

Составители: ст. преп. Корчагина Л.Г.,
доц. Яковлева Л.П.

Рецензент: доц. Грибов В.Д.

Рекомендовано к изданию в качестве методических
указаний кафедрой электротехники и
технической
электроники.

Протокол № 8 от 11.01.2013 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Содержание дисциплины.....	4
2. Методические рекомендации по оформлению контрольной работы.....	8
3. Общие сведения об электропитании.....	10
3.1. Основные условные обозначения.....	10
3.2. Электропитающие устройства – основные термины и определения.....	11
Контрольная работа.....	18
Задача 1.....	18
Рекомендации к решению задачи 1.....	20
Задача 2.....	20
Рекомендации к решению задачи 2.....	22
Задача 3.....	23
Рекомендации к решению задачи 3.....	24
Задача 4.....	25
Рекомендации к решению задачи 4.....	26
Задача 5.....	27
Рекомендации к решению задачи 5.....	28
Приложение 1. Принципиальные и эквивалентные схемы выпрямителей.....	34
Приложение 2. Регулировочные характеристики управляемых тиристорных выпрямителей.....	37
Приложение 3. Расчет режима работы исполнительного элемента транзисторного стабилизатора напряжения непрерывного регулирования.....	40
Таблица 1. Основные расчетные соотношения для неуправляемых выпрямителей.....	44
Таблица 2. Расчетные формулы и значения функций угла отсечки для расчета выпрямителя с емкостным фильтром.....	45
Таблица 3. Числовые варианты к задачам 1,2.....	46
Таблица 4. Числовые варианты к задачам 3,4,5.....	49
Литература.....	50

1. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Введение

Понятие об электропитающих устройствах (ЭПУ), источники первичного и вторичного электропитания.

Характеристика электрических сетей общего назначения, показатели качества электроэнергии.
Краткая история развития ЭПУ.

Раздел 1. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Тема 1.1. Неуправляемые выпрямители

Классификация, основные технические показатели и характеристики неуправляемых выпрямителей. Структурная схема, назначение узлов.

Эквивалентные схемы и основные технические параметры силовых выпрямительных диодов, преобразовательных трансформаторов и сглаживающих фильтров.

Теория работы неуправляемого выпрямителя гармонического напряжения при активном характере нагрузки. Эквивалентные схемы и временные диаграммы, характеризующие процесс работы выпрямителя.

Гармонический анализ кривой выпрямленного напряжения, среднее значение и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения в зависимости от числа фаз и тактов схемы выпрямления.

Сопоставление показателей качества различных схем выпрямления, области их применения.

Теория работы неуправляемого выпрямителя гармонического напряжения при индуктивном характере нагрузки. Эквивалентная схема и дифференциальное уравнение цепи для интервала проводимости вентилей. Среднее значение и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения при индуктивном характере нагрузки.

Сопоставление технических показателей выпрямителей с активным и индуктивным характером нагрузки.

Теория работы управляемого выпрямителя гармонического напряжения при емкостном характере нагрузки. Эквивалентная схема и временные диаграммы, характеризующие процесс работы выпрямителя. Среднее значение и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения, обобщенное уравнение внешней характеристики выпрямителя.

Сопоставление технических показателей выпрямителей с активным и емкостным характером нагрузки.

Специальные схемы выпрямления с емкостным характером нагрузки (схемы умножения).

Процессы коммутации фаз в выпрямителях большой мощности с индуктивным характером нагрузки. Влияние процесса коммутации на технические показатели выпрямителя большой мощности.

Тема 1.2. Сглаживающие фильтры выпрямителей

Классификация и параметры сглаживающих фильтров.

Однозвенные фильтры (Г- и П-образные). Влияние типа фильтра на внешнюю характеристику выпрямителя. Многозвенные фильтры. Определение коэффициента фильтрации, переходная и частотные характеристики. Активные фильтры, применение интегральных схем.

Тема 1.3. Управляемые выпрямители

Классификация регуляторов напряжения. Особенности применения в качестве регулирующих элементов реостатов, потенциометров, дросселей насыщения, трансформаторов и автотрансформаторов.

Транзистор как регулирующий элемент, непрерывный и дискретный режимы работы.

Тиристор как регулирующий элемент, понятие угла включения тиристора и регулировочной характеристики.

Основные требования к схемам управления углом включения тиристоров, методы управления, оптимальная форма сигнала управления при фазоимпульсном методе.

Влияние схемы выпрямления и характера нагрузки на вид регулировочной характеристики. Назначение ответв-

лящего диода. Зависимость коэффициента пульсаций от угла включения тиристора.

Раздел 2. СТАБИЛИЗАТОРЫ

Тема 2.1. Классификация стабилизаторов
Назначение и классификация стабилизаторов. Основные параметры и характеристики стабилизаторов напряжения.

Параметрические стабилизаторы, область применения. Стабилизатор напряжения как система автоматического регулирования, принципы регулирования по возмущению, по отклонению и комбинированный. Оценка качества работы стабилизаторов в статическом и динамическом режимах, общее понятие об устойчивости.

Тема 2.2. Лнейные стабилизаторы напряжения (компенсационные)

Транзисторные стабилизаторы напряжения непрерывного регулирования с регулирующим транзистором, включенным последовательно с нагрузкой, схемы, принцип действия, область применения в аудиовизуальной технике. Интегральные стабилизаторы напряжения серии 142ЕВ, принцип действия, основные схемы включения, параметры, область применения.

Основы расчета погрешности стабилизации. Методы повышения точности стабилизации и обеспечения устойчивости стабилизаторов.

Стабилизаторы на основе дросселей насыщения в качестве регулирующих элементов, область применения.

Тема 2.3. Стабилизаторы напряжения дискретного регулирования

Транзисторные стабилизаторы напряжения дискретного регулирования, основные свойства, энергетические показатели.

Стабилизаторы напряжения и тока на основе управляемых вентилей, структурные схемы, назначение узлов.

Стабилизаторы напряжения с промежуточным высокочастотным преобразованием, структурные схемы, назначение узлов.

Структурные схемы статических преобразователей, инверторы, схемы одноктактных и двухтактных транзисторных инверторов, основные способы улучшения характеристик.

Тиристорные инверторы, область применения. Особенности работы выпрямителей при прямоугольной форме напряжения.

Раздел 3. УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ АУДИОВИЗУАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Тема 3.1. Общие вопросы агрегатирования аудиовизуальной аппаратуры

Системный подход к проектированию аудиовизуальной аппаратуры, агрегатный принцип построения.

Проблемы миниатюризации и повышения эффективности источников питания.

Тема 3.2. Источники электропитания стационарной аудиоаппаратуры

Влияние параметров и характеристик источника питания на качество воспроизведения звука и на энергетические показатели оконечных каскадов. Типовые схемы источников электропитания аудиоаппаратуры.

Тема 3.3. Источники электропитания видеоаппаратуры
Основные требования к источникам электропитания видеоаппаратуры. Влияние параметров и характеристик источника питания на качество воспроизведения изображения. Типовые схемы источников электропитания видеоаппаратуры.

Заключение

Перспективы развития устройств и систем электропитания аудиовизуальной аппаратуры.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Самостоятельная работа над теоретической частью дисциплины «Электропитающие устройства» включает выполнение контрольной работы, позволяющей преподавателю оценить уровень знаний студента.

К сдаче экзамена допускаются студенты, проделавшие и защитившие лабораторные работы и имеющие зачетную контрольную работу.

При оформлении контрольной работы следует придерживаться следующих правил:

1. Номер варианта контрольной работы выбирается по двум последним цифрам шифра студенческого билета (зачетной книжки).

Пример: шифр – 741-8781, номер варианта – 81.

2. Контрольная работа выполняется на листах писчей бумаги формата А4 или в тетради.

3. Текст выполняется только черными, фиолетовыми или синими чернилами либо пастой. Использовать зеленые и красные цвета для оформления контрольной работы, а также применять фломастеры ЗАПРЕЩАЕТСЯ.

4. Пробел между строками текста должен соответствовать 8...10 мм. На правой части каждой страницы оставляются поля размером 25...30 мм.

5. Электрические и эквивалентные схемы следует выполнять в соответствии с требованиями ЕСКД.

6. Временные диаграммы и графики следует строить на масштабной (миллиметровой) бумаге с указанием и соблюдением масштаба по осям.

7. В контрольной работе должен быть приведен номер варианта и числовые значения исходных данных. ТЕКСТЫ условий задач приводить НЕ СЛЕДУЕТ. Образец титульного листа приведен на рис. 1.

8. Так как контрольная работа будет обсуждаться на экзамене, следует давать письменные пояснения математических расчетов.

9. При выполнении контрольной работы на компьютере в списке используемой литературы указать программы, с которыми работали.

10. Если контрольная работа не зачтена, то все необходимые поправки должны быть сделаны в той же тетради (можно подклеить к ней дополнительные листы).

НЕЛЬЗЯ вносить какие-либо исправления в текст или графики, уже просмотренные преподавателем.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ»

Кафедра электротехники и технической электроники

Контрольная работа
по дисциплине «Электропитающие устройства»

Вариант № _____

Студент _____ курса заочного отделения по специальности 210312 «Аудиовизуальная техника»

Шифр _____ (фамилия, имя, отчество полностью)

Место работы студента,
должность _____

Работа проверена (дата)		
Оценка работы		
Подпись преподавателя		

Рис. 1. Образец титульного листа

3.2. ЭЛЕКТРОПИТАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА – ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1. **Электропитающие устройства (ЭПУ)** – устройства, которые вырабатывают электроэнергию, транспортируют её к месту потребления, преобразуют по роду тока, регулируют или стабилизируют по величине.

Электропитающие устройства подразделяют на два класса: **источники первичного электропитания (ИПЭП)** и **источники вторичного электропитания (ИВЭП)**.

Источники первичного электропитания преобразуют любой вид энергии в электрическую энергию (например, солнечные батареи, гальванические батареи). Источники вторичного электропитания преобразуют электрическую энергию в электрическую же с изменением её параметров (величина напряжения, тока, частоты). Таким образом, они предназначены для преобразования электроэнергии первичных источников и обеспечения электропитанием отдельных цепей радиоэлектронной аппаратуры. К ИВЭП относят инверторы, конверторы, выпрямители и т.д.

2. **Инверторы** – ИВЭП, служащие для преобразования энергии постоянного тока в энергию переменного тока.

3. **Конверторы** – ИВЭП, которые преобразуют энергию постоянного тока в энергию постоянного тока, изменяя ее величину.

4. **Выпрямители** – ИВЭП, реализующие статический метод преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока.

5. **Схема выпрямления** – характеризуется числом фаз и числом тактов.

Число фаз (m_2) схемы выпрямления – определяется числом **вентильных обмоток** трансформатора, т.е. вторичных обмоток, в которые включены выпрямительные диоды (вентили).

Число тактов (p) схемы выпрямления – определяется возможностью протекания тока по вентильным обмоткам трансформатора в одном или двух направлениях,

3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПИТАНИИ

3.1. ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

1. $e(v)$; $u(v)$; $i(v)$ – мгновенные значения ЭДС, напряжения и тока соответственно, где $v = \omega t = 2\pi f t$.

Конкретизация, какие именно ЭДС, напряжения и токи, производится с помощью индексов, например:

$e_2(v)$ – ЭДС вторичной (вентильной) обмотки трансформатора;

$u_1(v)$ – напряжение первичной (сетевой) обмотки трансформатора;

$i_0(v)$ – выпрямленный ток;

2. U_0 ; I_0 – постоянные составляющие выпрямленного напряжения, тока.

3. U_{δ} ; I_{δ} или $U_{\delta\phi\phi}$; $I_{\delta\phi\phi}$ – действующие или эффективные значения напряжения, тока.

Допускается отсутствие индексов, указывающих, что значение действующее, например:

I_2 – действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора.

4. E_m ; U_m ; I_m – амплитудные значения ЭДС, напряжения и тока.

Например:

E_{2m} – амплитуда ЭДС вторичной обмотки трансформатора.

5. P – активная мощность.

6. Q – реактивная мощность.

7. T – реактивная мощность искажений.

8. S – полная (вольт-амперная) мощность.

9. m_1 – число фаз питающей (первичной) сети.

10. m_2 – число фаз схемы выпрямления.

11. p – число тактов схемы выпрямления.

12. θ – угол отсечки.

13. γ – угол коммутации.

14. α – угол включения тиристора.

то есть использованием одного или обоих полупериодов («тактов») переменного выпрямляемого напряжения.

Соответственно, схемы выпрямления могут быть либо однотоковыми ($p=1$), либо двухтактными ($p=2$). Двухтактные схемы реализуются на базе диодных мостовых схем, поэтому их часто называют **мостовыми** схемами выпрямления.

6. Коэффициент пульсаций n -ой гармоники выпрямленного напряжения показывает соотношение амплитуды n -ой гармоники пульсаций $U_{m(n)}$ и среднего значения выпрямленного напряжения U_0 :

$$k_{П(n)} = \frac{U_{m(n)}}{U_0}.$$

7. Частота пульсаций (первой гармоники) выпрямленного напряжения:

$$f_{П(1)} = m_2 p f_c,$$

где f_c - частота питающей сети.

8. Внешняя характеристика выпрямителя - это зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от среднего значения тока нагрузки, при постоянстве напряжения питающей сети.

Уравнение внешней характеристики выпрямителя

$$U_0 = E_0 - I_0 Z_{П} \quad \text{при } U_C = const,$$

где E_0 - напряжение на выходе выпрямителя в режиме холостого хода,

U_C - напряжение питающей сети,

$Z_{П}$ - полное сопротивление потерь выпрямителя

(внутреннее сопротивление).

Уравнение внешней характеристики выпрямителя с индуктивным фильтром с учетом активных $r_{П}$ и индуктивных (рассеяния) L_S потерь:

$$U_0 = p \frac{m_2}{\pi} E_{2m} \sin \frac{\pi}{m_2} - I_0 \left(r_{П} + \frac{p m_2}{2\pi} \omega L_S \right) \quad \text{при } m_2 p \geq 2,$$

где $r_{П} = r_T + p r_D + r_L$ - суммарное сопротивление активных потерь;

$r_T = r_{IT} k_U^2 + r_{2T}$ - приведенное к вторичной обмотке активное сопротивление обмоток трансформатора;

r_L - активное сопротивление дросселя фильтра.

L_S - приведенное к вторичной обмотке значение индуктивности рассеяния обмоток трансформатора.

Внешняя характеристика выпрямителя с емкостным фильтром является нелинейной и более мягкой, чем у выпрямителя, работающего на активную нагрузку. Ее можно описать уравнением

$$I_0 = \frac{U_0 \cdot m_2}{r_n \cdot \pi} (ig\theta - \theta) = \frac{E_{2m} m_2}{r_n \cdot \pi} (\sin\theta - \theta \cos\theta).$$

9. Угол отсечки θ , функции угла отсечки - понятия, связанные с работой выпрямителя на емкостную нагрузку.

В течение двойного угла отсечки 2θ происходит заряд конденсатора фильтра, т.е. ток протекает через диоды и вентильную обмотку трансформатора.

Инженерный расчет выпрямителей с емкостным фильтром производят по функциям угла отсечки $[A(\theta), B(\theta), D(\theta), F(\theta), H(\theta)]$, которые определяют соотношения между величинами, характеризующими работу элементов схемы.

Функция угла отсечки $A(\theta)$ является основной и зависит от соотношения сопротивлений нагрузки R_n и сопротивления потерь r_n :

$$A(\theta) = r_n \pi / (m_2 p R_n).$$

Функция $B(\theta)$ определяет соотношение между средним значением напряжения на нагрузке U_0 и действующим значением напряжения вторичных обмоток трансформатора E_2 :

$$B(\theta) = E_2 / U_0.$$

Функция $D(\theta)$ является коэффициентом формы тока

P_c — активная составляющая мощности, потребляемая данным устройством от сети;

Q_c — реактивная составляющая мощности, вызванная сдвигом фаз первой гармоники сетевого тока относительно сетевого напряжения, считая, что сетевое напряжение подчиняется закону гармонического сигнала:

$$u_c(t) = U_{mc} \sin \nu;$$

T_c — реактивная составляющая мощности (мощность искажений), обусловленная наличием высших гармоник в потребляемом сетевом токе;

H_c — составляющая полной мощности, учитывающая асимметрию фаз питающего напряжения (рассчитывается только для трехфазных сетей).

12. Коэффициент полезного действия (КПД) выпрямителя — это отношение полезной (выпрямленной) $P_0 \approx P_H$ мощности на нагрузке к активной мощности, потребляемой от сети P_c :

$$\eta = \frac{P_0}{P_c} \cdot 100\%$$

13. Управляемые выпрямители позволяют одно- временно с преобразованием энергии постоянного тока в энергию переменного тока изменять выходной параметр (напряжение) по заданному закону. Наибольшее распространение получили тиристорные выпрямители.

Регулировочной характеристикой управляемых тиристорных выпрямителей называется зависимость среднего значения выпрямленного напряжения $U_{0\alpha}$ от угла включения тиристора α :

$$U_{0\alpha} = f(\alpha).$$

Углом включения тиристора α называется интервал времени между моментом естественной коммутации (т.е. моментом, когда потенциал анода становится выше потенциала катода) и моментом подачи управляющего напряжения.

$$D(\theta) = k_\Phi = I_{дейст} / I_{ср},$$

где $I_{дейст}$ — действующее значение тока, а $I_{ср}$ — среднее значение тока элемента схемы.

Функция $F(\theta)$ показывает соотношение между максимальным значением тока $I_{макс}$ и средним значением тока $I_{ср}$ элемента схемы:

$$F(\theta) = I_{макс} / I_{ср}.$$

Функция $H(\theta)$ позволяет по заданному значению коэффициента пульсаций k_n выбрать значение ёмкости фильтра C_0 :

$$H(\theta) = C_0 r_n f k_n(t).$$

10. Угол коммутации γ — интервал времени, в течение которого одновременно протекает ток по нескольким вторичным обмоткам трансформатора за счет индуктивности этих обмоток либо за счет внесенной индуктивности дросселя насыщения. Этот процесс возникает только в мощных источниках питания. Он вредно отражается на выходных параметрах мощных выпрямителей (уменьшает среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке U_0 за счет увеличения потерь, увеличивает коэффициент пульсаций k_n , уменьшает коэффициент мощности k_M).

В стабилизаторах, использующих в качестве регулирующего элемента дроссель насыщения, за счет принудительного изменения угла коммутации происходит стабилизация выходного параметра.

11. Коэффициент мощности — удельный энергетический параметр источника питания

$$k_M = \frac{P_c}{S_c},$$

где S_c — полная мощность, потребляемая от сети:

$$S_c^2 = P_c^2 + Q_c^2 + T_c^2 + H_c^2,$$

Структурная схема управляемых тиристорных выпрямителей (рис.2) аналогична структурной схеме неуправляемых выпрямителей, за исключением того, что блок неуправляемых вентилей (диодов) В заменен управляемыми вентиллями (тиристорами) УВ с соответствующей схемой управления СУ.

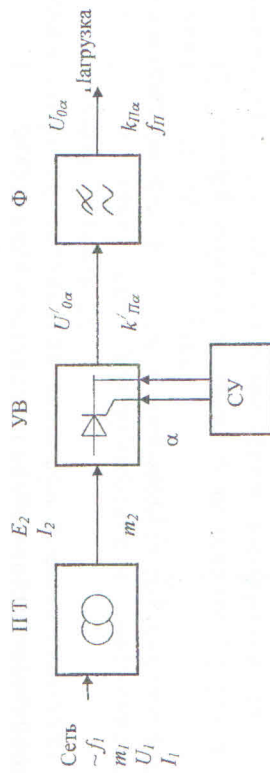


Рис.2. Структурная схема управляемых тиристорных выпрямителей

Тиристорные выпрямители классифицируются по тем же признакам, что и неуправляемые выпрямители. Кроме того, в двухтактных управляемых выпрямителях могут быть управляемыми все вентили (симметричная схема) или лишь вентили анодной (катодной) группы - несимметричная схема.

Многофазные управляемые выпрямители при малых углах включения работают в режиме непрерывного тока, а при больших углах - в режиме прерывистого тока.

$\alpha_{кр}$ - критическое значение угла включения, при котором ток и напряжение на нагрузке становятся прерывистыми.

$$\alpha_{кр} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m_2}$$

14. **Стабилизатор** - источник вторичного электропитания, автоматически поддерживающий с заданной точностью номинальное значение выходной величины (напряжения, тока, мощности) на зажимах потребителя, при

изменении дестабилизирующих факторов (напряжения питающей сети, тока нагрузки, температуры и т.п.) в определенных пределах.

15. **Параметрические стабилизаторы** - источники вторичного электропитания, в которых для стабилизации напряжения применяются элементы с нелинейной вольт-амперной характеристикой, имеющей участок, соответствующий постоянству напряжения $u \approx const$ (при стабилизации напряжения, например, стабилитроны, стабилитроны и т.п.) или постоянству тока $i \approx const$ (при стабилизации тока, например, токостабилизирующие каскады на полевых транзисторах).

16. **Компенсационные стабилизаторы** - источники вторичного электропитания, представляющие собой замкнутую (с отрицательной обратной связью) или разомкнутую систему автоматического регулирования.

17. **Полная (интегральная) относительная погрешность стабилизации напряжения**

$$\delta_{\Sigma}^U = \frac{U_{Hmax} - U_{Hmin}}{U_{HN}} = \frac{\Delta U_{H\Sigma}}{U_{HN}}$$

где U_{Hmax} ; U_{Hmin} ; U_{HN} - максимальное, минимальное и номинальное значения напряжения на нагрузке соответственно.

Так как нестабильность может быть вызвана различными возмущающими воздействиями, то различают и частные погрешности:

$$\delta_{U,\Sigma}^U = \delta_{U,E}^U + |\delta_{U,I}^U| + |\delta_{U,T}^U| + \dots$$

По величине погрешности стабилизации различают стабилизаторы низкой точности ($\delta_{U,\Sigma} \geq 5\%$); средней точности ($1\% \leq \delta_{U,\Sigma} < 5\%$); высокой точности ($0,1\% \leq \delta_{U,\Sigma} < 1\%$) и прецизионные ($\delta_{U,\Sigma} < 0,1\%$).

$\Delta U_{H\Sigma}$ - абсолютная погрешность.

18. **Коэффициент стабилизации** показывает, во сколько раз относительное изменение напряжения пи-

тающей сети больше результирующего относительного изменения напряжения на нагрузке.

$$k_{ст} = \frac{\Delta U_c}{U_{CN}} \cdot \frac{\Delta U_H}{U_{HN}} \quad \text{при } I_H = I_{HN} = const.$$

19. Внутреннее сопротивление стабилизатора

$$R_t = \frac{\Delta U_H}{\Delta I_H} \quad \text{при } U_C = U_{CN} = const.$$

Внутреннее сопротивление стабилизатора напряжения должно стремиться к нулю, а стабилизатора тока — к бесконечно большому значению.

20. Коэффициент полезного действия (КПД) стабилизатора

$$\eta = \frac{P_H}{P_C} = \frac{P_H}{P_H + P_{пот}},$$

где P_H — полезная мощность на нагрузке;

P_C — мощность, потребляемая стабилизатором от сети;

$P_{пот}$ — мощность потерь в стабилизаторе.

Мощность потерь в стабилизаторе (компенсационного типа) в основном зависит от применяемого регулирующего (исполнительного) элемента и режима, в котором он работает. Схемы управления работой регулирующего элемента, как правило, потребляют малую мощность. Стабилизаторы дискретного типа (транзисторные, тиристорные) имеют меньшие потери и, следовательно, больший КПД.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

ЗАДАЧА 1

В неуправляемом выпрямителе с активной нагрузкой (без потерь напряжения в фазах выпрямления) ИЗВЕСТНЫ:

- действующее значение фазных э.д.с. вентильной обмотки трансформатора E_2 ;
- действующее значение тока I_2 вентильной обмотки трансформатора;
- среднее значение выпрямленного напряжения U_0 ;
- среднее значение выпрямленного тока I_0 .

Требуется:

1. Определить тип схемы выпрямления (следует помнить, что в схемах $m_2=3$, $p=2$ вентильные обмотки преобразовательного трансформатора могут соединяться либо «звездой», либо «треугольником»).
2. Вычертить принципиальную и эквивалентную схемы этого выпрямителя.
3. Вычислить:
 - частоту пульсаций выпрямленного напряжения по первой гармонике $f_{\Pi(1)}$,
 - коэффициент пульсации $k_{\Pi(1)}$ выпрямленного напряжения u_0 по основной (первой) гармонике,
 - величину сопротивления R_H нагрузки,
 - среднее I_{CP}^{IV} и эффективное $I_{эфф}^{IV}$ значения прямого тока диода.
4. Построить внешнюю характеристику выпрямителя.
5. На одном листе масштабной бумаги вычертить, соблюдая масштаб по оси ординат и по оси абсцисс $v=\omega t$ ($-\pi/2 \leq v \leq 5\pi/2$):
 - графики мгновенных значений фазных э.д.с. $e_2(v)$,
 - график мгновенного значения выпрямленного напряжения $u_0(v)$, отметить уровень среднего значения U_0 .
 Данный график необходимо совместить с графиками фазных э.д.с., график мгновенного значения обратного напряжения $u_{обр}^{IV}(v)$ на диоде,
- график мгновенного значения тока вентильной обмотки трансформатора $i_2(v)$ (отметить уровень действующего значения I_2),

- график мгновенного значения прямого тока диода $i_{пр}^{пр}(v)$ (отметить уровни среднего значения тока диода $I_{ср}^{пр}$ и действующего значения тока диода $I_{эф}^{пр}$).

Рекомендации к решению задачи 1

1. Принципиальные схемы выпрямительных устройств показаны на рис.1.3 и 1.4 [2], рис.3; 4 [3] и в приложении 1 данных указаний, а примеры выполнения эквивалентных схем показаны на рис.2.2.а и 2.2.б [2], рис.5 [3] и в приложении 1 указаний.
 2. Примеры выполнения графической части задачи показаны на рис.2.2 [2], рис.1.1, 2.1, 2.2 [4].
 3. Все графики выполнять в едином масштабе по оси абсцисс $v = \omega t$ (рекомендуется масштаб $3\theta_{эл.град}$ или $\pi/6 рад$ в 1 см) и в едином масштабе по оси ординат (для напряжений и токов соответственно) с **обязательным** указанием этого масштаба по осям.
 4. При решении задачи 1 рекомендуется воспользоваться данными табл.1 данных указаний или табл.1 [3].
 5. Для построения внешней характеристики воспользоваться соответствующими уравнениями.
- Уравнение внешней характеристики идеального выпрямителя без потерь:

$$U_0 = p \frac{m_2}{\pi} E_{2m} \sin \frac{\pi}{m_2}$$

Уравнение внешней характеристики выпрямителя с учетом активных $r_{л}$ и реактивных потерь, обусловленных индуктивностью рассеяния обмоток трансформатора L_s :

$$U_0 = p \frac{m_2}{\pi} E_{2m} \sin \frac{\pi}{m_2} - I_0 (r_{л} + \frac{p m_2}{2\pi} \omega L_s); \text{ при } m_2 p \geq 2$$

ЗАДАЧА 2

Схема выпрямления, средние значения выпрямленного напряжения U_0 и тока I_0 остались такими же, как и в задаче 1. Частота питающей сети равна f .

Для уменьшения коэффициента пульсаций включен сглаживающий емкостной фильтр с емкостью C_0 . Емкостное сопротивление конденсатора $C_0 X_C = 1/(m_2 p \omega C_0)$ на частоте $f_{л(1)}$ пульсации основной гармоники в N раз меньше величины сопротивления R_H .

В фазах выпрямления имеются сопротивления активных потерь $r_{л}$, величина которых в K раз меньше сопротивления R_H нагрузки.

Требуется:

1. Вычертить эквивалентную схему выпрямителя с активными сопротивлениями потерь в фазах выпрямления и одиночным емкостным фильтром.
2. Вычислить:
 - действующие значения фазных э.д.с. E_2 ,
 - действующее значение тока I_2 вентиляционной обмотки преобразовательного трансформатора,
 - емкость C_0 конденсатора сглаживающего фильтра,
 - коэффициент пульсации $k_{л(1)}$ выпрямленного напряжения u_0 по основной (первой) гармонике,
 - среднее $I_{ср}^{пр}$ и эффективное $I_{эф}^{пр}$ значения прямого тока диода.
3. Построить внешнюю характеристику выпрямителя с емкостным фильтром.
4. Соблюдая масштаб, принятый в задаче 1, на одном листе масштабной бумаги вычертить:
 - графики мгновенных значений фазных э.д.с. $e_2(v)$ (в интервале $-\pi/2 \leq v \leq +5\pi/2$),
 - график мгновенного значения выпрямленного напряжения $u_0(v)$, отметить уровень среднего значения выпрямленного напряжения U_0 и значение двойного угла отсечки 2θ ;
 - график мгновенного значения тока вентиляционной обмотки трансформатора $i_2(v)$ (отметить уровень I_2),
 - график мгновенного значения прямого тока диода $i_{пр}^{пр}(v)$ (отметить уровни среднего значения тока диода $I_{ср}^{пр}$ и действующего значения тока диода $I_{эф}^{пр}$).

Рекомендации к решению задачи 2

1. Пример выполнения эквивалентной схемы выпрямителя с одиночным емкостным фильтром показан на рис. 2.23 [1, с. 105] и в приложении 1.

2. Емкостной фильтр включается параллельно нагрузке, так как обладает большим значением сопротивления постоянному току и малым переменному. Емкость конденсатора, как правило, выбирают из соотношения $\frac{R_x}{x_c} \geq 15 \dots 20$. При этом можно пренебречь пульсациями на нагрузке ($k_{\pi} < 10\%$).

В контрольной работе следует пренебречь переменной составляющей напряжения на нагрузке. Тогда пилообразное напряжение можно заменить прямой линией, расположенной на уровне среднего значения U_0 .

Сопротивление потерь в выпрямителе - чисто активное. При этом учитывают сопротивление трансформатора, дифференциальное сопротивление диодов $r_{\text{д}} = r_{\text{Г}} + r_{\text{ГД}}$. Это справедливо для источников питания малой и средней мощности.

3. Расчет выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром следует производить по функциям угла отсечки (см. табл. 2 данных указаний либо табл. 2 [3]).

Для этого следует рассчитать основную функцию $A(\theta) = r_{\pi} \pi / (m_p R_{\text{н}})$. Воспользовавшись таблицей 2 данного пособия, найти угол отсечки θ и остальные функции $B(\theta)$, $D(\theta)$, $F(\theta)$, $H(\theta)$. В этой же таблице, а также в разделе «Электропитающие устройства - основные термины и определения» указаны соотношения между электрическими величинами, которые можно рассчитать, используя данные функции угла отсечки.

4. Для построения внешней характеристики следует воспользоваться уравнениями:

$$I_0 = \frac{E_{2m} m_2}{r_{\pi} \cdot \pi} (\sin \theta - \theta \cos \theta),$$

$$U_0 = E_{2m} \cos \theta.$$

Следует помнить, что режиму холостого хода соответствует угол отсечки $\theta = 0$ град, а номинальному режиму

(U_0, I_0) - рассчитанный ранее угол отсечки. Расчет производить в диапазоне: по напряжению - от 0В до номинального значения U_0 , по току - от 0А до номинального значения I_0 .

5. При построении графиков обратить внимание на соответствие угла отсечки θ для напряжений и токов.

ЗАДАЧА 3

В схеме задачи 1 неуправляемые диоды заменены тиристорами. Последовательно с нагрузкой включен индуктивный фильтр L_0 . Для улучшения свойств управляемого выпрямителя с индуктивным характером нагрузки в схему включен ответвляющийся (нулевой) диод VD.

При номинальном значении напряжения сети значение фазной э.д.с. E_2 и среднее значение напряжения U_0 на нагрузке остались такими же, как и в задаче 1.

При изменении напряжения сети изменения действующего значения фазной э.д.с. E_2 вентильной обмотки преобразовательного трансформатора происходят в пределах, заданных коэффициентами a_n и a_m .

С помощью изменения угла включения тиристоров α выходное напряжение управляемого выпрямителя должно поддерживаться неизменным на уровне $0,7U_0$.

Требуется:

1. Вычертить эквивалентную схему управляемого выпрямителя без потерь напряжения в фазах выпрямления с индуктивной реакцией нагрузки и нулевым диодом.

2. Вычислить:

- минимальное $\alpha_{\text{МИН}}$ и максимальное $\alpha_{\text{МАКС}}$ значения углов включения тиристоров,

- максимальное значение коэффициента пульсации на входе сглаживающего фильтра $k_{\text{П(1)}}$.

3. На одном листе масштабной бумаги вычертить (соблюдая масштаб, принятый в задаче 1) кривые мгновенных значений ($-\pi/2 \leq v \leq +5\pi/2$):

- фазных э.д.с. e_2 ,

• напряжения $u_{0,a}$ на входе сглаживающего фильтра при минимальном $E_{2,MIN}$ и максимальном $E_{2,MAX}$ значениях фазной э.д.с. Отметить уровень $0,7U_0$ и значения углов α_{MIN} и α_{MAX} .

Рекомендации к решению задачи 3

1. Коэффициенты a_n и a_m показывают, насколько изменилось напряжение сети и соответствующее ему напряжение вторичных обмоток трансформатора в режиме холостого хода.

$$a_n = U_{C,MAX} / U_{C,N} = E_{2,MAX} / E_{2,N}$$

$$a_n = U_{C,MIN} / U_{C,N} = E_{2,MIN} / E_{2,N}$$

$$a_c = a_m / a_n$$

Номинальное напряжение вторичных обмоток трансформатора E_2 соответствует значению, указанному в задаче 1. Тогда $E_{2,MIN} = a_n E_2$, $E_{2,MAX} = a_m E_2$.

Величину коэффициентов a_m и a_n взять из табл. 4 данных указаний.

2. При вычислении значений α_{MIN} , α_{MAX} можно воспользоваться формулами регулировочных характеристик либо графиками приложения 2.

При использовании регулировочных характеристик приводить и нормированное, и абсолютное значения выходного напряжения. Можно это отображать на одной оси ординат.

Следует помнить, что при включении ответвляющего диода VD регулировочная характеристика выпрямителя с индуктивным фильтром L_0 соответствует регулировочной характеристике управляемого выпрямителя с чисто активной нагрузкой.

3. Если при вычислении коэффициента пульсации на входе сглаживающего фильтра $k_{П(1)}$ использованы графики приложения 2, то необходимо их привести в контрольной работе. Обосновать, при каком угле включения рассчитан коэффициент пульсаций.

ЗАДАЧА 4

На выходе стабилизатора напряжения необходимо поддерживать постоянное напряжение $U_{H,N} = const$ при изменении напряжения питающей сети и тока нагрузки в заданных пределах.

В источнике вторичного электропитания для стабилизации напряжения на потребителе постоянного тока применена схема трансistorного стабилизатора (ТСН) непрерывного регулирования с исполнительным (регулирующим) элементом (ИЭ), включенным последовательно с нагрузкой.

Номинальное значение выходного напряжения $U_{H,N}$ стабилизатора принять равным U_0 ($U_{H,N} = U_0$).

Номинальное значение тока $I_{H,N} = I_0$ (значения U_0 и I_0 взять из условия задачи 1). Ток нагрузки стабилизатора изменится от значения $I_{H,N}$ до значения $I_{H,MIN} = \gamma I_{H,N}$.

ТСН включен на выход неуправляемого выпрямителя (НВ) с одиночным емкостным фильтром. При $I_H = I_{H,N}$ значение амплитуды пульсации на выходе НВ принять равным $U_{mN}^b = k_{П(1)} U_0$, а внутреннее сопротивление выпрямителя $R_p^b = (\sqrt{2}E_2 - U_0) / I_0$. Величины коэффициента пульсаций и напряжения вторичных обмоток трансформатора E_2 взять из решения задачи 2.

Напряжение питающей сети изменится от значения $U_{C,MIN} = a_n U_{C,N}$ до значения $U_{C,MAX} = a_m U_{C,N}$ ($U_{C,N}$ — номинальное значение напряжения питающей сети).

Основные параметры биполярного $n-p-n$ транзистора ИЭ приведены в табл. 2 данных указаний.

Требуется:

1. Вычертить расчетную схему цепи главного тока для определения электрических и энергетических режимов транзистора ИЭ.

2. На одном листе масштабной бумаги выполнить (соблюдая масштаб) графическое построение, позволяющее определить область рабочих режимов транзистора ИЭ графоаналитическим методом.

3. Из графического построения определить:

- величины, позволяющие по справочным данным выбрать биполярный транзистор;
- в координатах $I_K - \theta - U_{KЭ}$ построить гиперболу мощности $P_{K, макс}^{ИЭ} = I_{K, макс}^{ИЭ} U_{KЭ(П)}^{ИЭ} \leq P_{K, доп}^{ИЭ}$; $I_{K, макс}^{ИЭ} \approx I_{H, N, 2}^{ИЭ}$
- минимальное $I_{Б, мин}^{ИЭ}$ и максимальное $I_{Б, макс}^{ИЭ}$ значения тока базы ИЭ;
- величины, позволяющие выполнить расчет выпрямителя НВ.

Рекомендации к решению задачи 4

1. При решении задачи воспользоваться материалами приложения 3 данных указаний.
2. Вычертив расчетную схему цепи главного тока, необходимо уяснить назначение всех элементов схемы.
3. Используя расчетную схему цепи главного тока, записать основные математические уравнения для последовательно включенных элементов (регулирующего элемента ИЭ и сопротивления нагрузки).

$$U_{ВТ} = U_{H, N} + U_{KЭ, ВТ}.$$

Считать ток, потребляемый схемой управления, малым по сравнению с током нагрузки. В связи с этим им можно пренебречь при расчете цепи главного тока и считать, что $I_{ВТ} = I_{K, ВТ} = I_H$.

4. Рассчитать и построить внешние характеристики управляемого выпрямителя. Для удобства совмещения с выходными характеристиками регулирующего транзистора по оси абсцисс откладывать напряжения, а по оси ординат — токи.

Начинать построение следует с внешней характеристики выпрямителя при минимальном напряжении сети. Выпрямитель обеспечивает напряжение на нагрузке (величина неизменная $U_{H, N} = U_0 = const$) и напряжение на транзисторе ВТ ($U_{KЭ, ВТ}$). Расчет для построения внешней характеристики при минимальном напряжении сети приведен в приложении 3.

Внешние характеристики при номинальном и максимальном напряжениях сети можно построить, используя

коэффициенты a_n и a_m . Наклон внешних характеристик определяется потерями в выпрямителе и не зависит от величины напряжения сети.

5. Для расчета выпрямителя необходимо знать номинальные значения напряжения и тока на выходе выпрямителя. Это позволит выбрать соответствующие диоды и трансформатор.

Задача 5

Для стабилизации напряжения на потребителе постоянного тока применена схема импульсного транзисторного стабилизатора напряжения с исполнительным элементом ИЭ, включенным последовательно с нагрузкой. Транзистор, являющийся исполнительным (регулирующим) элементом, работает в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для сглаживания пульсаций применяется LC-фильтр. Частота переключения $f_{кЛ}$ ИЭ задается принудительно схемой управления.

Напряжение питающей сети изменяется от значения $U_{C, мин} = a_n U_{C, N}$ до значения $U_{C, макс} = a_m U_{C, N}$ ($U_{C, N}$ — номинальное значение напряжения питающей сети). При этом напряжение на входе стабилизатора изменяется в пределах от $U_{ВТ, мин}$ до $U_{ВТ, макс}$ (значения рассчитаны в задаче 4).

Номинальные значения выходного напряжения $U_{H, N}$ и тока $I_{H, N}$ нагрузки и тип транзистора ИЭ остались такими же, как и в задаче 4.

Требуется:

1. Вычертить схему цепи главного тока импульсного транзисторного стабилизатора напряжения.
2. Вычислить:
 - требуемые минимальное и максимальное значения относительной длительности импульса управления γ ;
 - средние значения мощности P_K потерь транзисторного ключа (ИЭ).
3. На одном листе масштабной бумаги вычертить (для $U_{ВТ, мин}$ и $U_{ВТ, макс}$), соблюдая масштаб, кривые мгновенных значений ($0 \leq t \leq 2 \dots 3 T_{кЛ}$):

- напряжения $u_{БЭ}(t)$ база – эмиттер ИЭ;
- напряжения $u_{КЭ}(t)$ коллектор – эмиттер ИЭ;
- напряжения $u'(t) = U_{BI} - u_{КЭ}$ на входе сглаживающего фильтра (отметить уровень среднего значения стабилизируемого напряжения $U_{Н.М}$);
- тока $i_K(t)$ коллектора ИЭ (отметить уровень среднего значения тока на нагрузке $I_{Н.М}$);
- мгновенной мощности $p_K(t)$ потерь на исполнительном транзисторе (отметить уровень P_K).

Рекомендации к решению задачи 5

1. Эффективным способом повышения к.п.д. стабилизаторов является использование дискретного (импульсного) режима работы исполнительного элемента. При этом транзистор находится в одном из устойчивых состояний:

- режим *отсечки* (транзистор закрыт и через него протекает небольшой ток обратносмещенного перехода $I_{КЭ0}$);
- режим *насыщения* (транзистор открыт, его сопротивление минимально $U_{КЭ НАС} - \text{мало}$).

Работой транзистора в этом случае можно управлять двумя основными способами.

Если система управления включает исполнительный элемент при напряжении на нагрузке меньше некоего порога и выключает его при превышении этого порога, то такую схему называют РЕЛЕЙНЫМ ИЛИ ДВУХПОЗИЦИОННЫМ стабилизатором. Частота переключения исполнительного транзистора в релейном стабилизаторе изменяется в зависимости от изменения входного напряжения и тока нагрузки $f_{кл} = \frac{1}{T_{кл}} = \text{var}$ (рис. 3). Сигнал на включение и выключение ИЭ формирует пороговый элемент ПЭ.

Если система управления создает на входе исполнительного элемента ИЭ импульсный сигнал с постоянным периодом повторения ($T_{кл} = \text{const}$) и изменяющейся в зависимости от сигнала ошибки длительностью t_H импульса, то такую схему называют стабилизатором с ШИРОТНО – ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ (рис. 4а).

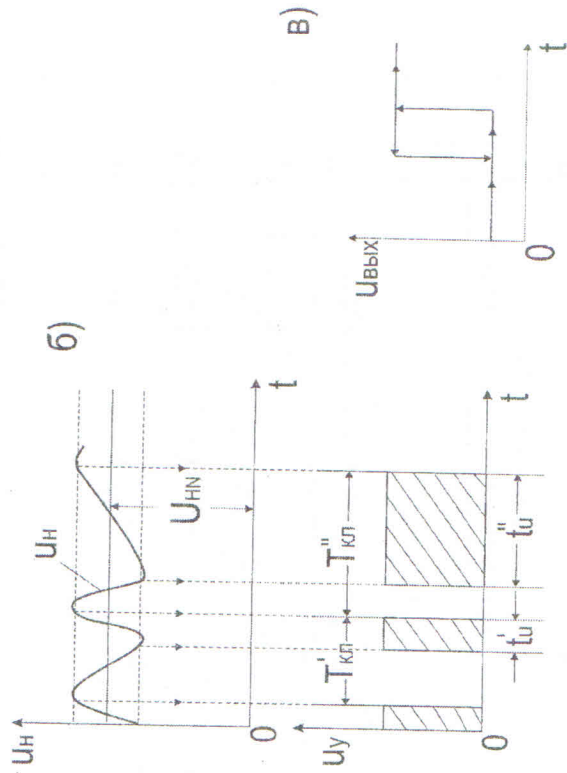
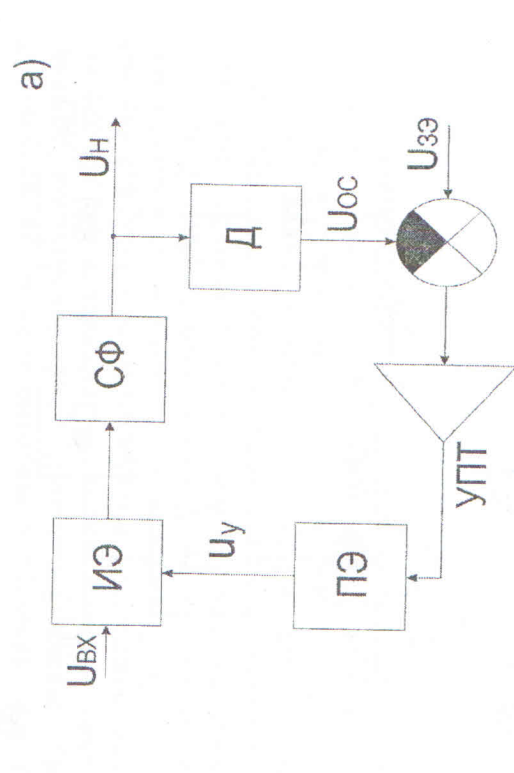


Рис. 3. Структурная схема дискретного стабилизатора

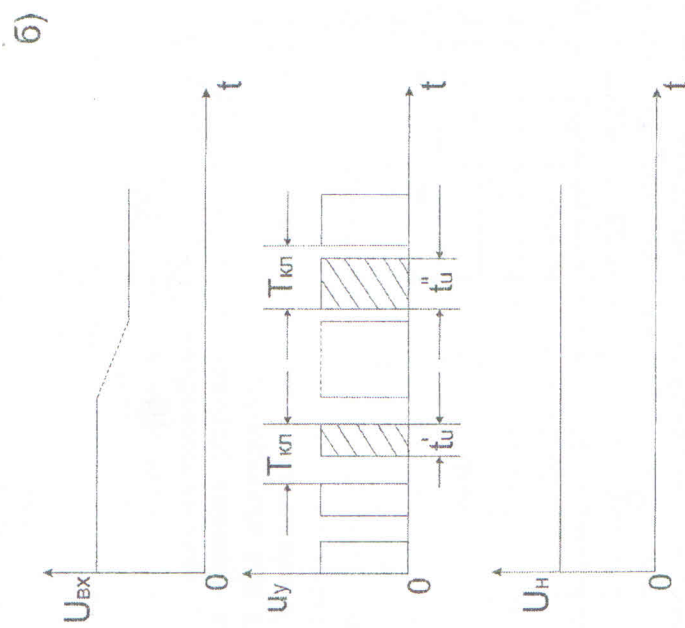
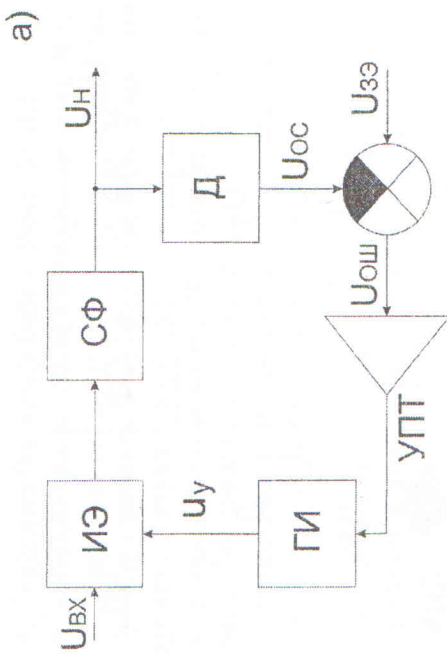


Рис.4. Структурная схема импульсного стабилизатора

В стабилизаторе с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) усиленный сигнал $U_{ш}$ ошибки вызывает изменение режима работы генератора импульсов. На выходе генератора изменяется коэффициент заполнения импульса $K_{з.и} = t_{и} / T_{кл} = var$, или относительная длительность импульса управления $\gamma = K_{з.и}$ (или скважность $S = T_{кл} / t_{и}$).

Транзисторы регулирующего элемента (ИЭ) в импульсных стабилизаторах работают в режиме ключа — класс Д, что увеличивает коэффициент полезного действия источника питания. Линия нагрузки для различных вариантов схемы стабилизатора изображена на рис.5а,5б, графики процессов, протекающих в регулирующем транзисторе, представлены на рис.5в.

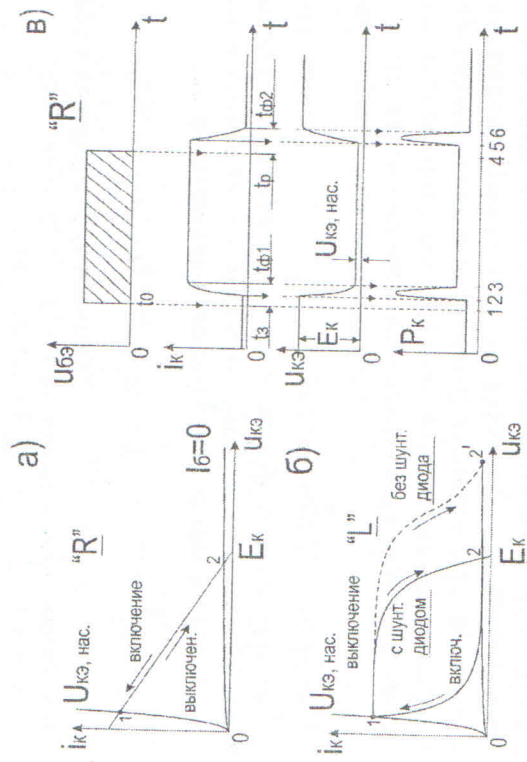


Рис.5. Графики процессов в регулирующем элементе стабилизатора

Регулирование среднего значения напряжения на нагрузке $U_{н.ср}$ обеспечивается за счет изменения соотношения открытого и закрытого состояний транзистора:

$$U_{H,CP} = \frac{1}{T_{кл}} \int_{t_{кл0}}^{t_H} U_{BK} dt = U_{BK} \gamma_u,$$

где $\gamma_u = t_H / T_{кл}$ - относительная длительность сигнала управления $u_{упр}$.

Будем считать, что при $0 \leq t \leq t_H$ сигнал управления $u_{упр}$ присутствует, а при $t_H \leq t \leq T_{кл}$ - отсутствует ($u_{упр} = 0$).

Среднее значение мощности потерь транзистора:

$$P_{пот}^{рз} = \frac{1}{T_{кл}} \int_0^{t_H} u_{КЭ}(v) \cdot i_{К}^{рз}(v) dv.$$

Средняя мощность потерь транзисторного ключа:

$$P_K = P_{K,НАС} + P_{K,ОТС} + P_{K,ПЕР}.$$

Потери мощности в режимах насыщения и отсечки соответственно равны (E_K - напряжение питания):

$$P_{K,НАС} = U_{КЭ,НАС} \cdot I_{К,МАКС}; \quad P_{K,ОТС} = E_K \cdot I_{К,МИН}.$$

При $t_{CP1} = t_{CP2} = t_{CP}$ среднее значение мощности потерь в режиме переключения:

$$P_{K,ПЕР} = \frac{1}{3} E_K \cdot I_{К,МАКС} \cdot T_{CP} = E_K \cdot I_{К,МАКС} \cdot \frac{\tau_B}{T_{кл}},$$

τ_B - постоянная времени транзистора в области высоких частот. Следует помнить, что для уменьшения массы и объема сглаживающего фильтра СФ желательно увеличить частоту $f_{кл} = \frac{1}{T_{кл}}$, но увеличение $f_{кл}$ приводит и к увеличению мощности потерь

На рис.6 приведена схема стабилизатора напряжения дискретного регулирования. Так как на выходе регулирующего (исполнительного) элемента VT1 присутствует напряжение прямоугольной формы, то для преобразования его в напряжение с малым коэффициентом пульсации требуется сглаживающий фильтр. Для обеспечения надежной работы транзистора VT1 включен ответвляющийся (нулевой) диод VDI. 2.

Схему вычертить, воспользовавшись рис.6 и схемой выпрямителя, рассчитанного в задаче 2.

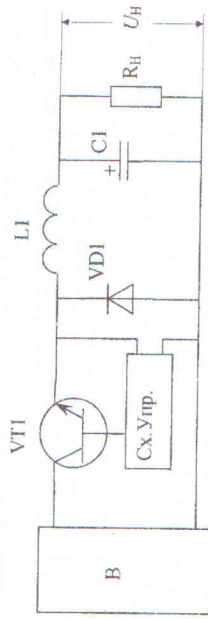


Рис.6. Структурная схема импульсного транзисторного стабилизатора

2. При построении кривых мгновенных значений напряжений, мощности и тока ИЭ можно допустить, что - время t_3 задержки выходного сигнала и время t_p задержки (рассасывания) выключения транзистора ИЭ равны нулю;

- время $t_{\phi 1}$ нарастания выходного сигнала равно длительности $t_{\phi 2}$ фронта спада выходного сигнала и равно $3\tau_B$ (τ_B - постоянная времени транзистора в области высоких частот);

- в интервалах $0 \leq t \leq t_{\phi 1}$ и $(T_{кл} - t_{\phi 2}) \leq t \leq T_{кл}$ $i_{К}(t)$ изменяются по линейному закону;

- пульсациями выпрямителя В1 и нагрузки можно пренебречь.

3. Мощность $P_{K,имп}$, выделяемая на транзисторе в импульсном режиме, определяется суммой мощностей потерь в режиме насыщения $P_{K,нас}$, в режиме отсечки $P_{K,отс}$ и в режиме коммутации.

$$P_{K,имп} = P_{K,нас} + P_{K,отс} + P_{K,ком};$$

$$P_{K,нас} = \gamma U_{КЭ,нас} I_K;$$

$$P_{K,отс} = (1 - \gamma) E_K I_{КБ0};$$

$$P_{K,ком} \approx E_K I_K t_{\phi} / 3T;$$

$$\text{где } \gamma = t_H / T,$$

t_{ϕ} - время нарастания и спада фронта тока, зависящее от инерционности используемого транзистора.

Приложение 1

Принципиальные и эквивалентные схемы выпрямителей

В двухтактных схемах выпрямления (рис. 7) к вентильным обмоткам преобразовательного трансформатора подключены по два диода (один анодом, другой катодом), и поэтому обмотки преобразовательного трансформатора нагружены во время обоих полупериодов переменного тока.

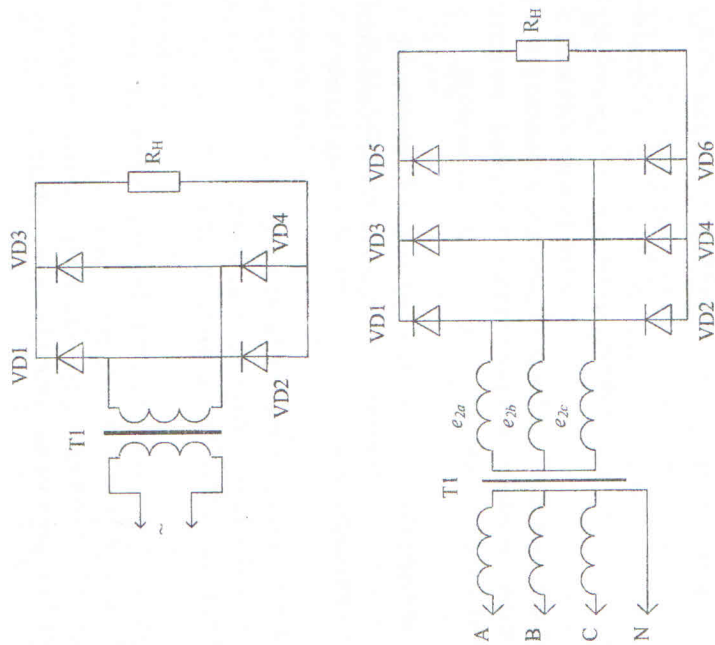


Рис. 7. Принципиальные схемы двухтактных выпрямителей ($p=2$)

В однотактных схемах выпрямления (рис. 8) к каждой вентильной обмотке преобразовательного трансформатора подключен один вентиль, и поэтому она нагружена током только во время одного полупериода переменного тока.

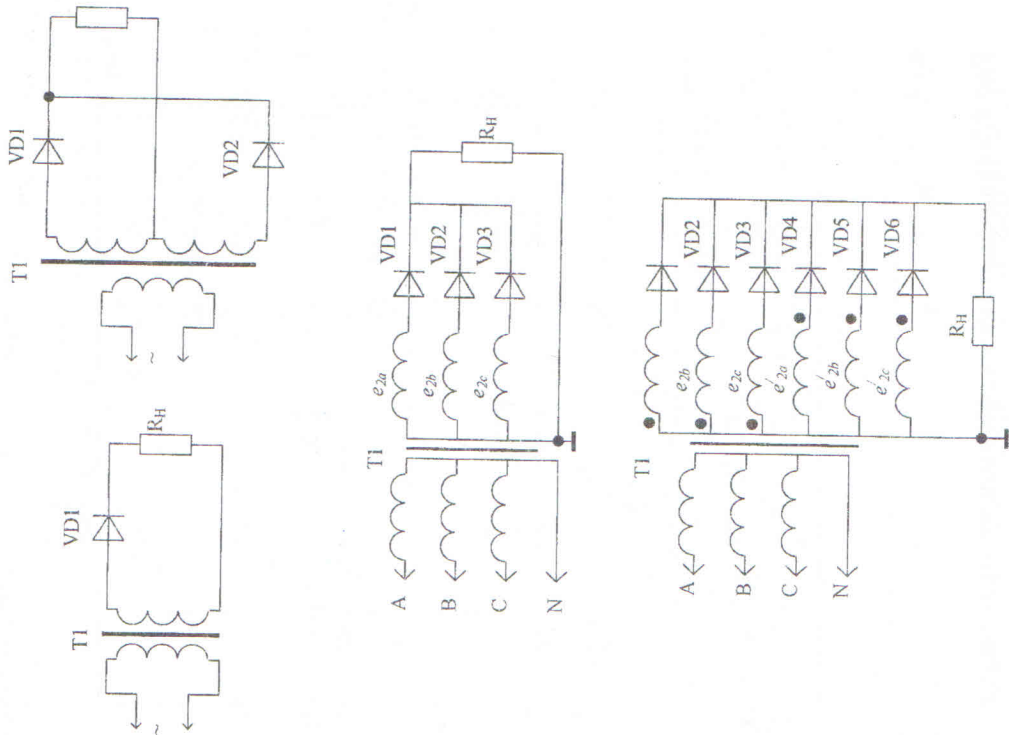


Рис. 8. Принципиальные схемы однотактных выпрямителей ($p=1$)

Графики, поясняющие работу управляемых многофазных выпрямителей, показаны на рис.11 и рис.12. Регулировочными характеристиками (рис.12) следует воспользоваться для расчета максимального и минимального углов включения тиристора.

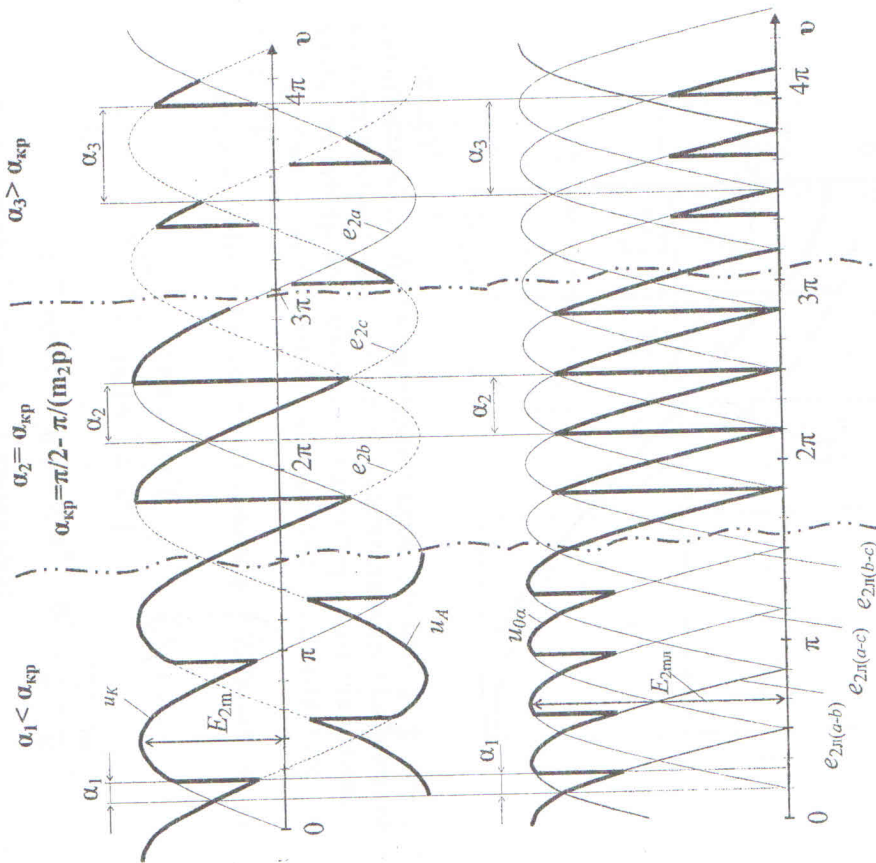


Рис.11. Графики, поясняющие работу управляемой симметричной трехфазной двухтактной схемы выпрямления

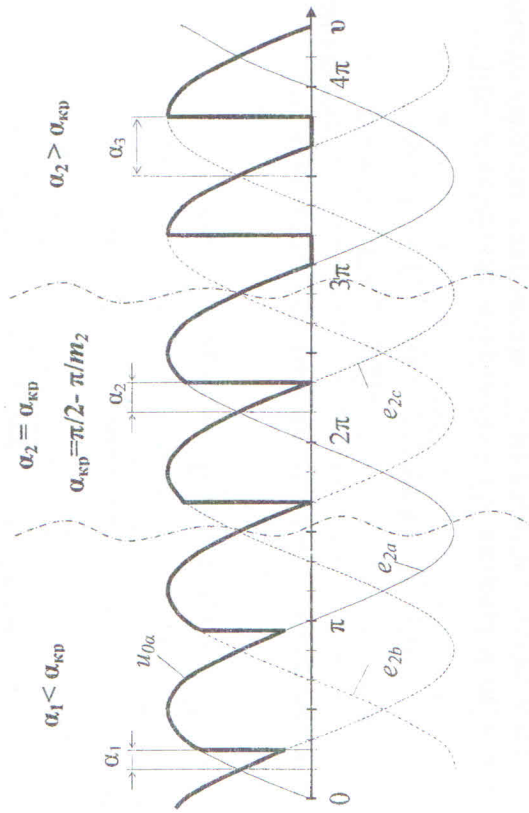
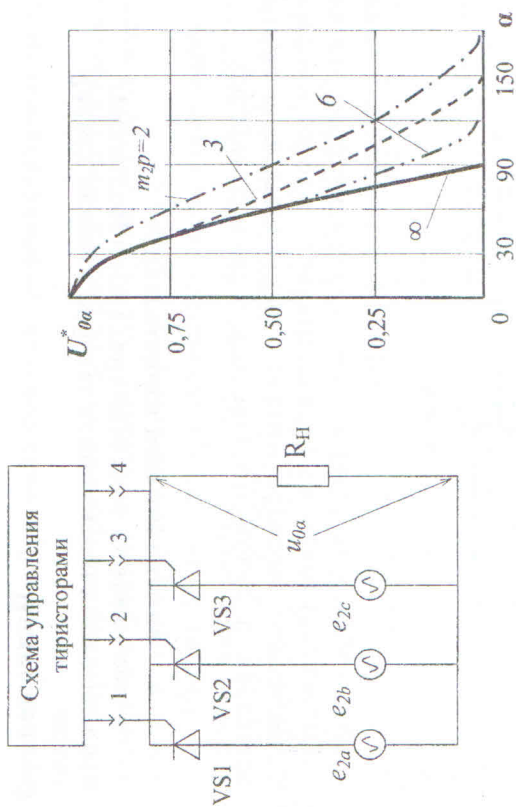


Рис.12. Схема, регулировочные характеристики и осциллограммы, поясняющие работу управляемого выпрямителя

Приложение 3

Расчет режима работы исполнительного элемента транзисторного стабилизатора напряжения непрерывного регулирования

Следует помнить, что энергетические и массогабаритные показатели ТСН, главным образом, определяются режимом работы исполнительного элемента (транзистора), так как исполнительный элемент (ИЭ) регулирует поступление энергии в цепь нагрузки.

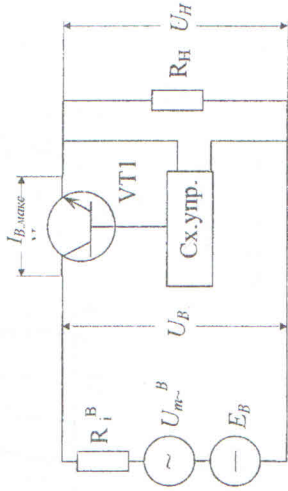


Рис.13. Цепь главного тока ТСН

Для цепи главного тока (схема рис.13) справедливо выражение

$$U_H = E_B - R_i^B \cdot I_B - U_{КЭ},$$

где $I_B \approx I_H$, при $I_{H,N} \geq 1,0A$, $I_{СХ} \approx 0$.

При изменениях напряжения U_C питающей сети или тока I_H нагрузки напряжение U_H на нагрузке поддерживается неизменным за счет изменения напряжения $U_{КЭ}$ коллектор-эмиттер транзистора VT^{ИЭ}.

ИЭ работает в режиме больших сигналов, когда нельзя пренебречь нелинейностью его характеристик. Поэтому

при анализе удобно пользоваться графоаналитическим методом.

Пример построения области работы исполнительного элемента с учётом возможных изменений сетевого напряжения и тока на нагрузке приведен на рис.14.

На рис.14 построены смещенные внешние характеристики выпрямителя (в координатах $U_B - I_B$) и выходные характеристики исполнительного транзистора VT^{ИЭ} (в координатах $U_{КЭ} - I_K$). Координатные оси этих характеристик смещены по оси абсцисс на величину напряжения на нагрузке U_{HN} .

1. Учитывая, что транзистор VT^{ИЭ} должен работать в линейной области своих характеристик, при $U_C = U_{C,MIN}$ и $I_H = I_{H,N}$, минимальное мгновенное значение $u_{КЭ}(t)$ должно быть больше напряжения $U_{КЭ,нас}$ насыщения VT^{ИЭ} (с учетом напряжения пульсаций неуправляемого выпрямителя U_{mN}^B), т.е.

$$U_{КЭ(I)}^{ИЭ} \geq [U_{КЭ,нас}^{ИЭ} + (0,5...1,0)U_B + U_{mN}^B].$$

Тогда $E_{B,MIN} - U_{mN}^B - R_i^B \cdot I_{B,N} \geq [U_{КЭ,нас}^{ИЭ} + (0,5...1,0)U_B]$.

Через рабочую точку (1) в координатах $I_B - U_B$ следует провести линию внешней характеристики выпрямителя НВ цепи главного тока ($U_C = U_{C,MIN}$).

$$E_{B,MIN} = U_{H,N} + U_{КЭ(I)}^{ИЭ} + R_i^B I_{H,N}.$$

По мере увеличения напряжения питающей сети U_C внешние характеристики смещаются вправо. Линия N-N' соответствует номинальному значению напряжения сети $U_{C,N}$. Все внешние характеристики параллельны, т.к. их наклон зависит от внутреннего сопротивления выпрямителя $R_i^B = (\sqrt{2}E_2 - U_0)/I_0$. Напряжения холостого хода выпрямителя $E_{B,N}$ и $E_{B,max}$ следует определить из формул:

$$U_{C,MIN} / U_{C,N} = E_{B,MIN} / E_{B,N} = a_n \leq 1;$$

$$U_{C,MAX} / U_{C,N} = E_{B,MAX} / E_{B,N} = a_n \geq 1.$$

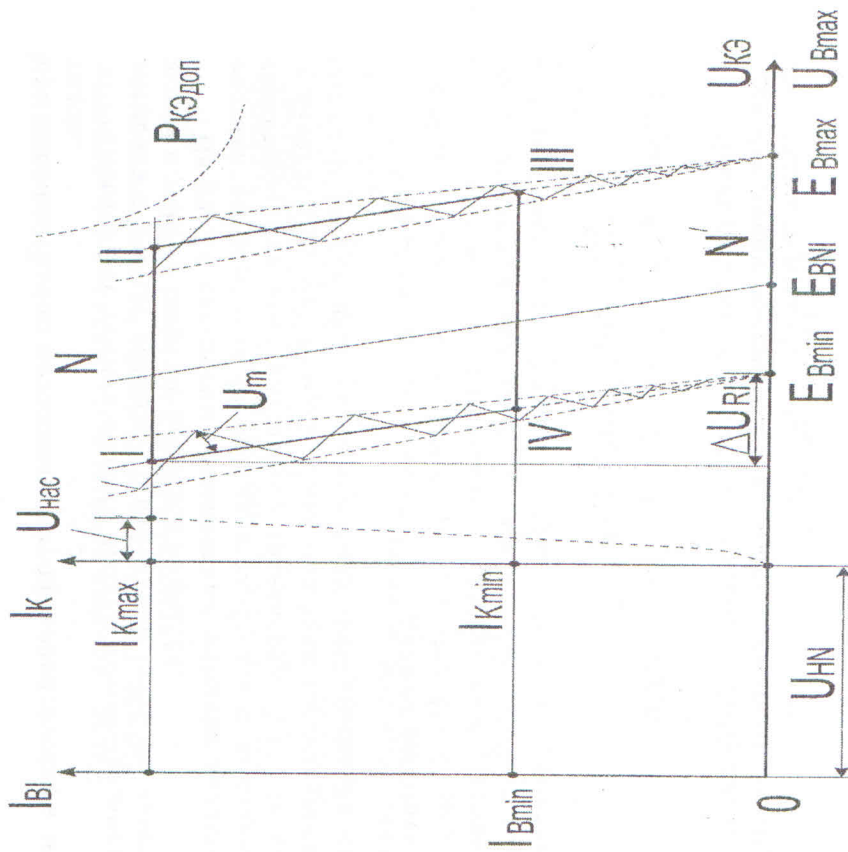


Рис. 14. Область работы исполнительного элемента

Пунктирными линиями показаны область насыщения транзистора $V_{T_{ИЭ}}$ и зависимость напряжения пульсаций $U_{мв}$ выпрямителя НВ от тока $I_{T_{ИЭ}}$.

2. При $U_C = U_{C,MAX}$ и $I_H = I_{H,N}$ мощность рассеяния на $V_{T_{ИЭ}}$ не должна превышать значения максимально допустимой средней рассеиваемой мощности $P_{K,доп}$ (справочные данные):

$$P_{K,макс}^{ИЭ} = I_{K,макс}^{ИЭ} U_{КЭ(II)}^{ИЭ} \leq P_{K,доп}; \quad I_{K,макс}^{ИЭ} \approx I_{H,N}$$

3. При $U_C = U_{C,MAX}$ и $I_H = I_{H,MIN} = \gamma \cdot I_{H,N}$ максимальное напряжение на участке коллектор - эмиттер $V_{T_{ИЭ}}$ не должно превышать максимально допустимого значения $U_{КЭ(III)} \leq U_{КЭ,доп}$.

4. Пределы изменения тока $I_B^{ИЭ}$ транзистора $V_{T_{ИЭ}}$, которые должны обеспечиваться согласующими и усилительными каскадами, находятся по характеристикам транзистора, проходящим через точки I и III. При определении значений $I_{B,MIN}^{ИЭ}$ и $I_{B,MAX}^{ИЭ}$ следует учитывать значения температуры T_A окружающей среды и статического коэффициента $H_{21Э}$ передачи тока $V_{T_{ИЭ}}$ в схеме с общим эмиттером ($H_{21Э} = I_K/I_B$).

Область рабочих режимов I-III-IV указывает все возможные положения рабочей точки на характеристиках транзистора $V_{T_{ИЭ}}$ при изменениях напряжения питающей сети и тока нагрузки в пределах, оговоренных техническими условиями.

$$\Delta E_B = E_{B,MAX} - E_{B,MIN} = (a_m - a_n) E_{B,N};$$

$$U_{КЭ(II)}^{ИЭ} = U_{КЭ(I)}^{ИЭ} + \Delta E_B; \quad U_{КЭ(III)}^{ИЭ} = E_{B,MAX} - U_{H,N} - I_{K,MIN} R_E^B;$$

$$I_{B,MIN}^{ИЭ} = I_{B(III)}^{ИЭ} = (I_{K,MIN} / H_{21Э,MAX}) - I_{КЭ,MAX}^{ИЭ};$$

$$I_{B,MAX}^{ИЭ} = I_{B(I)}^{ИЭ} = (I_{K,MAX} / H_{21Э,MIN}) - I_{КЭ,MAX}^{ИЭ}.$$

Таблица 1
Основные расчётные соотношения для расчёта
неуправляемых выпрямителей

Нагрузка – активное сопротивление, $r_n = 0$, $L_s = 0$, $\eta_a = R_n / R_n + r_n$

Схема выпрямления	Параметры вых. эл. энергии			Параметры диода	
	U_0 / E_{2m}	$K_n(\cdot)$	$f_n(\cdot)$	I_{cp}^{TD} / I_0	$U^{TD} \text{обр. макс}$
$m_1 = m_2 = 1, p = 1$	η_a / π	1,57	f	1	$\pi U_0 / \eta_a$
$m_1 = 1, m_2 = 2, p = 1$	$2\eta_a / \pi$	0,67	$2f$	1/2	$\pi U_0 / \eta_a$
$m_1 = m_2 = 3, p = 1$	$0,83 \eta_a$	0,25	$3f$	1/3	$2,09 U_0 / \eta_a$
$m_1 = 3, m_2 = 6, p = 1$	$0,96 \eta_a$	0,057	$6f$	1/6	$2,09 U_0 / \eta_a$
$m_1 = m_2 = 1, p = 2$	$2\eta_a / \pi$	0,67	$2f$	1/2	$\pi U_0 / 2\eta_a$
$m_1 = m_2 = 3, p = 2$	1,66	0,057	$6f$	1/3	$1,05 U_0 / \eta_a$
$m_1 = m_2 = 3, p = 2$	$0,96 \eta_a$	0,057	$6f$	1/3	$1,05 U_0 / \eta_a$

Схема выпрямления	Параметры преобразовательного трансформатора				
	E_2 / U_0	I_2 / I_0	S_2 / P_0	S_1 / P_0	S_n / P_0
$m_1 = m_2 = 1, p = 1$	$2,22 / \eta_a$	1,57	$3,5 / \eta_a$	$2,7 / \eta_a$	$3,1 / \eta_a$
$m_1 = 1, m_2 = 2, p = 1$	$1,11 / \eta_a$	0,785	$1,7 / \eta_a$	$1,2 / \eta_a$	$1,5 \eta_a$
$m_1 = m_2 = 3, p = 1$	$0,85 / \eta_a$	0,523	$1,5 / \eta_a$	$1,2 / \eta_a$	$1,4 \eta_a$
$m_1 = 3, m_2 = 6, p = 1$	$0,74 / \eta_a$	0,41	$1,8 / \eta_a$	$1,3 / \eta_a$	$1,6 \eta_a$
$m_1 = m_2 = 1, p = 2$	$1,11 / \eta_a$	1,11	$1,23 / \eta_a$		
$m_1 = m_2 = 3, p = 2$	$0,43 / \eta_a$	0,82	$1,05 / \eta_a$		
$m_1 = m_2 = 3, p = 2$	$0,74 / \eta_a$	0,47	$1,05 / \eta_a$		

Таблица 2

Расчётные формулы и значения функций угла отсечки для расчёта неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром

$A(\theta) = \text{tg } \theta - \theta$	0,02	0,03	0,04	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
$B(\theta) = I / (\sqrt{2} \cdot \cos \theta)$	21,5	25,0	28,0	29,2	36,5	40,5	44,4	47,2	48,6
$D(\theta) = I_{\text{оцилс}} / I_{\text{cp}}$	0,76	0,78	0,80	0,81	0,88	0,93	0,97	1,04	1,07
$F(\theta) = I_{\text{оцилс}} / I_{\text{cp}}$	3,14	2,94	2,81	2,72	2,45	2,31	2,21	2,15	2,10
$H(\theta) = C_0 r_n / f k_n(t)$	12,3	10,8	9,56	9,24	7,51	6,69	6,18	5,80	5,50
I_2 / I_0	1900	2800	4100	4550	8700	12400	16000	20000	22500
$K_n(t)$	1400	2100	2800	3500	6100	9500	11500	12400	14500
L_2	1000	1300	1400	1600					

Основные соотношения между физическими величинами и функциями угла отсечки

U_0	$k_n(t)$	$f_n(\cdot)$	k^{TD}
$E_{2m} \cos \theta$	$H(\theta) / C_0 r_n f$	$pm_2 f_c$	$D(\theta)$
U_0	$A(\theta)$	I_2	$U^{\text{TD}} \text{обр. макс}$
$E_2 / B(\theta)$	$r_n \pi / (m_2 p R_n)$	$\sqrt{p} D(\theta) I_{cp}^{\text{TD}}$	$E_{2, \text{min}}$

Таблица 3
Числовые варианты к задачам 1,2

Номер варианта	U_0		I_0		E_2		I_2		f	N	K	$U_{(nop)}$		r_0	
	В	А	В	А	В	А	В	А				В	Ом	Ом	
1	5,0	16,0	4,3	9,3	50	10	7	0,80	0,035						
2	6,0	16,0	2,6	13,2	50	10	10	0,80	0,035						
3	6,3	16,0	7,0	12,6	50	10	8	0,80	0,035						
4	10,0	10,0	7,4	4,1	50	10	10	0,85	0,040						
5	10,0	8,0	11,1	8,9	50	10	8	0,85	0,040						
6	12,0	8,0	5,2	6,5	50	10	10	0,85	0,040						
7	12,6	8,0	14,0	8,9	50	10	10	0,85	0,040						
8	12,6	6,0	9,3	2,5	50	10	10	0,92	0,050						
9	15,0	6,0	12,3	3,5	50	10	11	0,92	0,050						
10	24,0	5,0	26,7	3,9	50	10	10	0,92	0,050						
11	24,0	4,0	26,7	3,1	50	10	10	1,10	0,090						
12	27,0	4,0	20,0	1,6	50	10	13	1,10	0,090						
13	36,0	2,5	30,6	1,5	50	10	21	1,10	0,090						
14	40,0	2,5	44,4	2,0	50	10	16	1,10	0,090						
15	40,0	2,0	17,2	1,6	50	10	13	1,10	0,110						
16	48,0	2,0	20,6	1,6	50	10	17	1,10	0,110						
17	60,0	2,0	66,6	2,2	50	10	10	1,10	0,110						
18	60,0	1,5	44,4	0,6	50	10	17	1,20	0,150						
19	5,0	16,0	5,6	12,6	60	15	8	0,80	0,035						
20	6,0	16,0	6,7	17,8	60	15	8	0,80	0,035						
21	6,3	16,0	5,4	9,3	60	15	11	0,80	0,035						
22	10,0	10,0	8,5	5,8	60	15	11	0,85	0,040						
23	10,0	8,0	4,3	6,5	60	15	13	0,85	0,040						
24	12,0	8,0	13,3	8,9	60	15	16	0,85	0,040						
25	12,6	8,0	9,3	3,3	60	15	13	0,85	0,040						
26	12,6	6,0	14,0	6,7	60	15	10	0,92	0,050						
27	15,0	6,0	16,7	4,7	60	15	16	0,92	0,050						
28	24,0	5,0	20,4	2,9	60	15	21	0,92	0,050						
29	24,0	4,0	17,8	1,6	60	15	17	0,92	0,050						
30	27,0	4,0	11,6	3,3	60	15	13	0,92	0,050						
31	35,0	2,5	40,0	2,0	60	15	16	1,10	0,090						
32	40,0	2,5	29,6	1,0	60	15	17	1,10	0,090						
33	40,0	2,0	44,4	2,2	60	15	31	1,10	0,110						
34	48,0	2,0	35,5	0,8	60	15	17	1,10	0,110						
35	60,0	2,0	25,8	1,6	60	15	17	1,10	0,110						

Продолжение табл. 3

Номер варианта	U_0		I_0		E_2		I_2		f	N	K	$U_{(nop)}$		r_0	
	В	А	В	А	В	А	В	А				В	Ом	Ом	
36	60,0	1,5	51,0	0,9	60	15	21	1,20	0,150						
37	5,0	16,0	5,6	17,8	100	8	31	0,80	0,035						
38	6,0	16,0	4,4	6,6	100	8	13	0,80	0,035						
39	6,3	16,0	4,7	6,6	100	8	13	0,80	0,035						
40	10,0	10,0	4,3	8,2	100	8	10	0,85	0,040						
41	10,0	8,0	7,4	3,3	100	8	17	0,85	0,040						
42	12,0	8,0	10,2	4,7	100	8	21	0,85	0,040						
43	12,6	8,0	5,4	6,5	100	8	13	0,85	0,040						
44	12,6	6,0	10,7	3,5	100	8	21	0,92	0,050						
45	15,0	6,0	11,1	2,5	100	8	17	0,92	0,050						
46	24,0	5,0	17,8	2,1	100	8	17	0,92	0,050						
47	24,0	4,0	20,4	2,3	100	8	21	1,10	0,090						
48	27,0	4,0	30,0	3,1	100	8	31	1,10	0,090						
49	36,0	2,5	26,7	1,0	100	8	10	1,10	0,090						
50	40,0	2,5	44,4	2,0	100	8	10	1,10	0,090						
51	40,0	4,0	17,2	3,2	100	8	17	1,10	0,110						
52	48,0	2,0	53,3	1,6	100	8	39	1,10	0,110						
53	60,0	2,0	51,0	1,2	100	8	26	1,10	0,110						
54	60,0	1,5	66,6	1,7	100	8	31	1,20	0,150						
55	5,0	16,0	3,7	6,6	400	12	13	0,80	0,035						
56	6,0	16,0	5,1	9,3	400	12	26	0,80	0,035						
57	6,3	16,0	7,0	17,8	400	12	39	0,80	0,035						
58	10,0	10,0	11,1	11,1	400	12	31	0,85	0,040						
59	10,0	8,0	8,5	4,3	400	12	21	0,85	0,040						
60	12,0	8,0	13,3	6,3	400	12	16	0,85	0,040						
61	12,6	8,0	10,7	4,7	400	12	21	0,85	0,040						
62	12,6	6,0	14,0	4,7	400	12	10	0,92	0,050						
63	15,0	6,0	16,7	6,7	400	12	8	0,92	0,050						
64	24,0	6,0	26,7	5,6	400	12	8	0,92	0,050						
65	24,0	4,0	10,3	3,3	400	12	10	0,92	0,050						
66	27,0	4,0	23,0	2,3	400	12	26	0,92	0,050						
67	36,0	2,5	40,0	2,8	400	12	39	1,10	0,090						
68	40,0	2,5	17,2	2,0	400	12	17	1,10	0,090						
69	40,0	2,0	29,6	0,8	400	12	17	1,10	0,110						
70	48,0	4,0	20,6	3,3	400	12	13	1,10	0,110						

Продолжение табл. 3

Номер варианта	U_0		I_0	E_2		I_2	f	N	K	$U_{(пор)}$		r_0
	В	А		В	А					В	Ом	
71	60,0	2,0	44,4	0,8	400	12	13	1,10	0,110			
72	60,0	1,5	66,6	1,2	400	12	31	1,20	0,150			
73	5,0	16,0	2,2	13,1	50	15	10	0,80	0,035			
74	6,0	16,0	6,7	12,6	60	12	16	0,80	0,035			
75	6,3	16,0	2,7	13,1	100	10	10	0,80	0,035			
76	10,0	10,0	11,1	7,9	400	8	16	0,85	0,040			
77	10,0	8,0	11,1	6,3	50	15	16	0,85	0,040			
78	12,0	8,0	8,9	3,3	60	12	10	0,85	0,040			
79	12,6	8,0	14,0	6,3	100	10	10	0,85	0,040			
80	12,6	6,0	5,4	4,9	400	6	10	0,92	0,050			
81	15,0	6,0	6,3	4,9	50	15	10	0,92	0,500			
82	24,0	6,0	26,7	6,7	60	12	10	0,92	0,500			
83	24,0	4,0	26,7	4,4	100	10	16	0,92	0,050			
84	27,0	5,0	11,6	4,1	400	8	13	0,92	0,050			
85	36,0	2,5	15,5	2,0	50	8	13	1,10	0,090			
86	40,0	2,5	34,0	1,5	60	10	-21	1,10	0,090			
87	40,0	2,0	44,4	1,6	100	12	31	1,10	0,110			
88	48,0	2,0	41,0	1,2	400	15	21	1,10	0,110			
89	60,0	2,0	66,6	1,6	50	15	31	1,10	0,110			
90	60,0	1,5	25,8	1,2	60	12	13	1,20	0,150			
91	5,0	16,0	3,7	6,6	50	18	10	0,80	0,035			
92	6,0	25,0	2,6	20,4	50	18	10	0,80	0,035			
93	6,3	20,0	5,4	11,7	50	18	11	0,80	0,035			
94	10,0	16,0	11,1	18,6	50	18	8	0,85	0,040			
95	10,0	20,0	4,3	16,3	50	18	10	0,85	0,040			
96	12,0	16,0	5,2	13,1	50	18	10	0,85	0,040			
97	12,6	10,0	9,3	6,6	50	18	10	0,85	0,040			
98	12,6	16,0	14,0	17,8	50	18	10	0,92	0,050			
99	15,0	8,0	12,8	4,7	50	18	11	0,92	0,050			
100	24,0	5,0	10,3	4,1	50	18	13	0,92	0,050			

Таблица 4

Числовые варианты к задачам 3,4,5

Номер варианта	a_m	a_n	γ_i	Параметры ИЭ				
				$U_{КЭ}, В$	$\tau_B, мкс$	$H_{21Э}^{мин}$	$H_{21Э}^{макс}$	$I_{КЭ0}, мА$
1...5	1,05	0,85	0,25	0,6	5,0	15	70	60
6...10	1,10	0,90	0,30	0,6	3,3	15	50	40
11...15	1,10	0,80	0,10	1,0	1,67	15	30	30
16...20	1,10	0,80	0,25	1,0	0,5	15	30	30
21...25	1,10	0,75	0,20	1,0	1,0	20	80	25
26...30	1,10	0,85	0,00	1,3	0,20	15	40	35
31...35	1,05	0,80	0,20	1,2	0,15	20	50	25
36...40	1,10	0,90	0,25	1,5	0,10	20	40	25
41...45	1,10	0,85	0,30	1,5	16,7	25	70	20
46...50	1,05	0,85	0,20	0,8	2,00	25	65	20
51...55	1,10	0,90	0,10	0,8	0,50	25	60	60
58...60	1,15	0,90	0,05	1,2	0,20	25	55	60
61...65	1,10	0,90	0,20	1,2	0,05	30	50	50
66...70	1,05	0,75	0,10	1,0	0,33	30	55	50
71...75	1,10	0,85	0,25	1,0	1,00	30	60	40
76...80	1,05	0,90	0,05	1,0	3,33	30	65	40
81...85	1,05	0,85	0,15	1,3	5,00	15	35	35
86...90	1,10	0,85	0,30	1,3	0,15	15	40	35
91...95	1,10	0,75	0,50	1,3	1,00	20	35	30
96...100	1,20	0,95	0,00	1,5	2,00	20	40	30

ЛИТЕРАТУРА

1. Векслер Г.С., Пилинский В.В. Электропитающие устройства электроакустической и кинотехнической аппаратуры. – К.: Вища школа, 1986. – 383 с.
2. Корчагина Л.Г., Федоров А.П., Яковлева Л.П. Выпрямительные устройства: Методические указания по дисциплине «Электропитающие устройства» для студентов заочного и вечернего отделений специальности 201400. – СПбГУКиТ, 2004
3. Корчагина Л.Г., Фёдоров А.П., Яковлева Л.П. Электропитающие устройства: Методические указания по выполнению лабораторных работ. Часть 1. Выпрямители. – СПбГУКиТ, 2002.
4. Корчагина Л.Г., Фёдоров А.П., Яковлева Л.П. Электропитающие устройства: Методические указания по выполнению лабораторных работ. Часть II. Стабилизаторы. – СПбГУКиТ, 2003.
5. Проектирование источников электронной аппаратуры: Учебное пособие / О.К Березин, В.Г. Костиков, Е.М.Парфенов и др.; под ред. В.А.Шахнова.- 4-е изд. перераб. и доп. – М.: КНОРУС, 2010. – 536с.
6. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуоров А.И. Аналоговая и цифровая электроника. Полный курс. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000. – 768 с.
7. Березин О.К., Костиков В.Г., Шахнов В.А. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. – М.: «Три Л», 2008. – 400 с.

Редактор Н.Н. Капина

Подписано в печать 22.01.13 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 2,57.
Тираж 100 экз. Заказ 34.

Редационно-издательский отдел СПбГУКиТ.
192102. Санкт-Петербург, ул. Бухарестская, 22.

Подразделение оперативной полиграфии СПбГУКиТ.
192102. Санкт-Петербург, ул. Бухарестская, 22.