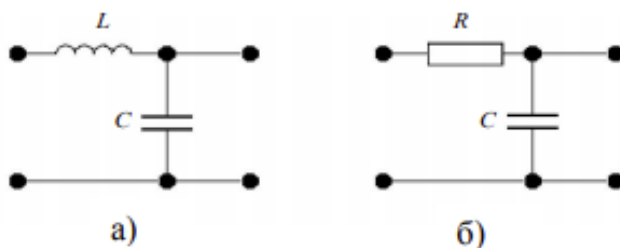


Рис.4.1 – Фильтры на пассивных элементах: а) LC-фильтр; б) RC-фильтр

Для LC-фильтров следует выбирать $S \geq 3$, чтобы избежать резонансных явлений. Произведение LC можно определить по формуле

$$LC = \frac{S+1}{\omega_1^2}.$$

Г-образные RC-фильтры (рис. 4.1, б) применяют при малых токах нагрузки (менее 10...15 мА) небольших S. Произведение RC можно определить по формуле

$$RC = \frac{S}{(0,5 - 0,9)\omega_1}.$$

Задача расчета: рассчитать Г-образный LC-фильтр.

Исходные данные:

- коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя $K'_{п(1)}(\%)$,
- частота тока питающей сети f_c (Гц),
- напряжение на выходе фильтра U_d (В),
- ток нагрузки I_d (А),
- коэффициента пульсаций на нагрузке $K_{п(1)}(\%)$,
- выпрямитель собран по трехфазной схеме $m_{п}$

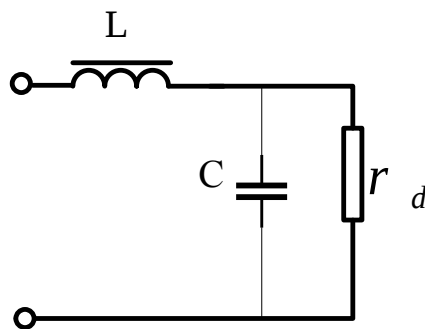


Рис. 4.2 – Схема сглаживающего LC-фильтра

Пример расчета: Рассчитать Г-образный LC-фильтр (рис. 4.2). Коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя $K'_{п(1)} = 5,7\%$, частота тока питающей сети $f_c = 50$ Гц, напряжение на выходе фильтра $U_d = 27$ В, ток на-

грузки $I_d = 10A$, коэффициента пульсаций на нагрузке $K_{п(1)} = 0,2 \%$, выпрямитель собран по трехфазной схеме $m_{п} = 6$.

Коэффициент фильтрации фильтра

$$K_{\Phi} \approx K = \frac{K'_{п(1)}}{K_{п(1)}} = 5,7 / 0,2 = 28,5$$

Так как $K_{\Phi} < 50$, то выбираем однозвенный LC-фильтр

$$LC = \frac{10(K_{\Phi} + 1)}{m_{п}^2 \alpha^2} = \frac{10(28,5 + 1)}{6^2 \cdot 1^2} = 8,2 \text{ мкФ} \cdot \text{Гн}.$$

Минимальная индуктивность, при которой обеспечивается индуктивная реакция фильтра

$$L_{min} > \frac{2r_d}{(m_{п}^2 - 1)m_{п}\omega} = \frac{2 \cdot 2,7}{(6^2 - 1)6 \cdot 2\pi \cdot 50} = 0,00008 \text{ Гн} = 80 \text{ мкГн}.$$

где $r_d = U_d / I_d = 2,7 \text{ Ом}$.

Выбираем стандартный дроссель Д52 с индуктивностью $L = 0,01 \text{ Гн}$.

Емкость конденсаторного фильтра

$$C = LC / L = \frac{8,2}{0,01} = 820 \text{ мкФ}.$$

Выбираем конденсатор типа КЭ-1 емкостью 500мкФ с рабочим напряжением 30 В (для обеспечения требуемой емкости включаем два конденсатора параллельно).

Задание на самостоятельную работу

Произвести расчет Г-образного LC-фильтра. Параметры нагрузки указаны в табл. 4.1

Для всех вариантов принимаем:

- коэффициента пульсаций на нагрузке $K_{п(1)} = 0,2 \%$,
- частота тока питающей сети $f_c = 50 \text{ Гц}$.

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчета Г-образного LC-фильтра

№ вар.	Коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя $K'_{п(1)}$	Напряжение на выходе фильтра $U_d, \text{В}$	Ток нагрузки $I_d, \text{А}$	Выпрямитель собран по трехфазной схеме $m_{п}$
1.	4,8	127	9	6
2.	5,2	48	14	3
3.	6,4	36	12	6
4.	5,5	27	10	3
5.	5,8	127	7	6

№ вар.	Коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя $K_{\pi(1)}$	Напряжение на выходе фильтра $U_d, \text{В}$	Ток нагрузки $I_d, \text{А}$	Выпрямитель собранный по трехфазной схеме m_{π}
6.	3,9	27	18	3
7.	6,2	36	12	6
8.	5,4	60	17	3
9.	4,7	127	8	6
10.	4,8	127	9	6
11.	5,2	48	14	3
12.	6,4	36	12	6
13.	5,5	27	10	3
14.	5,8	127	7	6
15.	3,9	27	18	3
16.	6,2	36	12	6
17.	5,4	60	17	3
18.	4,7	127	8	6

Контрольные вопросы

1. Фильтры источников питания. Схемы. Расчет параметров.
2. Схема Г-образного фильтра. Назначение и описание работы.
3. Чему равен коэффициент сглаживания. Формулы расчета индуктивности емкости фильтра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоус А.И., Полупроводниковая силовая электроника / С.А. Ефименко А.С. Турцевич. - Москва: Техносфера, 2013. – 216 с.
2. Бочаров Л.Н. Расчет электронных устройств на транзисторах/ Л.Н. Бочаров, С.К. Жердяков, И.Ф. Колесников – М.: Энергия, 1978. – 257 с.
3. Гельман М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
4. Герасимов В.Г. Основы промышленной электроники. - М.: “Высшая школа” 2004.
5. Голиков С.П. Силовые преобразователи автоматизированных электроприводов. Конспект лекций. – Керчь: КГМТУ, 2012. –130 с.
6. Штумпф Э.П. Судовая электроника и силовая преобразовательная техника: Учебник. – СПб: Судостроение, 1993. – 352 с.

Пронина Анна Константиновна

**СУДОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
И СИЛОВАЯ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

*Методические указания
к практическим работам*

Часть 2

В авторской редакции

Изд. № 107/2021. Объем 1,75 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»