

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**"МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»  
(МИИТ)**

**СОГЛАСОВАНО**

Выпускающей кафедрой  
«Электрификация и  
электроснабжение»

Зав. кафедрой  
Д.т.н., проф. Бугреев В.А.

**УТВЕРЖДЕНО**

Проректором - директором РОАТ

Д.т.н. проф. Апатцев В.И.

Кафедра «Электрификация и электроснабжение»

Автор: Харченко А.Ф., к.т.н., ст.н.ст.

**Задания и методические указания по выполнению  
контрольной работы дисциплины**

**«Электронная техника и преобразователи в  
электроснабжении»  
для студентов 5 курса**

***Специальность: 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов»***

***Специализация: «Электроснабжение железных дорог»***

***Квалификация выпускника: специалист***

***Форма обучения: заочная***

Одобрено на заседании кафедры  
«Электрификация и электроснабжение»  
Протокол № от 20 г.

Москва 2015

## **Рекомендации по оформлению контрольной работы**

Перед выполнением контрольной работы необходимо рассмотреть задание на контрольную работу и изучить методические указания к выполнению задач. Для более детального изучения теоретического материала следует использовать рекомендованную в методических указаниях литературу.

Номер варианта и соответствующие исходные данные для расчета приводятся в условиях на каждую задачу и выбираются студентами по двум последним цифрам учебного шифра студента.

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие правила:

- контрольная работа оформляется в виде расчетно-пояснительной записки оформленной на компьютере с распечаткой на листах формата А4 с одной стороны в соответствие с общими требованиями к подобным документам (буквенные и графические обозначения должны соответствовать ГОСТам);

- на первом (титальном) листе записки должны быть указаны: название университета и кафедры; название дисциплины, по которой выполняется контрольная работа; фамилия и учебный шифр студента, а также фамилия проверяющего преподавателя;

- условие задачи должно быть полностью перенесено в контрольную работу с численными значениями своего варианта;

- графический материал выполняется на миллиметровой бумаге или с использованием компьютерной графики в формате А4 (210 x 297) и подшивается к расчетно-пояснительной записке в соответствующих местах. Графики должны иметь наименование. Масштабы для графиков выбираются студентами самостоятельно с учетом точности требуемой для расчетов;

- при выполнении расчетов следует привести расчетную формулу, сделать подстановку численных значений и записать результат с указанием размерности. Результаты расчетов достаточно приводить с точностью до трех-четырех значащих цифр, если она не оговаривается особо;

- расшифровку каждого условного обозначения приводить в каждой задаче один раз при его первом использовании;

- необходимые пояснения формировать самостоятельно, по возможности кратко и ясно (не следует переписывать в качестве пояснений тексты из методических указаний или литературных источников);

- в конце работы должны быть указаны: список используемой литературы, дата выполнения работы и подпись студента;

- все исправления и дополнения, выполненные по замечаниям рецензента, размещаются в конце работы.

**Внимание!** Работы, выполненные не по своему варианту, а также диаграммы и зависимости, выполненные без масштаба и наименований, *не проверяются и не зачитываются.*

# ЗАДАЧА 1

## Расчёт однокаскадного ключевого усилителя на транзисторе

1. Составить схему однокаскадного ключевого усилителя на транзисторе типа р-п-р.

Усилитель соединяется с источником входных импульсов посредством резисторов связи ( $R_c$ ) и смещения ( $R_{см}$ ).

2. Заданы: напряжение питания коллекторных цепей  $U_k$ , напряжение источника положительного смещения  $U_{см}$ , величина сопротивления нагрузки каскада  $R_k$ , предельная частота следования импульсов  $f_{пр}$  и наибольшая температура окружающей среды  $T_{MAX}$ .

Требуется выбрать тип транзистора и номинальные величины резисторов  $R_c$  и  $R_{см}$ , обеспечивающих ключевой режим усилителя при потенциалах входа  $\varphi_B$  и  $\varphi_H$ .

Предполагается, что импульс на вход усилителя подается от аналогичных транзисторных схем, причем по модулю нижний  $\varphi_H$  (отрицательный) потенциал входа относительно зажима  $U_k$  составляет  $\varphi_H = \alpha \cdot U_k$ , а верхний  $\varphi_B = -|U_{кэо} + U_{по}|$ , где  $U_{кэо}$  – напряжение коллектор-эмиттер при насыщении выходного транзистора (открытого);  $U_{по}$  – напряжение помехи.

3. Найти значения потенциала входа  $\varphi'_{BX}$  и  $\varphi''_{BX}$ , при которых еще обеспечивается ключевой режим каскада в случае плавного изменения сигнала  $\varphi_{BX} = f(t)$  между  $\varphi_B$  и  $\varphi_H$  (рис. 1).

4. По диаграмме, представленной на рис. 1, и найденным  $\varphi'_{BX}$  и  $\varphi''_{BX}$  построить диаграмму изменения потенциала коллектора  $\varphi_k = f(t)$  транзистора  $V$  в ключевом режиме.

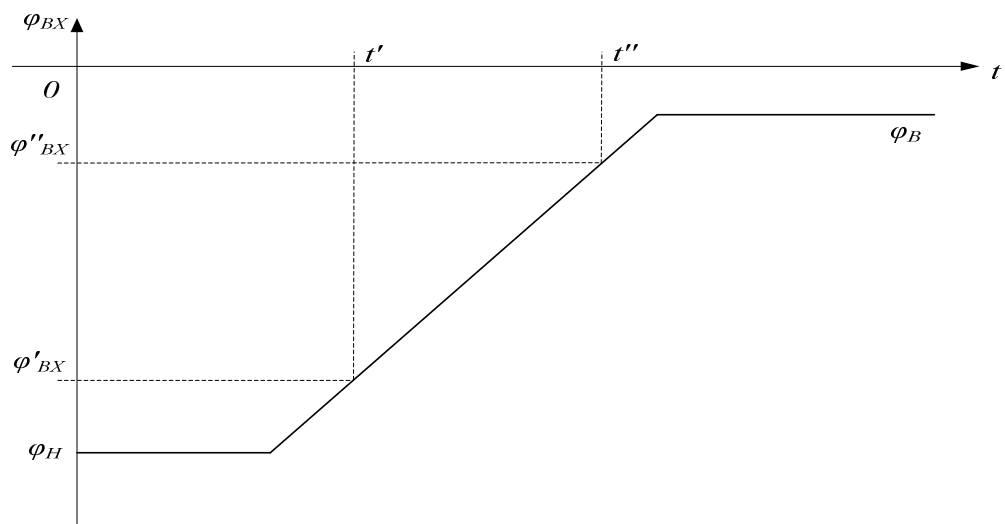


Рис. 1

Исходные данные выбираются из табл. 1 и табл. 2.

Исходные данные		Вариант (предпоследняя цифра учебного шифра)									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Параметры входного сигнала	$U_{по}$ ,	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
	$\alpha$	0,6	0,5	0,4	0,7	0,75	0,8	0,85	0,5	0,6	0,65
$f_{пр}$ , кГц		50	250	120	10	15	30	100	60	150	200
$T_{max}$ , °C		40	40	45	45	50	50	55	55	50	45

Таблица 2

Исходные данные	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{к}$ , В	-6	-8	-10	-12	-16	-20	-24	-30	-36	-40
$U_{см}$ , В	6	8	6	8	8	6	10	10	12	12
$R_{к}$ , Ом	39	120	200	51	91	150	82	160	220	300

## ЗАДАЧА 2

### Расчет неуправляемого выпрямителя с идеальными диодами и трансформатором

Задаются напряжение сети  $U_c$ , средние значения выпрямленного напряжения  $U_d$  и тока  $I_d$  на активной нагрузке, число пульсаций выпрямленного напряжения за период.

1. Составить схему выпрямителя.
2. Рассчитать основные параметры трансформатора при питании активной нагрузки непосредственно от выпрямителя (условия «а»).
3. Рассчитать параметры токов и напряжений на нагрузке, если последовательно с активной нагрузкой включена индуктивность сглаживающего реактора, обеспечивающего заданное отношение  $k_n$  действующего значения основной гармонической составляющей тока  $I_{dn}$  к  $I_d$  (условия «б»).
4. Для обоих вариантов построить временные диаграммы выпрямленного напряжения и тока, ЭДС и тока вторичной (вентильной) обмотки трансформатора, напряжение на одном из вентилях и тока вентиля.

При выполнении расчетов и построении диаграмм трансформатор и вентили считать идеальными, а активным сопротивлением обмотки сглаживающего реактора можно пренебречь.

Исходные данные выбрать из табл. 3 и 4 по соответствующим цифрам учебного шифра.

Таблица 3

Исходные данные	Вариант (предпоследняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Выпрямленное напряжение $U_d$ , В	100	200	300	400	500	600	700	800	1500	3000
Выпрямленный ток $I_d$ , А	1500	1200	1000	800	600	500	400	300	200	100

Таблица 4

Исходные данные	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кратность пульсаций, $p$	2					3			6	
Напряжение сети $U_c$ , В	220	380	3000	6000	10000	220	380	3000	6000	10000
Отношение $k_n = I_{dn} / I_d$	0,1	0,2	0,25	0,3	0,15	0,02	0,025	0,03	0,01	0,015

## Методические указания по содержанию и выполнению задачи 1

Построение принципиальной схемы усилителя необходимо начать с изучения существующих схем и теории работы транзистора в ключевом режиме, изложенных, например, в [1;2]. Пример построения расчетной схемы приведен на рис. 2.

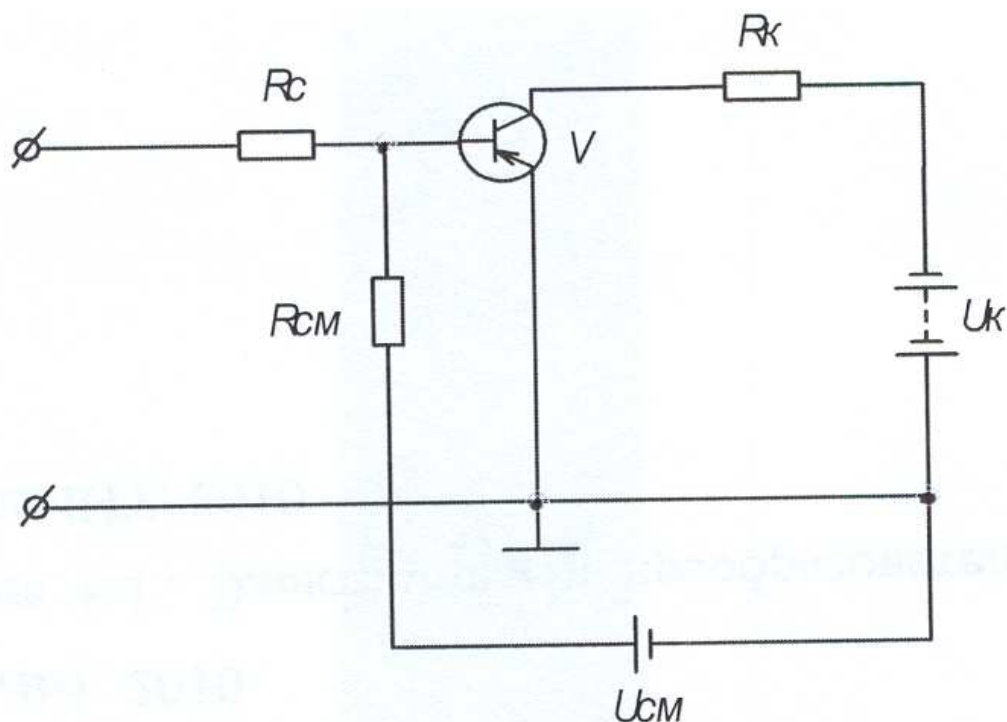


Рис. 2

Выбор типа транзистора осуществляется с использованием исходных данных  $U_k, R_k, f_{пр}, T_{max}$ , приведенных в табл. 1 и 2. Параметры некоторых транзисторов приведены в Приложении 1, более подробная информация о транзисторах дана в справочниках [3,4] и в Интернете.

Величины резисторов связи  $R_c$  и смещения  $R_{см}$  рассчитываются из следующих соображений. В открытом состоянии транзистора  $V$  необходимо обеспечить базовый ток, достаточный для его надежного насыщения, поэтому коэффициент насыщения должен быть 1,5-2. Потенциал входа равен вычисленному значению  $\varphi_H$ , а потенциал на базе  $\varphi_B' = U_{кэ0}$ . Ток базы определяем с учетом минимального коэффициента усиления  $B$ , выбранного типа транзистора, тогда

$$I'_o = (1,5 - 2) \cdot \frac{I_{к\max}}{B}, \quad (1)$$

где  $I_{rmax} = U_k / R_k$ .

Расчетная схема в режиме насыщения (транзистор полностью открыт) примет вид, представленный на рис. 3.

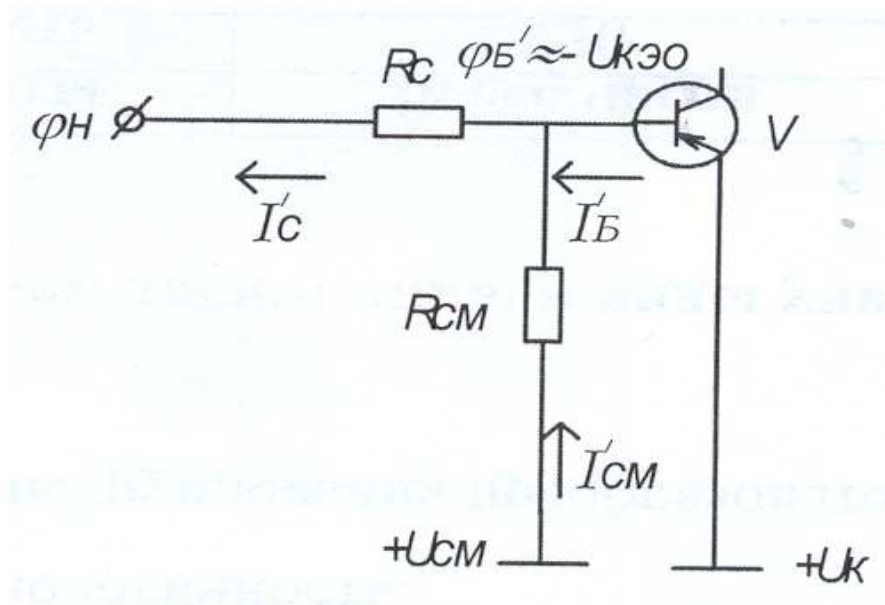


Рис. 3



По этой схеме с использованием первого закона Кирхгофа и закона Ома составляем уравнение, связывающее известные или выбранные значения  $U_{см}$ ,  $\varphi_H$ ,  $\varphi_{б'}$ ,  $I_{б'}$  с искомыми сопротивлениями  $R_c$  и  $R_{см}$ . Получаем уравнение с двумя неизвестными ( $R_c$  и  $R_{см}$ ).

$$I_c' = I_{б'}' + I_{см}' \cdot I_{б'}' + \frac{U_{см} - \varphi_{б'}}{R_{см}} = \frac{\varphi_{б'} - \varphi_H}{R_c}. \quad (2)$$

Для определения  $R_c$  и  $R_{см}$  составляем второе уравнение, когда транзистор находится в закрытом состоянии (режим отсечки). В закрытом состоянии транзистора расчетная схема принимает вид представленный на рис. 4.

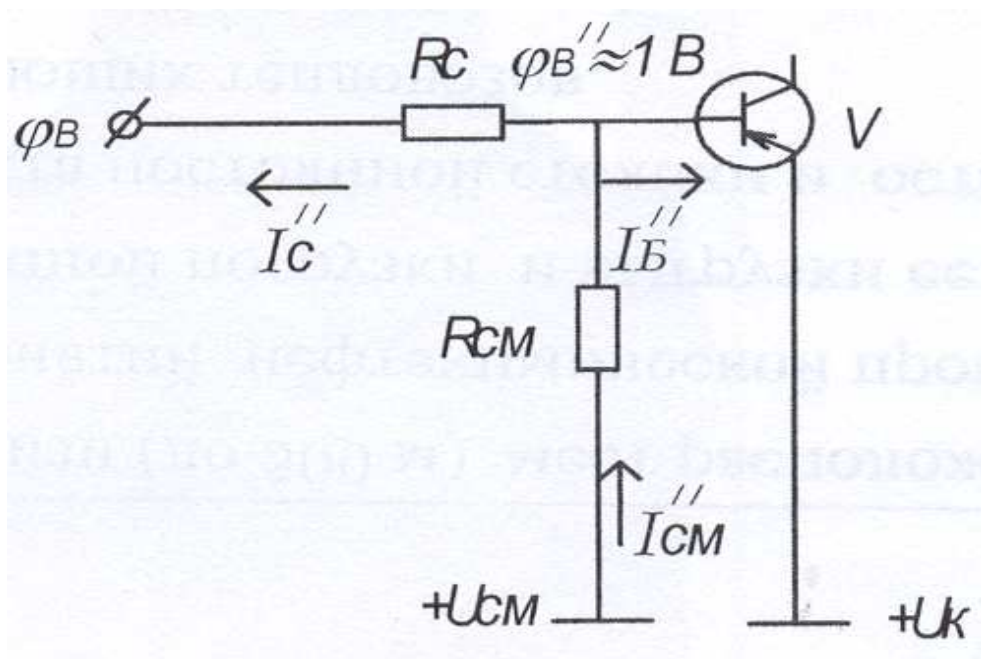


Рис. 4

Потенциал на базе  $\varphi_{б''}$  выбираем на небольшом положительном уровне (0,2-1 В), чтобы обеспечить надежное запираение транзистора. Необходимый в расчетах коллекторный ток в закрытом состоянии при заданной максимальной температуре окружающей среды определяется по следующей формуле

$$I_{котaх} = I_{кo} \cdot \exp[(T_{max} - T_c)\delta], \quad (3)$$

где  $I_{кo}$  - обратный ток коллектора, выбранного транзистора;

$\delta$  - 0,038-0,09 для германиевых и 0,12 для кремниевых транзисторов;

$T_c$  – температура окружающей среды, для которой дано значение  $I_{ко}$  в справочниках (обычно 25°C).

Принимаем, что ток базы в режиме отсечки

$$I_{\bar{o}}'' = I_{ко\max} \cdot$$

По схеме, представленной на рис. 4 составляем аналогичные (2) уравнения, в которых  $R_c$  и  $R_{см}$  неизвестны.

$$I_c'' = I_{см}'' - I_{ко\max} \cdot$$

$$\frac{U_{см} - \varphi_{\bar{o}}''}{R_{см}} = I_{ко\max} + \frac{\varphi_{\bar{o}}'' - \varphi_B}{R_c} \quad (4)$$

Совместное решение уравнений (2) и (4) даст искомые значения сопротивлений резисторов  $R_c$  и  $R_{см}$ . Полученные значения сопротивлений резисторов необходимо округлить до значений, предусмотренных стандартной шкалой номиналов резисторов, и в *последующих расчетах нужно использовать выбранные номиналы*.

### Шкала номинальных значений резисторов

10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	}	× 10 <sup>n</sup> , [Ом],
33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91		

где  $n = 0, 1, 2 \dots$

После выбора номиналов резисторов  $R_c$  и  $R_{см}$  можно приступить к решению п. 3 задания. Для этого надо составить две расчетные схемы наподобие схем представленных на рис. 3 и 4 с известными  $R_c$  и  $R_{см}$ , но неизвестными  $\varphi'_{вх}$  и  $\varphi''_{вх}$ .

Значение  $\varphi'_{вх}$  соответствует моменту, когда транзистор еще находится в режиме насыщения, т.е. его ток базы минимальный для режима насыщения (коэффициент насыщения равен 1, а не 1,5-2 раза больший, как было принято

для надежной работы ключа). Значение  $\varphi_6'$  равно падению напряжения в открытом эмиттерном переходе  $\varphi_6' = U_{кэо}$ . С учетом этих особенностей и составляется уравнение по аналогии с (2), но с одним неизвестным  $\varphi_{вх}'$ .

Значение  $\varphi_{вх}''$  соответствует моменту закрытия транзистора, т.е.  $\varphi_6'' = 0$  и  $I_6'' = 0$ . С учетом этих требований составляется уравнение по аналогии с (4), но с одним неизвестным  $\varphi_{вх}''$ .

Решение новых уравнений с неизвестными  $\varphi_{вх}'$  и  $\varphi_{вх}''$  позволяет вычислить их значения, после чего необходимо построить диаграмму изменения потенциала коллектора  $\varphi_к = f(t)$  транзистора  $V$  в ключевом режиме. На рис. 1 приведен пример диаграммы входного сигнала. Диаграмму напряжения на выходе каскада следует строить под диаграммой входного сигнала в одном масштабе времени, обозначив и указав масштабы напряжений, согласно заданию.

Масштаб по времени выбрать произвольно. При  $t < t'$  транзистор находится в режиме насыщения,  $\varphi_к$  определяется падением напряжения эмиттер-коллектор транзистора ( $U_{кэо}$ ); при  $t' < t < t''$  транзистор работает в усилительном режиме, т.е.  $\varphi_к$  изменяется пропорционально  $\varphi_{вх}$ ; при  $t > t''$  транзистор заперт.

Определяя  $\varphi_к$  в запертом состоянии, можно пренебречь нулевым коллекторным током транзистора, тогда  $\varphi_к = U_к$ .

## **Методические указания по содержанию и выполнению задачи 2**

Схему выпрямителя следует составить после ознакомления с существующими схемами выпрямления однофазного или трехфазного тока, обеспечивающих заданную кратность пульсаций  $p$  [5;6].

Затем выполнить расчет основных параметров трансформатора, в предположении, что нагрузка чисто активная (условие «а»). Расчет действующих значений токов  $I_2$  и ЭДС  $E_2$  во вторичной обмотке

трансформатора, действующие значения тока  $I_1$  в сетевой обмотке трансформатора, амплитуду обратного напряжения  $U_{bm}$  (напряжения на закрытом диоде), а также типовую мощность трансформатора проводить с использованием «Основных соотношений в выпрямителях» приведенных в Приложении 2.

Коэффициент трансформации можно определить как отношение  $U_c/E_2$ .

Амплитудные значения тока и напряжения для однофазных схем выпрямления превышают действующие значения на величину  $\sqrt{2}$ ; а для трехфазных схем -  $\sqrt{6}$ . Сопротивление активной нагрузки определяется по закону Ома:  $R_d = U_d/I_d$ .

При активной нагрузке форма тока повторяет форму напряжения. Временные диаграммы выпрямителя работающего на активную нагрузку должны отражать изменения:  $u_2, u_d, i_d, i_{a1}, i_{1,2}$ , в течение 1,5 периода промышленной частоты. Где  $i_{a1}, i_{1,2}$  - соответственно, текущее значение тока через один из диодов и текущие значения токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора. На диаграммах  $u_d=f(\omega t)$  и  $i_d=f(\omega t)$  нанести горизонтальные линии, соответствующие  $I_d, U_d$ . Типичные временные диаграммы напряжений и токов для различных схем выпрямления приведены в [5;6].

Расчет параметров токов и напряжения на нагрузке, если последовательно с активной нагрузкой включена индуктивность сглаживающего реактора (условие «б»), следует начать с определения величины индуктивности реактора необходимой для сглаживания тока до заданной степени.

Для определения величины индуктивности реактора нужно вывести соотношение между действующим значением переменной составляющей тока нагрузки и индуктивностью реактора.

Эту задачу можно решить, применив разложение кривой выпрямленного напряжения в ряд Фурье [7]. В данной задаче нет смысла учитывать гармоники высших порядков, и следует ограничиться влиянием только первой (основной) гармоникой, так как амплитуда второй гармонической составляющей тока

почти в 10 раз меньше амплитуды первой (основной) гармоники выпрямленного тока, что обеспечит точность расчетов в пределах 2-3%.

Для определения величины индуктивности  $L$ , необходимой для обеспечения заданной значения  $\kappa_n$ , необходимо опередить подводимые к нагрузке пульсирующие напряжение и ток.

Амплитуду напряжения гармонических составляющих  $n$  можно определить по формуле

$$U_{dm(n)} = 2U_d / (n^2 - 1), \quad (5)$$

а амплитуду тока соответствующей ( $n$ ) гармонической составляющей по формуле

$$I_{dm(n)} = U_{dm(n)} / (R_n + jX_{(n)}) = U_{dm(n)} / (R_n + jn\omega L) = 2U_d / (n^2 - 1)(R_n + jn\omega L). \quad (6)$$

$$\text{По условиям задачи } I_{dm(n)} = \kappa_n \cdot I_d \sqrt{2}. \quad (7)$$

Тогда величина индуктивности реактора  $L$  определяется из выражения

$$\kappa_n \cdot I_d \sqrt{2} = 2U_d / (n^2 - 1)(R_n + jn\omega L). \quad (8)$$

Если индуктивное сопротивление  $X_{(n)} > 5 R_n$ , то индуктивности  $L$  можно в этом случае вычислить по выражению

$$\kappa_n \cdot I_d \sqrt{2} = 2U_d / [(n^2 - 1)(n\omega L)]. \quad (9)$$

Фазовый угол основной гармоники тока можно определить из выражения

$$\varphi = \arctg (X_{(n)} / R_n). \quad (10)$$

При построении диаграмм для условия «б» следует в одних осях с  $u_d$  построить синусоиду основной гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения. Диаграмму  $i_d = f(\omega t)$  построить с учетом фазового угла основной гармоники выпрямленного тока.

Диаграммы токов диода и обмотки трансформатора являются выкопировки из кривой  $i_d = f(\omega t)$  с учетом длительности и направления протекания  $i_d$  по ним.

Все диаграммы должны строиться с соблюдением выбранных масштабов угла, напряжения и тока. Масштабы напряжения (тока) всех диаграмм,

иллюстрирующих работу вторичной обмотки трансформатора и цепей выпрямителя должны быть одинаковыми.

Решение условия «б» можно также решить с помощью дифференциального уравнения, описывающего схему рис. 5.

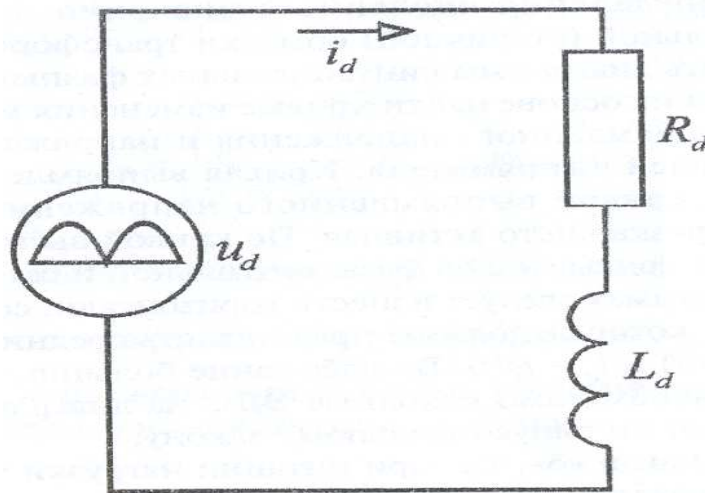


Рис. 5

### Рекомендуемая литература

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. -М.: Высшая школа, 1982.
2. Засорин С.Н. и др. Электронная и преобразовательная техника. –М.: Транспорт, 1981
3. Полупроводниковые приборы. Транзисторы малой мощности: Справочник: под ред. Гололодова А.В..-М.: Радио и связь. КУБК-а,1994.
4. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности: Справочник: под ред. Гололодова А.В..-М.: Радио и связь. КУБК-а,1994.
5. Харченко А.Ф. Неуправляемые силовые полупроводниковые выпрямители: Уч. пос. - М.: МИИТ,2009.
6. Попков О.З. Основы преобразовательной техники: Уч. пос. –М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М. : Высшая школа, 1978.

## Приложение 1

### Основные соотношения в выпрямителях работающих на активную нагрузку

Схема выпрямления	$U_2/U_d$	$I_2/I_d$	$k_T I_1 / I_d$	$U_{bm}/U_d$	$P_d/S_T$	$I_a/I_d$	$U_{dac}/U_d$
Однофазная двухпульсовая нулевым выводом	1,11	0,709	1,0	3,14	0,75	0,5	0,47 $f=100$ Гц
Однофазная двухпульсовая мостовая	1,11	1,11	1,11	1,57	0,9	0,5	0,47 $f=100$ Гц
Трехфазная нулевым выводом (трехпульсовая)	0,855	0,583	0,476	2,09	0,74	0,33	0,18 $f=150$ Гц
Шестифазная нулевым выводом	0,74	0,41	0,476	2,09	0,645	0,167	0,04 $f=300$ Гц
Трехфазная мостовая (шестипульсовая)	0,427	0,817	0,817	1,05	0,95	0,33	0,04 $f=300$ Гц
Шестифазная уравнительным реактором	0,855	0,291	0,408	2,09	0,79	0,166	0,04 $f=300$ Гц

Принятые обозначения:

$U_2$  - действующее значение фазного напряжения вторичной (вентильной) обмотки трансформатора;

$U_d$  – среднее значение выпрямленного напряжения;

$U_{dac}$  - действующее значение переменной составляющей выпрямленного напряжения;

$U_{bm}$  – максимальное значение обратного напряжения на вентиле;

$I_d$  – среднее значение выпрямленного тока в нагрузке;

$I_a$  - среднее значение выпрямленного тока, протекающего через один вентиль или через одно плечо выпрямительной схемы;