

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**Б. Л. Геллер**

**ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. РАЗДЕЛ 2.  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

Учебно-методическое пособие  
по практическим занятиям для студентов заочной формы обучения  
направления подготовки бакалавров  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2023

УДК 621.3 (076)

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики ФГБОУ ВО  
«Калининградский государственный технический университет»

И. Е. Кажекин

**Геллер, Б. Л.**

Промышленная электроника. Раздел 2. Энергетическая электроника: учеб.-метод. пособие по практическим занятиям для студентов заочной формы обучения напр. подгот. бакалавров 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / **Б. Л. Геллер.** – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 15 с.

Учебно-методическое пособие является руководством по практическим занятиям по дисциплине «Промышленная электроника. Раздел 2. Энергетическая электроника» для обучающихся по направлению подготовки бакалавров 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. Практические занятия предназначены для закрепления теоретических знаний, полученных при изучении основных видов устройств энергетической электроники.

Список лит. – 3 наименования

Учебно-методическое пособие рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией Института морских технологий, энергетики и строительства 23.12.2022 г., протокол № 04

УДК 621.3 (076)

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2023 г.  
© Геллер Б. Л., 2023 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ .....	6
2 ОПИСАНИЕ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ .....	13
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	14

## ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины «Промышленная электроника. Раздел 2. Энергетическая электроника» является изучение элементной базы полупроводниковых преобразователей электроэнергии, электромагнитных процессов в устройствах энергетической электроники, принципов управления преобразователями для высокоэффективной эксплуатации, модернизации и проектирования устройств энергетической электроники.

Основные задачи дисциплины заключаются в следующем:

- изучение основных разновидностей силовых полупроводниковых приборов;
- изучение различных типов устройств энергетической электроники, особенностей протекания электромагнитных процессов, областей применения, характеристик и методов расчета;
- формирование знаний, умений и навыков для анализа, проектирования и эксплуатации современной преобразовательной техники.

Целью практических занятий по дисциплине «Промышленная электроника. Раздел 2. Энергетическая электроника» является закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях при изучении основных видов устройств энергетической электроники.

Задачи практических занятий направлены на получение практических навыков расчета основных характеристик процессов, происходящих в неуправляемых и управляемых выпрямителях и инверторах.

После выполнения практических заданий обучаемые должны овладеть следующими знаниями, умениями и навыками:

*Знать:*

- основные физические принципы работы силовых преобразовательных устройств;

– принципы построения схем полупроводниковых преобразователей электроэнергии, их разновидности, характеристики и основные расчетные соотношения.

*Уметь:*

– проводить анализ процессов в устройствах энергетической электроники;

– рассчитывать параметры устройств энергетической электроники.

*Владеть:*

– методами расчета электромагнитных процессов, протекающих в полупроводниковых преобразователях электроэнергии.

При решении задач по энергетической электронике самым непосредственным образом задействуются важнейшие положения теоретической электротехники и методы решения задач, изучавшиеся в курсе ТОЭ. Особенное значение приобретают методы расчета электрических цепей по характеристикам для мгновенных значений, расчета характеристик электрических фильтров, расчета периодических несинусоидальных процессов.

Для успешного решения задач (а в последующей профессиональной деятельности – и вообще решения практических вопросов проектирования и эксплуатации устройств энергетической электроники) большое значение имеет умение строить временные диаграммы напряжения и токов в характерных точках цепей преобразовательных устройств. Правильное построение временной диаграммы дает наглядное представление о процессах и помогает выбрать верный путь решения.

В учебном плане основной профессиональной образовательной программы бакалавриата по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника практические занятия предусмотрены для заочной формы обучения.

# 1 СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Тема практического занятия – расчет характеристик процессов, происходящих в неуправляемых и управляемых выпрямителях и инверторах.

Задачи занятия и примеры их выполнения:

Задача 1. Расчет параметров неуправляемых выпрямителей.

Неуправляемый выпрямитель, выполненный по однофазной двухполу- периодной нулевой схеме, питается от сети переменного тока с линейным напряжением  $U_1 = 220$  В через трансформатор. Выпрямленное напряжение  $U_d = 68$  В, сопротивление нагрузки  $R_d = 6$  Ом. Определить требуемый коэффициент трансформации, расчетную мощность трансформатора, выпрямленное напряжение, максимальное напряжение на диоде и максимальный ток диода.

Решение:

Для данного типа выпрямителя выпрямленное напряжение

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9U_2. \text{ Отсюда } U_2 = \frac{U_d}{0,9} = 75,6 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации  $k_T = \frac{U_1}{U_2} = 2,91$ .

Расчетная мощность трансформатора определяется по [3, формула (2.14)]:

$$S_T = 1,48P_d = 1,48 \frac{U_d^2}{R_d} = 888 \text{ Вт.}$$

Выпрямленное напряжение  $U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 144$  В.

В однофазной нулевой схеме максимальное обратное напряжение диода  $U_{обр.м}$  равно удвоенному амплитудному значению входного переменного напряжения:  $U_{обр.м} = 2\sqrt{2}U_2 = 214$  В.

Максимальный ток диода  $I_{д.м}$  равен максимальному выпрямленному току:

$$I_{д.м} = \frac{\sqrt{2}U_d}{R_d} = 17,8 \text{ А.}$$

### Задача 2. Расчет параметров управляемых выпрямителей.

Управляемый выпрямитель выполнен по однофазной мостовой схеме. Необходимо обеспечить диапазон регулирования выходного напряжения 1:3. Определить требуемый диапазон изменения угла управления.

Решение:

Регулировочная характеристика данного выпрямителя имеет вид:

$$U_d(\alpha) = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

Значению  $U_d(\alpha) = U_{d0}/3$  соответствует угол  $\alpha = \arccos(-1/3) = 109,5^\circ$ .

Таким образом, диапазон регулирования угла  $\alpha$  – от 0 до  $109,5^\circ$ .

### Задача 3. Расчет влияния индуктивной нагрузки.

Однофазный мостовой управляемый выпрямитель питается переменным напряжением с действующим значением 60 В. Активное сопротивление нагрузки 25 Ом. Индуктивное сопротивление нагрузки на частоте сети много больше активного. Угол управления  $\alpha = 45^\circ$ . Определить средний ток нагрузки при наличии нулевого вентилля и при его отсутствии.

Решение:

При наличии нулевого вентилля форма напряжения на нагрузке такая же, как при  $L_d = 0$ . Поэтому

$$I_d(\alpha) = \frac{U_d(\alpha)}{R_d} = \frac{U_{d0}}{R_d} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi R_d} \cdot \frac{1 + \cos 45^\circ}{2} = 1,84 \text{ А.}$$

В отсутствие нулевого вентилля

$$I_d(\alpha) = \frac{U_d(\alpha)}{R_d} = \frac{U_{d0} \cos \alpha}{R_d} = \frac{2\sqrt{2}U \cos 45^\circ}{\pi R_d} = 1,53 \text{ А.}$$

### Задача 4. Расчет характеристик процесса коммутации.

Однофазный неуправляемый выпрямитель питается от промышленной сети переменного тока через трансформатор с индуктивностью рассеяния, приведенной к вторичной обмотке  $L_s = 0,18$  мГн. Активно-индуктивная нагрузка имеет параметры:  $R_d = 5$  Ом;  $L_d = 0,08$  Гн. Действующее напряжение

вторичной обмотки  $U_2 = 48$  В. Определить длительность интервала коммутации.

Решение

Проверяем, есть ли основание считать, что ток нагрузки идеально сглажен. При условии  $\omega L_d > 4R_d$  можно с достаточной точностью принять  $L_d = \infty$ .

В нашем случае  $\omega L_d = 25,1 \text{ Ом} > 4 R_d$ .

Уравнение коммутации для однофазной мостовой схемы в общем случае имеет вид:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2I_d x_s}{\sqrt{2}U_2}.$$

В частном случае при  $\alpha = 0$   $1 - \cos \gamma = \frac{2I_d x_s}{\sqrt{2}U_2}$ .

Отсюда  $\gamma = \arccos\left(1 - \frac{2I_d x_s}{\sqrt{2}U_2}\right) = 9,7^\circ$ .

#### Задача 5. Расчет характеристик ведомого инвертора.

Ведомый инвертор выполнен по трехфазной мостовой схеме и подключен к сети с напряжением  $U = 220$  В. Суммарное активное сопротивление потерь в цепи постоянного тока  $r_{\pi} = 0,28$  Ом. Источник постоянной ЭДС  $E_d = 260$  В отдает в инвертор ток  $I_d = 10$  А. Определить угол управления  $\beta$ .

Решение

Входное напряжение ведомого инвертора  $U_d = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi}U \cos \beta$ .

С другой стороны, согласно второму закону Кирхгофа  $U_d = -E_d + I_d r_{\pi}$ .

Отсюда  $\beta = \arccos\left(\pi \cdot \frac{E_d - I_d r_{\pi}}{3\sqrt{2}U_2}\right) = 30^\circ$ .

#### Задача 6. Расчет требуемого угла управления инвертором.

Ведомый инвертор выполнен по однофазной мостовой схеме. Активные потери незначительные. Напряжение вторичной обмотки трансформатора 127 В. Индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора, приведенное к

вторичной обмотке,  $x_s = 0,3$  Ом. При угле управления  $\beta_1 = 16^\circ$  инвертор работает в режиме холостого хода. Каким следует установить угол управления  $\beta_2$ , чтобы инвертор отдавал в сеть переменного тока мощность  $P_d = 1,5$  кВт?

Решение

Уравнение внешней характеристики инвертора имеет вид

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \cos\beta + \frac{2I_d x_s}{\pi}.$$

Входное напряжение инвертора равно ЭДС  $E$ . При  $\beta_1 = 15^\circ$   $I_d = 0$ . Отсюда можно определить величину  $E$ .

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \cos\beta_1 = 109,9 \text{ В.}$$

При искомом угле  $\beta_2$  ток источника ЭДС  $I_d = P_d/E = 13,6$  А.

Из уравнения внешней характеристики инвертора находим:

$$\beta_2 = \arccos\left(\frac{\pi E - 2I_d x_s}{2\sqrt{2}U_2}\right) = 20,2^\circ.$$

#### Задача 7. Расчет минимального угла управления инвертором

В ведомом инверторе используются тиристоры со временем восстановления 300 мкс. При максимальном значении тока угол коммутации  $\gamma = 10^\circ$ . Определить минимально допустимое значение угла управления  $\beta$  при частоте сети 50 Гц.

Решение

Для предотвращения опрокидывания инвертора необходимо во всем диапазоне допустимых токов обеспечить выполнение условия  $\beta > \gamma_{max} + \delta_{min}$ , где  $\delta_{min}$  определяется временем восстановления запирающей способности тиристора. При частоте сети 50 Гц время 300 мкс соответствует углу  $5,4^\circ$ . Таким образом,  $\beta > 10 + 5,4 = 15,4^\circ$ .

#### Задача 8. Расчет характеристик автономного инвертора.

Автономный инвертор напряжения выполнен по схеме рис. 1. Полупроводниковые ключи условно показаны в виде запираемых тиристоров.

$E_d = 96$  В;  $R_H = 6$  Ом;  $L_H = 0,048$  Гн;  $f = 50$  Гц. Определить максимальное значение тока нагрузки.

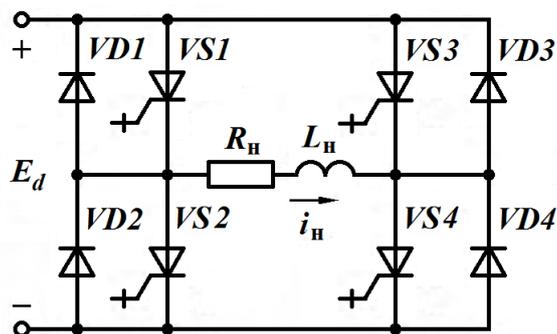


Рис. 1

Решение

Форма тока нагрузки представлена на рис. 2. Расчет тока представляет собой типичную задачу о переходном процессе в  $RL$ -цепи с начальным условием  $i_H(0) = -I_m$  при подключении постоянной ЭДС  $E_d$ .

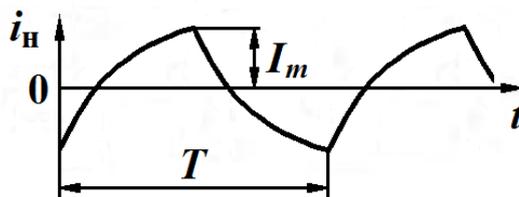


Рис. 2

Решение задачи имеет вид:

$$i(t) = \frac{E_d}{R_H} - \left( \frac{E_d}{R_H} + I_m \right) e^{-\frac{R_H t}{L_H}}.$$

При  $t = T/2$  ток нагрузки принимает значение  $I_m$ . Отсюда находим:

$$I_m = \frac{E_d}{R_H} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{R_H T}{L_H}}}{1 + e^{-\frac{R_H T}{L_H}}} = 8,87 \text{ А.}$$

**Задание для самостоятельной работы:** решить приведенные ниже задачи.

Задача СР 1.

Выпрямитель, выполненный по трехфазной мостовой схеме, должен питать активную нагрузку с сопротивлением 2,5 Ом постоянным напряжением

150 В. Выпрямитель подключен к промышленной трехфазной сети с линейным напряжением  $U_c = 380$  В через трансформатор. Рассчитать коэффициент трансформации. Определить предельные параметры диода, способного работать в данном выпрямителе.

#### Задача СР 2.

Неуправляемый выпрямитель питается трехфазным напряжением с частотой 50 Гц, выполнен по трехфазной мостовой схеме и питает напряжением  $U_d = 200$  В активную нагрузку с сопротивлением  $R_d = 12$  Ом. Определить индуктивность реактора  $L_d$ , который нужно включить последовательно с нагрузкой, чтобы уменьшить коэффициент пульсации  $k_n$  до величины 0,01.

#### Задача СР 3.

Трехфазный выпрямитель выполнен по нулевой схеме и питается от промышленной сети переменного тока через трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y0. Индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной обмотке, равна 0,6 мГн. Принять ток нагрузки идеально сглаженным. Номинальное активное сопротивление нагрузки  $R_d = 12$  Ом. Линейное вторичное напряжение  $U_2 = 220$  В. Определить выходное напряжение в режиме холостого хода и при номинальной нагрузке.

#### Задача СР 4.

В ведомом инверторе используются тиристоры с временем восстановления 300 мкс. При максимальном значении тока угол коммутации  $\gamma = 10^\circ$ . Определить минимально допустимое значение угла управления  $\beta$  при частоте сети 50 Гц.

#### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Объясните принцип действия однофазного выпрямителя по нулевой схеме при активной нагрузке. Начертите временные диаграммы выпрямленного напряжения, тока и напряжения вентиля.

2. Объясните принцип действия трехфазного мостового выпрямителя при активной нагрузке. Начертите временные диаграммы выпрямленного напряжения, тока и напряжения вентиля, тока трансформатора.

3. Как рассчитывается выходное напряжение выпрямителя?

4. Что такое угол управления?

5. Что такое регулировочная характеристика?

6. В каком диапазоне можно менять угол управления выпрямителя при различных характерах нагрузки?

7. Как обеспечивается инверторный режим работы выпрямителя?

8. Что такое угол опережения  $\beta$  и угол запаса  $\delta$ ?

9. Что такое внешняя характеристика выпрямителя?

10. Что является основной причиной снижения выходного напряжения выпрямителя при увеличении тока нагрузки?

11. Что такое входная характеристика ведомого инвертора?

12. Как изменяется входное напряжение ведомого инвертора при увеличении входного тока и почему?

13. Что такое опрокидывание ведомого инвертора?

14. Поясните принцип работы автономного инвертора напряжения. Начертите временные диаграммы напряжения и тока нагрузки.

15. Как можно регулировать действующее значение выходного напряжения автономного инвертора?

## 2 ОПИСАНИЕ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

Текущий контроль проводится в пределах учебного времени, отведенного на практическое занятие. Формой контроля является предъявление преподавателю результатов выполнения практических заданий.

Критерии оценки практического занятия:

Оценка «отлично» выставляется, если студент активно работает в течение всего практического занятия, и показывает при этом глубокое овладение лекционным материалом, проявляет умение самостоятельно определить путь решения задачи, знает расчетные соотношения, выполняет все этапы практического задания, получает правильный ответ.

Оценка «хорошо» выставляется, если студент активно работает в течение практического занятия, выполняет задания, но в ответах допускает неточности, проявляет недостаточное умение выбрать наиболее рациональный путь решения задачи, недостаточно полно увязывает конкретные приемы решения с общетеоретическими положениями, не может четко сделать обобщения и выводы.

Оценка «удовлетворительно» выставляется в том случае, когда студент обнаруживает знание лекционного материала и учебной литературы, в целом овладел приемами решения задач. Но на занятии ведет себя пассивно, дает неполные ответы на вопросы, допускает грубые ошибки при выборе теоретических соотношений и выполнении расчетов, не может обобщить и сделать четкие логические выводы.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае, когда студент не выполняет заданий преподавателя, не знает теоретический материал, не понимает постановки задачи или сути основных расчетных соотношений, допускает грубые ошибки в расчетах.

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Геллер, Б.Л. Энергетическая электроника: учебное пособие / Б.Л. Геллер. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. – 137 с.
2. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – 2-е изд, стереотипное. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.
3. Полупроводниковые выпрямители / Под ред. Ф. И. Ковалева и Г. П. Мостковой. – Москва: Энергия, 1978. – 448 с.

Локальный электронный методический материал

Борис Львович Геллер

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА.  
ЧАСТЬ 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*Редактор И. Голубева*

Уч.-изд. л. 0,9. Печ. л. 0,9.

Издательство федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет».  
236022, Калининград, Советский проспект, 1