

11/1/1

Одобрено кафедрой
«Электрификация
и электроснабжение»

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ

Задание на контрольную работу № 2
с методическими указаниями
для студентов IV курса
специальности

190401.65 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭЛ)

РОАТ

Москва – 2011

Задание на контрольную работу содержит две типовые задачи и методические указания по их решению.

Постановка задач заимствована из ранее выполнявшихся работ по данной дисциплине.

С о с т а в и т е л ь — канд. техн. наук, доц. А.Ф. Харченко

Р е ц е н з е н т — канд. техн. наук, проф. Р.В. Шиловская

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

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 по двум последним цифрам учебного шифра студента.

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие правила:

- контрольная работа оформляется в виде расчетно-пояснительной записки в соответствии с общими требованиями к подобным документам (буквенные и графические обозначения должны соответствовать ГОСТам);

- на первом листе записки должны быть указаны название университета и кафедры; номер контрольной работы и название дисциплины; фамилия и учебный шифр студента, а также фамилия проверяющего преподавателя;

- графический материал выполняется на миллиметровой бумаге или с использованием компьютерной графики в формате A4 (210×297) 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-четырёх 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).

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

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ №2

Задача 2.1

Расчет (с учетом реактивного сопротивления трансформатора) выпрямителя на неуправляемых вентилях, работающих на против-ЭДС при бесконечной индуктивности сглаживающего реактора

Неуправляемый трехфазный мостовой выпрямитель питается от трехфазной электрической системы с заданным действующим значением номинального междуфазного напряжения U_c и заданными пределами колебания этого напряжения в % от U_c . Заданы средние значения выпрямленного напряжения $U_{дн}$ и тока $I_{дн}$ в номинальном режиме.

Значения коммутационных (повторяющихся) перенапряжений заданы величиной отношения их к максимальному обратному напряжению выпрямителя. Значения амплитуды неповторяющихся перенапряжений заданы отношением их к среднему значению выпрямленного напряжения в номинальном режиме. Напряжение короткого замыкания трансформатора u_k задано в %.

Требуется:

1. Рассчитать проектные параметры трансформатора и выбрать его мощность из стандартной шкалы мощностей трансформаторов, выпускаемых промышленностью.
2. Определить величину угла коммутации γ при номинальной нагрузке.
3. Построить временные диаграммы фазных напряжений сетевой и вентильных обмоток трансформатора, токов в этих обмотках, выпрямленного тока и напряжения, а также напряжения на вентилях в течение одного периода переменного напряжения промышленной частоты.
4. Подобрать комплект вентилях с воздушным охлаждением, обеспечивающий номинальный режим и устойчивость к перенапряжениям заданной величины и ударному току короткого замыкания выпрямителя. Определить количество вентилях не-

обходимых для нормальной работы выпрямителя. Нарисовать схему соединения вентилях одной фазы выпрямителя.

Вариант исходных данных выбирается в зависимости от учебного шифра по табл. 1 и 2.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица 1

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальное выпрямленное напряжение $U_{дн}$, В	250		825		1650		3300		6600	
Номинальный выпрямленный ток $I_{дн}$, А	500	900	2500	1500	2000	1200	3300	1600	1000	1500
Отношение величины коммутационных перенапряжений к максимальному обратному	1,65	1,6	1,55	1,5	1,45	1,4	1,35	1,3	1,4	1,2
Колебание напряжения сети % от U_c	± 9	± 10	± 8	± 7	± 10	± 9	± 8	± 7	± 5	± 6

Таблица 2

Показатели	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальное напряжение сети U_c , кВ	6		10		25		35		110	
Напряжение короткого замыкания трансформатора u_k , %	5,0	6,0	6,5	5,5	7,5	7,0	9	8	10	11
Отношение амплитуды неповторяющихся перенапряжений к $U_{дн}$	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5

ЗАДАЧА 2.2

Расчет характеристик выпрямительно-инверторного преобразователя с учетом реактивного сопротивления трансформатора и при бесконечной индуктивности сглаживающего реактора

Вентильная обмотка преобразовательного трансформатора в выпрямительном режиме развивает ЭДС $E_{2в}$, а в инверторном включаются дополнительные секции обмотки, и развивается ЭДС $E_{2и}$. Напряжение короткого замыкания трансформатора можно считать одинаковым для обоих режимов и равным $u_k, \%$. Задан номинальный ток в выпрямительном режиме $I_{днв}$. Задан угол регулирования преобразователя в выпрямительном режиме α .

Требуется:

1. Составить схему преобразователя, показав на ней переключатели, необходимые для перехода из выпрямительного режима в инверторный и обратно. Обозначить положения переключателей: «выпр» и «инв». На схеме также должна быть приведена структурная схема системы управления тиристорами.

2. Рассчитать и построить внешнюю характеристику преобразователя в выпрямительном режиме без применения регулирования ($\alpha = 0$) и при заданном угле регулирования ($\alpha \neq 0$).

3. Построить искусственную горизонтальную внешнюю характеристику инвертора на уровне напряжения холостого хода выпрямительного режима.

4. Построить ограничительную характеристику инвертора. Определить предельно допустимый ток инвертора при внешней искусственной характеристике, построенной по п. 3.

5. Найти угол опережения инвертора β , угол коммутации γ и угол запаса δ при номинальном токе в режиме инвертирования $I_{ни}$ и напряжении равном напряжению искусственной характеристики.

6. Построить входную (внешнюю) характеристику инвертора при вычисленном в п. 5 угле опережения β .

7. Вычислить коэффициент мощности преобразователя в выпрямительном и инверторном режимах.

8. Построить диаграммы подачи управляющих импульсов, протекания тока в вентилях и напряжения на шинах постоянного тока для двух режимов преобразователя: выпрямительного с заданным углом регулирования α и номинальным током $I_{днв}$ и инверторного с током $I_{дни}$.

Вариант исходных данных выбирается в зависимости от учебного шифра по табл. 3 и 4.

Таблица 3

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Схема преобразователя	Двухпульсовая с нулевым выводом					Двухпульсовая мостовая				
Действующее значение ЭДС вентильной обмотки в выпрямительном режиме $E_{2в}$, В	500	900	1500	2000	2500	1000	1200	1500	2000	2500
Напряжение короткого замыкания трансформатора u_k , %	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
Угол регулирования α , эл. град.	8		12		16		20		25	

Таблица 4

Показатели	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Отношение $E_{2и}/E_{2в}$	1,05		1,1		1,15		1,1		1,15	
Номинальный выпрямленный ток $I_{днв}$, А	700	1000	1500	2000	2500	1500	2000	2500	3000	3200

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №2

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 2.1

Решение данной задачи требует усвоения особенностей работы трехфазного мостового выпрямителя, работающего при бесконечной индуктивности сглаживающего реактора и с учетом реактивного сопротивления трансформатора. Поэтому прежде чем приступить к ее решению, необходимо освоить теоретический материал, изложенный в [1; 2] и вычертить схему выпрямителя.

Расчет следует начать с определения напряжения холостого хода выпрямителя. Для этого следует воспользоваться уравнением внешней (нагрузочной) характеристики трехфазного мостового выпрямителя. В относительных единицах уравнение внешней характеристики для трехфазного мостового выпрямителя, выполненного на неуправляемых вентилях, имеет вид

$$U_d/U_{do} = \cos \alpha - A \cdot \frac{u_k}{100} \cdot \frac{I_d}{I_{dн}} = 1 - 0,5u_k I_d / (100I_{dн}), \quad (1)$$

где U_d , U_{do} — соответственно напряжение на выходе выпрямителя при токе I_d и при холостом ходе;

u_k — напряжение короткого замыкания на зажимах первичной обмотки выпрямительного трансформатора при номинальном токе в его вторичной обмотке.

Следовательно, напряжение холостого хода при заданных номинальных значениях выпрямленного напряжения $U_{dн}$ и номинальному току $I_{dн}$ вычисляется по формуле

$$U_{do} = U_{dн} / (1 - 0,005u_k). \quad (2)$$

После определения напряжения холостого хода U_{do} определяются основные расчетные величины, характеризующие выпрямитель:

E_2, I_2 — действующие значения ЭДС и тока фазы вентильной (вторичной) обмотки;

U_1, I_1 — действующие значения напряжения и тока фазы сетевой (первичной) обмотки трансформатора;

k_T — коэффициент трансформации трансформатора (U_1/E_2);

S_T — типовая (расчетная) мощность трансформатора;

I_a — среднее значение выпрямленного тока в плече выпрямительной схемы (тока через вентиль);

U_{bm} — амплитуда обратного напряжения на вентиле.

Значения этих величин вычисляются с использованием соотношений для данного вида выпрямителя приведенных в прил. 1. Расчеты производятся для номинального напряжения сети.

По вычисленной типовой мощности трансформатора производится выбор мощности трансформатора из следующей стандартной шкалы мощностей трансформаторов: (100; 160; 250; 400; 630; 800) · 10ⁿ кВА, где $n = 0; 1; 2; \dots$

Длительность этапа коммутации измеряется углом коммутации γ . Угол коммутации вычисляется по формуле

$$\gamma = \arccos [1 - 2I_a X_2 / (E_2 \sqrt{6})], \quad (3)$$

где X_2 — индуктивное сопротивление рассеяния фазы трансформатора, отнесенное к вентильной обмотке.

Индуктивное сопротивление X_2 можно найти через процентную величину напряжения короткого замыкания трансформатора по формуле

$$X_2 = U_{1н} \cdot u_k / (I_{1н} \cdot k_T^2 \cdot 100) = E_2 \cdot u_k / (I_{дн} \cdot 100). \quad (4)$$

Временные диаграммы строятся с использованием полученных расчетных величин. Масштабы выбираются так, чтобы амплитудные значения ЭДС, напряжений и токов были не менее 40 мм, а масштаб по оси абсцисс должен составлять не менее 30° на 1 см.

При построении обратного напряжения необходимо учитывать, что оно прикладывается к вентилю скачком. Значение начального скачка обратного напряжения равно

$$U_{bo} = U_{bm} \sin \gamma. \quad (5)$$

Типичное построение временных диаграмм напряжений и токов приведено в [2, рис. 3.15].

Подбор вентиля с учетом массогабаритных и стоимостных показателей в данной работе не представляется возможным, поэтому подбор комплекта вентиля состоит в определении **минимального** количества вентиля, обеспечивающих нормальное функционирование выпрямителя. Критерий минимальности определяется положением: чем меньше элементов в устройстве, тем выше вероятность безотказной работы.

Параметры некоторых вентилях (силовых полупроводниковых диодов), выпускаемых промышленностью России, приведены в прил. 2.

В обозначениях типов диодов нелавинные диоды обозначаются буквой «Д», а лавинные диоды буквами «ДЛ». Далее следуют три цифры, обозначающие конструктивные особенности и модификации диодов и при выборе комплекта диодов в данной работе их особенности не учитываются. Затем через тире следует число, обозначающее максимально допустимый средний прямой (предельный) ток ($I_{п}$) и снова через тире указывается класс вентиля и т.д. (подробнее см. в [2]). Напомним, что класс прибора «К» означает число сотен вольт повторяющегося напряжения.

В пояснительной записке необходимо указать тип выбранного диода, его предельный ток $I_{п}$, класс прибора и величину ударного тока ($I_{уд}$). Например: Д133 – 500 – 10; $I_{уд} = 9,0$ кА, т.е. нелавинный диод на предельный ток до 500 А, обратное напряжение до 1000 В, ударный неповторяющийся прямой ток до 9,0 кА.

Если невозможно найти диод, предельный ток которого достаточен для пропускания соответствующей доли (I_a) заданного в схеме номинального тока (тока в плече выпрямителя), то, как лавинные, так и нелавинные диоды следует включать параллельно.

Количество параллельных ветвей диодов в плече преобразователя можно определить по формуле

$$n_{\text{пар}} = I_a \cdot K_{\text{пер}} / (I_{\text{п}} \cdot K_{\text{н}} \cdot K_{\text{в}}), \quad (6)$$

где $I_{\text{п}}$ — предельно допустимый ток диода выбранного типа с учетом принятой системы охлаждения;

$K_{\text{пер}}$ — коэффициент возможной перегрузки, принять равным 1;

$K_{\text{н}}$ — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения тока между параллельными ветвями, принять равным 0,9;

$K_{\text{в}}$ — коэффициент, учитывающий уменьшение скорости потока воздуха против указанного в паспорте диода, принять равным 0,9.

Полученное значение $n_{\text{пар}}$ округляется до большего ближайшего целого числа.

После выбора количества ветвей диодов необходимо проверить их на динамическую устойчивость. Амплитуда тока короткого замыкания (ударный ток) не должна превышать допустимого ударного тока для параллельно включенных диодов.

Ударный ток в плече выпрямителя ($I_{\text{удп}}$), созданном одной или несколькими параллельными ветвями диодов, рассчитывается в данной задаче без учета спада аperiodической составляющей. То есть, он равен двойной амплитуде периодической составляющей тока глухого короткого замыкания выпрямителя при наиболее неблагоприятном изменении напряжения питающей сети

$$I_{\text{удп}} = \dot{E}_2 \sqrt{6} / (2 X_2), \quad (7)$$

где \dot{E}_2 — значение ЭДС фазы вентильной (вторичной) обмотки, увеличенное с учетом процента колебания напряжения сети.

Если вычисленный ударный ток $I_{\text{удп}}$ превышает сумму ударных токов $I_{\text{уд}}$ параллельно включенных диодов, то количество параллельных ветвей корректируется для выполнения условия

$$n_{\text{пар}} \cdot I_{\text{уд}} \geq I_{\text{удп}}. \quad (8)$$

При выборе диодов необходимо учитывать, что для нелавинных диодов допустимое рабочее напряжение $U_p = 80$ К, допустимое повторяющееся импульсное обратное напряжение $U_n = 100$ К, а допустимое неповторяющееся импульсное обратное напряжение $U_{нп} = 116$ К.

При выборе нелавинных вентилях количество их в последовательной цепочке должно быть таким, чтобы при заданных: рабочем напряжении (с учетом неблагоприятного отклонения питающего напряжения), коммутационных и неповторяющихся перенапряжений не превышало бы соответствующие паспортные значения. Число последовательно соединенных вентилях можно определить по формуле

$$n_{\text{посл}} \geq [U_{\text{пл.м}} / (U_n K_n)] + 1, \quad (9)$$

где $U_{\text{пл.м}}$ — максимальное мгновенное значение напряжения действующего на вентиляльное плечо в обратном направлении;

$K_n = 0,8$ — коэффициент неравномерности распределения обратного напряжения по вентилям.

Нелавинные вентиля обязательно снабжаются устройствами, обеспечивающими более равномерное распределение обратного напряжения между вентилями в плече и тогда коэффициент K_n достигает значения 0,95 (подробнее см. в [2]).

Величину $U_{\text{пл.м}}$ следует рассчитывать для трех режимов: рабочего режима, для коммутационных (повторяющихся) и некоммутированных (неповторяющихся) перенапряжений. Значения рабочего обратного напряжения и коммутационных перенапряжений нужно принимать с учетом неблагоприятного отклонения напряжения сети U_c . Амплитуда неповторяющихся перенапряжений не зависит от напряжения в сети, и она вычисляется по заданному в табл. 2 отношению к $U_{\text{дн}}$.

Лавинные диоды подбираются только по рабочему режиму и по повторяющемуся перенапряжению, так как неповторяющиеся перенапряжения кратковременны, а лавинные диоды сами ограничивают кратковременные перенапряжения. При выбо-

ре числа последовательно включенных лавинных вентиляей не нужно снижать паспортные значения допустимых повторяющихся напряжений и в (9) принять $K_n = 1$.

Таким образом, создается ветвь из двух или более последовательно соединенных диодов.

Число диодов в групповом вентиеле каждой фазы анодной или катодной группы определяется с учетом выполнения условий (6) и (9). После этого следует графически изобразить групповой вентиель одной фазы выпрямителя.

Общее количество диодов необходимых для нормальной работы выпрямителя, определяется количеством групповых вентиляей, применяемых при данной схеме выпрямления.

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 2.2

Необходимый для решения данной задачи теоретический материал изложен в [1; 3–6].

При системе тяги на переменном токе, если электроподвижной состав оснащен выпрямительно-инверторным преобразователем, то в режиме тяги происходит выпрямление однофазного тока, а режиме рекуперативного торможения — преобразование постоянного тока, генерируемого машинами, в однофазный переменный ток частотой 50 Гц.

В рекуперативном режиме машина становится генератором и ее ЭДС должна превышать подводимое к ней инвертируемое напряжение, создаваемое приемником тока, на значение потерь от этого тока. Поэтому в схеме должно обеспечиваться переключение трансформатора с отводов, дающих $E_{2в}$, на отводы дающие $E_{2и}$.

Машина при рекуперативном торможении переключается с последовательного возбуждения на независимое и при этом так, чтобы направление инвертируемого тока оставалось таким же, как и направление выпрямленного тока, для предотвращения перемагничивания машины. При этом направление инвертируемого тока и ЭДС машины должны совпадать. Для пропускания инвертируемого тока тиристорами при неизменной полярности машины необходимо их общий катод посредством переключача-

теля присоединить к минусовому зажиму машины, а общий анод — к плюсовому.

На схеме преобразователя необходимо показать возможность проведения указанных переключений с помощью условных переключателей.

Управление преобразователем рекомендуется строить на импульсно-фазовом принципе регулирования.

Нужно описать функциональное назначение отдельных элементов структурной схемы управления, показать связь этих элементов друг с другом и с вентилями преобразователя.

При расчетах следует учесть, что в задании дано для нулевой схемы E_2 — фазное напряжение (между нулевой точкой и крайними выводами трансформатора), а для мостовой схемы E_2 — линейное напряжение.

Зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от среднего значения выходного тока представляет собой внешнюю характеристику выпрямителя. Внешняя характеристика преобразователя в выпрямительном режиме $U_{db} = f(I_{db})$ должна быть построена в именованных единицах. При графическом построении внешней характеристики можно пренебречь падением напряжения на активных сопротивлениях в обмотках трансформатора и падением напряжения в вентилях. Таким образом, внешняя характеристика будет определяться коммутационными потерями напряжения и иметь падающий характер.

Для вычисления и построения внешней характеристики преобразователя в выпрямительном режиме $U_{db} = f(I_{db})$ воспользуемся уравнением

$$U_{db} = U_{доб} [\cos \alpha - A \cdot u_k \cdot I_{db} / (100 I_{днв})], \quad (10)$$

где $U_{доб}$ — напряжение холостого хода выпрямителя;

A — коэффициент равный 0,35 для двухпульсовой схемы с нулевым выводом и равный 0,7 для двухпульсовой мостовой схемы выпрямления.

Напряжение холостого хода выпрямителя $U_{доб}$ вычисляется из соотношения $E_2/U_{до}$, приведенного в прил. 1.

Расчет проводится сначала для режима без регулирования ($\alpha = 0$), а затем при заданном угле регулирования ($\alpha \neq 0$).

Графическое построение обеих характеристик можно провести по двум точкам при значениях токов: $I_{дв} = 0$; $I_{дв} = I_{днв}$. Затем следует проверить линейность построения внешней характеристики при $I_{дв} = 0,5 I_{днв}$.

Характеристики для режимов без регулирования и с регулированием должны представлять собой две параллельные линии. Для удобства ось ординат $U_{дв}$ можно прерывать с тем, чтобы взять достаточно крупный масштаб.

Инвертируемое напряжение противоположно напряжению выпрямителя.

Согласно заданию внешняя *искусственная* характеристика преобразователя в инверторном режиме представляет горизонтальную линию, т.е. она не зависит от $I_{ин}$ и равна по абсолютному значению напряжения холостого хода выпрямительного режима $|U_{дов}|$.

На графике она распространяется параллельно оси абсцисс, на которой откладывается ток преобразователя в инверторном режиме.

Номинальный ток в инверторном режиме $I_{ин}$ определяется из условия равенства расчетных мощностей преобразователя при работе на отпайках $E_{2в}$ и $E_{2и}$:

$$U_{дов} \cdot I_{днв} = U_{дои} \cdot I_{ин}, \quad (11)$$

где $U_{дои}$ — выпрямленное напряжение холостого хода на отпайках $E_{2и}$ при $\alpha = 0$, $I_{ин} = 0$ (вычисляется из соотношения $E_2/U_{до}$, приведенного в прил. 1).

При расчетах инверторного режима следует считать, что преобразователь собран на тиристорах, имеющих время выключения ($t_{вык}$) до 250 мкс, а частота сети — 50 Гц. Исходя из этого минимальный угол запаса в электрических градусах

$$\delta_{мин} = 360 \cdot t_{вык} / 0,02. \quad (12)$$

С ростом токов инвертора $I_{ин}$ растет угол коммутации γ и, сле-

довательно, растет минимальное значение угла опережения β , определяющего предел устойчивости инвертора:

$$\beta = \gamma + \delta_{\min}. \quad (13)$$

Поэтому каждому значению тока инвертора соответствует минимальное значение угла β .

Допустимый ток инвертора, превышение которого приводит к опрокидыванию инвертора, определяется *ограничительной* характеристикой.

Для вычисления и построения ограничительной характеристики преобразователя в инверторном режиме $U_{ди} = f(I_{и})$ используем уравнение

$$U_{ди\text{огр}} = -U_{дои} [\cos \delta_{\min} - A \cdot u_{к} \cdot I_{и} / (100 I_{ни})]. \quad (14)$$

Расчет и графическое построение ограничительной характеристики можно провести по двум или трем точкам при значениях токов: $I_{и} = 0$; $I_{и} = I_{ни}$; $I_{и} = 2I_{ни}$.

Предельно допустимый ток инвертора определяется точной пересечения ограничительной характеристики с искусственной характеристикой.

Предельно допустимый ток можно определить по уравнению (14), если принять, что $U_{диогр} = |U_{дов}|$. Следует сравнить значения предельно допустимого тока, полученные обоими методами.

Входная (внешняя) характеристика инвертора можно выразить через уравнение (10), но необходимо подставить токи и сопротивление инвертора, а угол $\alpha = \pi - \beta$, тогда

$$U_{ди} = -U_{дои} [\cos \beta + A \cdot u_{к} \cdot I_{и} / (100 I_{ни})]. \quad (15)$$

Угол опережения β при номинальном токе инвертора ($I_{ни}$) и напряжении равно напряжению искусственной линии можно определить по уравнению (15), если принять, что $U_{ди} = |U_{дов}|$.

Входную (внешнюю) характеристику преобразователя в инверторном режиме при угле опережения β , вычисленном по уравнению (15), можно построить по двум значениям тока: $I_{и} = 0$; $I_{и} = I_{ни}$.

В отличие от режима выпрямления коммутационные потери в инверторном режиме увеличивают напряжение $U_{дт}$, а входная характеристика имеет растущий характер.

Можно отметить, что входная характеристика и ограничительная характеристика имеют примерно равные наклоны, но направлены в разные стороны, т.е. с осью ординат образуют равнобедренный треугольник.

Типичные обобщенные внешние характеристики выпрямительно-инверторного преобразователя приведены в [1, рис. 7.5].

Для определения угла коммутации в выпрямительном и инверторном режимах преобразователя можно воспользоваться уравнениями [1–6] для двухпульсовой схемы с нулевым выводом

$$\gamma = \arccos [\cos\alpha - IX/(\sqrt{2}\cdot E_2)] - \alpha, \quad (16)$$

для двухпульсовой мостовой схемы выпрямления

$$\gamma = \arccos [\cos\alpha - 2IX/(\sqrt{2}\cdot E_2)] - \alpha, \quad (16,a)$$

где X — индуктивное сопротивление рассеяния фазы трансформатора в зависимости от режима его работы.

Для выпрямительного режима

$$X_b = u_k E_{2b}/(100 I_{нв}). \quad (17)$$

Для инверторного режима

$$X_i = u_k E_{2и}/(100 I_{ни}). \quad (18)$$

Угол запаса δ определяется из зависимости

$$\delta = \beta - \gamma - \delta_{\min} \text{ или } \delta = \beta - \gamma. \quad (19)$$

Коэффициент мощности для выпрямительного режима при $\alpha = 0$ и $\alpha \neq 0$ определяется по формуле

$$\chi = v \cdot \cos(\alpha + \gamma/2). \quad (20)$$

где v — коэффициент искажения первичного тока преобразователя, значение которого принимаем равным 0,97.

Для инверторного режима коэффициент мощности определяется по формуле

$$\chi \approx v \cdot \cos(\beta - \gamma/2). \quad (21)$$

Значения углов коммутации определяется по (16) при номинальном токе в соответствующем режиме работы преобразователя.

Диаграммы подачи управляющих импульсов, протекания тока в вентилях и напряжения на шинах постоянного тока для обоих режимов преобразователя (выпрямительного с заданным углом регулирования α и номинальным током $I_{dнв}$ и инверторного с током $I_{ни}$) необходимо построить в масштабе и именованных единицах. Требования к масштабу аналогичны приведенным в рекомендации к задаче 2.1.

Характеристики управляющих импульсов в данной работе не рассчитываются. На диаграммах изображать их в виде прямоугольников с амплитудой до 10 А и длительностью не более 250 мкс.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. — М.: Транспорт, 1999. — 464 с.
2. Харченко А.Ф. Неуправляемые силовые полупроводниковые выпрямители: Уч. пос. — М.: МИИТ, 2009. — 128 с.
3. Попков О.З. Основы преобразовательной техники: Уч. пос. для вузов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007. — 200 с.
4. Куликов П.Б. Управляемые двухпульсовые выпрямители электрических железных дорог: Уч. пос. — М.: РГОТУПС, 2000. — 38 с.
5. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники: Учеб. для вузов. — М.: Высшая школа, 1984. — 424 с.
6. Засорин С.И., Мицкевич В.А., Кучма К.Г. Электронная и преобразовательная техника: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. — М.: Транспорт, 1981. — 319 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Основные соотношения в выпрямителях

Схема выпрямления	E_2/U_{d0}	I_2/I_d	$k_T I_1/I_d$	U_{bm}/U_d	$P_d = I_{d1} U_{d0}/S_T$	I_a/I_d
Однополу- периодная	2,22	1,57	1,21	3,14	0,286	1
Однофазная двухпульсовая с нулевым вы- водом	1,11	0,709	1,0	3,14	0,75	0,5
Однофазная двухпульсовая мостовая	1,11	1,0	1,0	1,57	0,9	0,5
Трехфазная с ну- левым выводом (трехпульсовая)	0,855	0,583	0,476	2,09	0,74	0,33
Трехфазная мо- стовая (шести- пульсовая)	0,427	0,817	0,817	1,05	0,95	0,33

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Предельные параметры некоторых силовых полупроводниковых диодов отечественного производства

Нелавинные диоды

Тип диода	Д132-50	Д132-80	Д141-100	Д151-125	Д151-160	Д161-200
Классы	1÷14	1÷14	3÷16	3÷16	3÷16	3÷16
$I_{уд}$, кА	1,0	1,2	1,9	2,2	3,0	5,5

Тип диода	Д123-200	Д161-250	Д161-320	Д123-320	Д133-400	Д171-400
Классы	40÷60	3÷16	3÷16	20÷28	10÷40	3÷16
$I_{уд}$, кА	4,6	6,4	7,5	6,3	7,0	10,5

Окончание прил. 2

Тип диода	Д133-500	Д233-500	Д143-630	Д133-800	Д143-800	Д353-800
Классы	10÷28	36÷44	10÷40	4÷16	18÷28	46÷60
$I_{уд}, \text{кА}$	9,0	8,6	10,0	12,0	15,0	15,0

Тип диода	Д143-1000	Д243-1000	Д253-1600	Д353-1600	Д253-2000
Классы	4÷16	20÷28	4÷20	30÷36	10÷18
$I_{уд}, \text{кА}$	18,0	22,0	28,0	26,0	30,0

Лавинные диоды

Тип диода	ДЛ 132-50	ДЛ132-80	ДЛ161-200	ДЛ123-320	ДЛ171-320
Классы	4÷15	4÷15	4÷14	4÷14	4÷14
$I_{уд}, \text{кА}$	1,0	1,2	5,5	5,5	7,5

Тип диода	ДЛ 133-500	ДЛ243-500	ДЛ153-1250	ДЛ253-1600	ДЛ253-2000
Классы	4÷14	20÷28	20÷28	10÷18	10÷18
$I_{уд}, \text{кА}$	7,5	15,0	25,0	29,0	30,0

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА
И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ

Задание на контрольную работу № 2
с методическими указаниями

Редактор *Г.В. Тимченко*
Корректурa *Д.Н. Тихоньчев*
Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

Тип. зак.	Изд. зак. 51	Тираж 300 экз.
Подписано в печать 27.01.11	Гарнитура NewtonС	Ризография
Усл. печ. л. 1,5		Формат 60×90 ¹ / ₁₆

Редакционный отдел
Информационно-методического управления РОАТ,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати
Информационно-методического управления РОАТ,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2