

#7179

КОНТРОЛЬНЫЕ  
СРОКОВ ВОЗВРАЩЕНИЯ

КА ДОЛЖНА  
БЫТЬ НЕ  
ЭТО ЗДЕСЬ

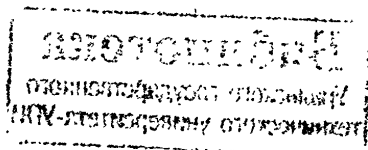
202  
24  
1  
8

Министерство образования Российской Федерации  
“ГОУ ВПО Уральский государственный технический университет – УПИ”

ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
СИЛОВОЙ ЧАСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
СИСТЕМЫ ТП-Д

Методические указания к курсовому проекту  
по дисциплине “Преобразовательная техника. Физические основы  
электроники” для студентов всех форм обучения специальности 18.04-  
Электропривод и автоматика промышленных установок  
и технологических комплексов

Екатеринбург 2002



УДК 621.314.6

Составители В.И.Лихошерст, А.В.Костылев

Научный редактор доц., канд.техн.наук М.Ю.Бородин

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СИСТЕМЫ ТП-Д. Методические указания к курсовому проекту по дисциплине "Преобразовательная техника. Физические основы электроники / В.И.Лихошерст, А.В.Костылев. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 39 с.**

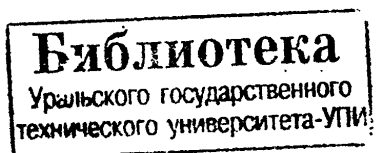
Методические указания предназначены для использования при выполнении первой части курсового проекта по преобразовательной технике. Приведены основные соображения, которыми следует руководствоваться при выборе схемы силовых цепей преобразователя электрической энергии. Изложены методика и порядок расчета электрических параметров силового трансформатора, выбор силовых полупроводниковых вентиляей, расчет индуктивностей реакторов и характеристик преобразователя. Сообщаются технические данные по силовым полупроводниковым вентилям. В приложении изложено содержание первой части курсового проекта, а также приведены варианты заданий.

Библиогр.: 15 назв. Рис. 4. Табл. 6. Прил. 6.

Подготовлено кафедрой "Электропривод и автоматизация промышленных установок".

© ГОУ ВПО Уральский государственный  
технический университет – УПИ, 2002

© Кафедра ЭАПУ ГОУ ВПО УГТУ



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данные методические указания являются существенно переработанным изданием методических указаний 1990 г. "Расчет полупроводникового преобразователя системы ТП-Д". В первом издании ставилась задача расширения кругозора студентов во время проектирования. Поэтому там часто приводятся обоснования рекомендаций и сообщаются альтернативные решения, которые редко используются при курсовом проектировании. Во втором издании студентам облегчена работа по проектированию силовой части преобразователя благодаря тому, что формулы приводятся в порядке их использования и уменьшено количество редко используемой информации. Добавлен ряд формул и параметров, которые прежде сообщались на консультациях, приложено задание на курсовой проект и приведены варианты заданий. Для тех, кто пожелает спроектировать реальный преобразователь, лучше воспользоваться предыдущим изданием методических указаний. В обоих изданиях фраза "при курсовом проектировании" говорит о том, что последующие рекомендации не являются безусловно правильными во всех случаях и даны для облегчения выполнения *учебного* проекта.

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В первой части курсового проекта выполняется электрический расчет тиристорного преобразователя для управления коллекторным двигателем постоянного тока. Во второй части курсового проекта разрабатывается система импульсно-фазового управления (СИФУ). Студенты, выполняющие курсовую работу, не проектируют СИФУ. Электрический расчет преобразователя выполняется с целью определения параметров всех элементов силовой цепи (полупроводниковых приборов, силового трансформатора, реакторов и др.), при которых обеспечиваются необходимые свойства, надежность, экономичность и нормальное функционирование электропривода, и для расчета характеристик системы ТП-Д. Разработанная система управления должна обеспечить правильное управление тиристорами. Выполнение курсового проекта позволяет глубже усвоить работу всех узлов наиболее распространенных сейчас в России преобразователей электрической энергии для электроприводов с коллекторными двигателями постоянного тока.

На предприятиях, изготавливающих преобразователи, после электрического расчета силовых цепей и разработки системы управления выполняется конструктивная проработка всех ячеек, кассет, блоков, узлов и преобразователя в целом. Затем изготавливается опытный образец и проводятся испытания, в ходе которых окончательно устанавливаются параметры всех функциональных узлов преобразователя. Для определения длительно допустимых нагрузок и кратковременных перегрузок проводятся тепловые испытания. Как правило, проектируется серия преобразователей, охватывающая определенную область стандартных токов и напряжений с максимальной унификацией схемных и конструктивных решений.

При курсовом проектировании с целью уменьшения объема работы выполняется только *электрический* расчет силовых цепей *одного* преобразователя, который наиболее полно удовлетворяет требованиям задания. Кроме того, студенты, выполняющие курсовой проект, разрабатывают СИФУ. *Преобразователь проектируется на стандартные токи и требуемое нестандартное напряжение, обеспечивающее номинальную скорость двигателя при наиболее неблагоприятных условиях (пониженном напряжении сети, максимальной перегрузке и др.).*

## 2. ВЫБОР СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Схема силовых цепей выпрямительно-инверторного преобразователя должна обеспечивать выполнение требований, предъявляемых к электроприводу, при минимальном количестве управляемых вентилях и высоких технико-экономических показателях. В первую очередь выбирается пульсность схемы, исходя из мощности привода и требований к динамике (по ширине полосы пропускания контура скорости или диапазону регулирования скорости). При этом руководствуются следующими соображениями. Чем больше мощность привода и чем выше требования к быстродействию, тем больше должна быть пульсность. Это обусловлено тем, что более мощные двигатели, как правило, допускают относительно меньшие пульсации тока якоря. Увеличение пульсности приводит к повышению частоты и уменьшению амплитуды пульсаций выпрямленного напряжения, следовательно, позволяет использовать сглаживающий реактор, имеющий меньшие индуктивность, габариты, массу и стоимость. Кроме того, чем мощнее преобразователь, тем больше он искажает напряжение в питающей сети переменного тока. С повышением пульсности эти искажения уменьшаются. К сожалению, сложность системы управления, а иногда и габариты и стоимость самого преобразователя растут с увеличением его пульсности. На рис.1 показаны диапазоны номинальных мощностей, на которые изготавливаются преобразователи и которые рекомендуются при курсовом проектировании.

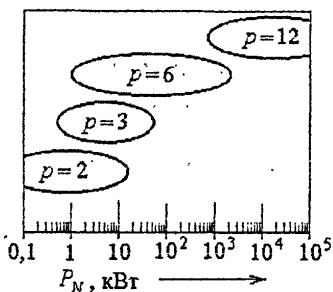


Рис.1. Области использования преобразователей с различной пульсностью

Быстродействие системы ТП-Д ограничено в связи с дискретностью работы преобразователя. В течение интервала повторяемости, длительность которого обратно пропорциональна пульсности, преобразователь неуправляем. Чем больше пульсность, тем короче интервал повторяемости и тем выше быстродействие привода. Быстродействие привода можно характеризовать полосой пропускания  $f_n$  или близкой к ней резонансной частотой. Для получения требуемого

быстродействия пульсность преобразователя при курсовом проектировании должна приниматься не менее вычисленной по эмпирической формуле

$$p > 0,4\sqrt{f_{\Pi}} \quad (1)$$

независимо от мощности преобразователя. Частоту в (1) следует подставлять в герцах. Если задан широкий диапазон регулирования скорости ( $D$  более 1000:1), то необходимо использовать привод с высоким быстродействием и при курсовом проектировании принять полосу пропускания

$$f_{\Pi} \approx D/7. \quad (2)$$

У величины  $D$  в формуле (2) следует подставлять только числитель (например вместо 1000:1 или 1:1000 следует использовать число 1000).

Основные простые схемы симметричных выпрямительно-инверторных преобразователей приведены на рис.2:

- а - двухфазная нулевая (однофазная двухполупериодная);
- б - трехфазная нулевая;
- в - однофазная мостовая;
- г - трехфазная мостовая;
- д - шестифазная нулевая.

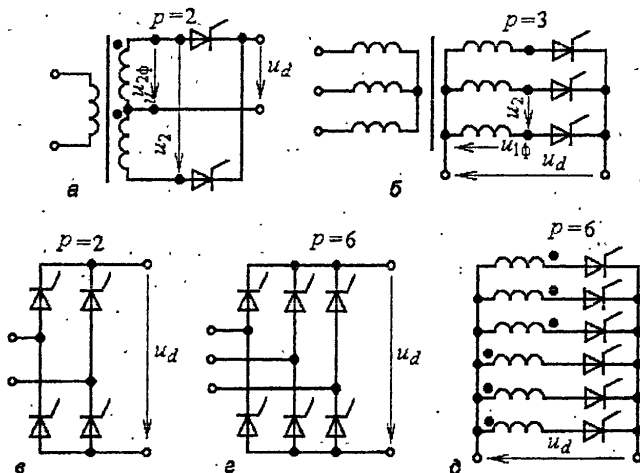


Рис. 2. Схемы силовых цепей простых преобразователей

На всех схемах опущены входные цепи (контакты, трансформаторы, токоограничивающие реакторы и пр.), на мостовых схемах опущены токоограничивающие реакторы или трансформаторы, на шестифазной схеме

опущена трехфазная первичная обмотка. Нулевые схемы часто называют лучевыми, а также схемами с нулевым, средним или нейтральным выводом.

Сложные схемы, образованные из двух простых для удвоения пульсности, показаны на рис.3:

а - двойная трехфазная нулевая (шестипульсовая), (две обратные звезды) с уравнивающим реактором;

б - две трехфазные мостовые с уравнивающим реактором;

в - две последовательно соединенные трехфазные мостовые схемы.

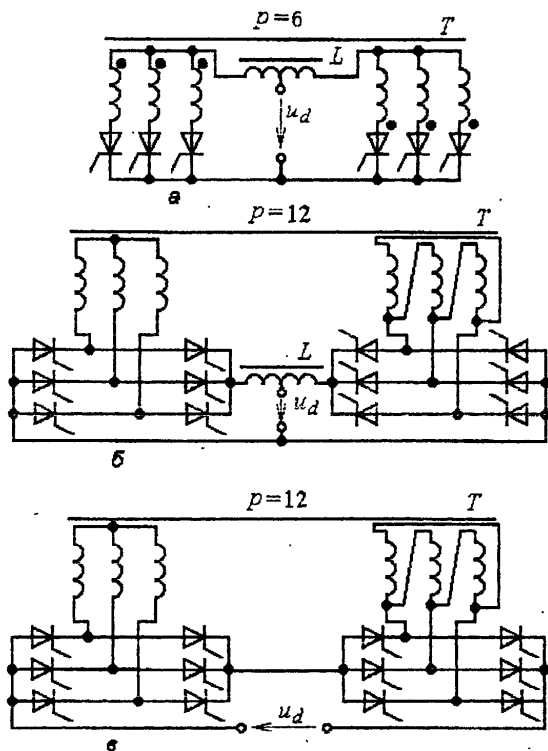


Рис.3. Схемы сложных преобразователей

Схемы с уравнивающим реактором и с последовательным соединением простых схем удваивают пульсность, если простые схемы питаются напряжениями, сдвинутыми на половину интервала повторяемости. В трехфазной нулевой схеме сдвиг питающих напряжений должен быть 60 эл.град., а в мостовых – 30 эл. град. Формы ЭДС (временные диаграммы) различных схем с одинаковой пульсностью совершенно одинаковы при равных углах управления  $\alpha$  и равных  $E_{d0}$  – ЭДС при  $\alpha = 0$ . Уравнивающий реактор  $L$  усредняет мгновенные значения ЭДС простых схем, которые сдвинуты на половину интервала повторяемости, и, благодаря этому, удваивает пульсность.

Все симметричные схемы позволяют получать как положительное, так и

отрицательное выпрямленное напряжение, что при неизменном направлении тока обеспечивает работу двигателя в первом и четвертом квадрантах механической характеристики, а сам преобразователь может работать в выпрямительном и инверторном режимах. Граница зоны прерывистого и непрерывного токов на механической характеристике двигателя представляет часть эллипса.

На рис. 4 представлены основные несимметричные мостовые схемы управляемых выпрямителей: а – однофазная с диодом и тиристором в каждой стойке; б – однофазная с двумя диодами в одной стойке; в – однофазная с



диодным выпрямительным мостом и симистором в цепи переменного тока; г) трехфазная мостовая с диодами в анодной группе.

Мгновенные значения выпрямленного напряжения несимметричных схем не могут быть отрицательными и поэтому исключается инверторный режим, а двигательный режим возможен только в первом квадранте. Коэффициент мощности несимметричных схем выше, чем у соответствующих симметричных. Область применения по мощности указана на рис.1. Для трехфазной несимметричной схемы следует полагать пульсность равной трем.

Прежде чем выбрать схему преобразователя, необходимо проанализировать требования к электроприводу и принять решение о том, какой преобразователь должен быть в цепи якоря – нереверсивный или реверсивный. При курсовом проектировании это определяется дополнительными требованиями.

Существенное влияние на выбор схемы преобразователя цепи якоря оказывает необходимость реверса тока и наличие или отсутствие необходимости двигательного режима при обоих направлениях вращения. Согласно заданию преобразователи выполняются реверсивными, если нет дополнительного требования, разрешающего использовать нереверсивный преобразователь. Как правило, реверсивный (по току) преобразователь выполняется на основе двухкомплектных симметричных схем. Если привод допускает при реверсе бестоковую паузу с длительностью более 0,5 с, то можно использовать однокомплектный преобразователь с реверсором (контактором), изменяющим направление тока в цепи якоря. Если реверс скорости совершается редко и его длительность может превышать несколько секунд, то он может выполняться по цепи возбуждения.

Если не требуется инверторный режим, то есть предполагается работа двигателя только в первом квадранте механической характеристики, то используются несимметричные схемы.

Рассмотрим особенности различных схем. При сравнении следует учитывать, что габариты и масса охладителей и тиристоров определяется их средним током и не зависит от напряжения. Стоимость тиристорov приблизительно пропорциональна корню квадратному из тока и несколько возрастает с увеличением класса (повторяющегося напряжения). Поскольку в мостовых схемах средние токи тиристорov такие же, как в нулевых при одинаковом числе фаз питающего напряжения, то объем и масса вентиляционной части мостового преобразователя в два раза больше, чем у нулевого. В

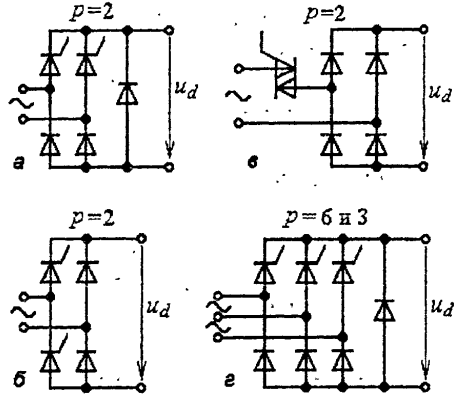


Рис.4. Схемы силовых цепей несимметричных преобразователей

трехфазных мостовых преобразователях одновременно удваивается число каналов СИФУ, что также увеличивает стоимость.

Большим достоинством мостовых схем является то, что их можно питать как от трансформатора, так и от сети через токоограничивающие реакторы, которые имеют меньшие габариты, массу и стоимость, чем трансформатор. Увеличение пульсности позволяет использовать сглаживающие реакторы меньших габаритов и стоимости. Нулевые схемы питаются обязательно через трансформаторы.

Двухфазная нулевая и однофазная мостовая схемы имеют одинаковую пульсность. Если для получения требуемого выпрямленного напряжения нельзя использовать бестрансформаторное питание, то некоторые преимущества имеет нулевая схема перед мостовой схемой, хотя габаритная мощность трансформатора оказывается на 20 % больше. Для электроприводов чаще используется мостовая схема.

Трехфазная нулевая схема обязательно питается через трансформатор, у которого первичные обмотки обычно соединены треугольником, а вторичные обмотки соединены в зигзаг. Это устраняет поток вынужденного намагничивания и позволяет уменьшить массу трансформатора на 10–15 %. Трехфазная нулевая схема применяется только для приводов небольшой мощности. Она требует обязательного использования силового трансформатора и применения тиристоров на повышенное напряжение.

Шестифазная нулевая схема использует трансформатор несколько большей габаритной мощности, чем мостовая, но вентиляльная часть оказывается почти вдвое меньшего объема, поскольку средний ток тиристора в два раза меньше, чем в трехфазной мостовой схеме, имеющей ту же пульсность. В двойной трехфазной нулевой схеме (рис.3, а) через каждый тиристор и вторичную обмотку протекает половина выпрямленного тока в течение одной третьей части периода, что также уменьшает объем вентиляционной части почти в два раза по сравнению с мостовой схемой. Поток вынужденного намагничивания в трансформаторе не возникает, но в схеме добавляется уравнивающий реактор.

Двенадцатипульсная схема с уравнивающим реактором (рис.3, б) имеет преимущество перед схемой с последовательным соединением мостов (рис.3, в) благодаря вдвое меньшему току каждого моста и тиристора в том случае, когда имеются тиристоры на необходимое напряжение, и поэтому не требуется их последовательное соединение. Если подходящих по напряжению тиристоров нет, то используется последовательное соединение мостов по рис.3, в. В этой схеме напряжение на каждом тиристоре уменьшается вдвое и последовательное соединение тиристоров, как правило, не требуется. Преимущества двенадцатипульсных схем проявляются только при мощности в несколько мсгватт.

Несимметричные однофазные схемы отличаются одна от другой токами, которые протекают в интервалы нулевого мгновенного выпрямленного напряжения, когда закрыты все тиристоры. В схеме рис. 4, а в интервалы нулевого выходного напряжения ток протекает через шунтирующий (нулевой)

диод, через остальные диоды протекает такой же ток, как и через тиристоры. В схеме с включением тиристоров в одну стойку (рис.4, б) ток в интервалы нулевого напряжения протекает через оба диода, их средний ток больше тока тиристоров. В схеме рис.4, в при закрытом симисторе через каждый диод протекает около половины тока нагрузки, их средний ток больше, чем в схеме с шунтирующим диодом, и меньше, чем без него. В схеме с симистором несколько проще СИФУ (комбинированное ФСУ без логической схемы и один усилитель мощности). Окончательный выбор схемы в каждом конкретном случае должен проводиться на основе расчета стоимости вентиляционной части и СИФУ, что при курсовом проектировании сделать не удастся. Поэтому приходится руководствоваться только вышеизложенными соображениями.

Реверсивные преобразователи выполняются, как правило, двухкомплектными, в которых конструктивно объединены два неревверсивных. Однокомплектные реверсивные преобразователи можно применять только в том случае, когда допускается бестоковая пауза длительностью более 0,5 с. Двухкомплектные реверсивные преобразователи с совместным и отдельным управлением обладают практически одинаковым быстродействием. Ввиду ряда существенных преимуществ [1] в последнее время используется в основном отдельное управление в преобразователях мощностью более 10 киловатт. Совместное управление применяется в приводах меньшей мощности. Причина этого в том, что стоимость логического переключающего устройства, датчика состояния вентиля и устройств линеаризации механических характеристик не зависит от мощности преобразователя, а стоимость уравнивающих реакторов почти пропорциональна мощности преобразователя. У маломощных приводов уравнивающие реакторы имеют малые габариты и стоимость, что делает целесообразным применение совместного управления.

Двухкомплектные реверсивные преобразователи, выполненные по перекрестной схеме, используются в приводах мощностью в несколько мегаватт в случае необходимости регулирования уравнивающего тока. Они дороже, так как требуют трансформатор с двумя комплектами вторичных обмоток. Поэтому обычно используются встречно-параллельные схемы. Разнообразные схемы силовых цепей реверсивных преобразователей для приводов большей мощности приведены в [2, 3].

### 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Электрический расчет выполняется с целью определения параметров трансформатора, от которых зависят свойства и характеристики преобразователя и привода. В первую очередь находятся необходимые вторичные напряжения и токи, по которым можно выбрать трансформатор из выпускаемых промышленностью, пользуясь справочной литературой, либо вычислить вероятные параметры, которые можно использовать в дальнейшем (индуктивности рассеяния и активные сопротивления обмоток, приведенные ко вторичной цепи, коэффициент трансформации, типовую мощность и др.).

Силовой трансформатор должен иметь необходимые число фаз, схему соединения обмоток, требуемые напряжения и допускаемые токи первичных и вторичных цепей.

В курсовом проекте для привода конкретного механизма с заданным двигателем (и с заданными дополнительными требованиями), как правило, проектируется преобразователь с нестандартным трансформатором. Но если среди выпускаемых промышленностью [4] находится трансформатор с требуемыми вторичными напряжением и током, то его можно использовать и найти все необходимые параметры. В противном случае приходится все параметры рассчитывать, как изложено ниже.

После выбора схемы силовых цепей преобразователя принимают его номинальный выпрямленный ток  $I_{dN}$ , который должен превышать номинальный ток двигателя  $I_{яN}$ . Стандартный номинальный ток выбирается по ГОСТ 6827-76 из следующего ряда: 1, 2, 4, 5, 10, 16, 25, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1250, 1600, 2000, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000 А.

Действующее значение линейного тока вторичных обмоток пропорционально среднему значению выпрямленного тока и зависит от его формы. Обычно при выборе трансформатора полагают выпрямленный ток идеально сглаженным, тогда номинальный вторичный ток рассчитывается по формуле

$$I_{2N} = k_2 I_{dN}. \quad (3)$$

Значения коэффициентов тока  $k_2$  для различных схем приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты для расчета трансформатора

Наименование схемы	Коэффициенты выпрямленного напряжения		Коэффициенты линейного тока		Коэффициент типовой мощ- ности транс- форматора $k_T$
	линейный $k_E$	фазный $k_{E\phi}$	вто- рич- ный $k_2$	первичный $k_1$	
1	2	3	4	5	6
Однофазная мостовая	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,900$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,900$	1,00		$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11$
Двухфазная нулевая	$\frac{\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,450$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,900$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	1,00	$\frac{\pi}{4\sqrt{2}} (1+\sqrt{2}) \approx 1,34$
Трехфазная нулевая	$\frac{3}{\pi\sqrt{2}} \approx 0,675$	$\frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \approx 1,17$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{2}}{3} \approx 0,471$	$\frac{\pi}{3\sqrt{6}} (\sqrt{2} + \sqrt{3}) \approx 1,35$

1	2	3	4	5	6
Трехфазная нулевая, вторичная-зигзаг	$\frac{3}{\pi\sqrt{2}} \approx 0,675$	$\frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \approx 1,17$	$\frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,577$	$\frac{\sqrt{2}}{3} \approx 0,471$	$\frac{\pi(1+\sqrt{2})}{3\sqrt{3}} \approx 1,46$
Трехфазная мостовая	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \approx 1,35$	$\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \approx 2,34$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \approx 0,816$		$\frac{\pi}{3} \approx 1,047$
Шестифазная нулевая, первичная-треугольник	$\frac{\sqrt{6}}{\pi} \approx 0,780$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \approx 1,35$	$\frac{1}{\sqrt{6}} \approx 0,408$	$\frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,577$	$\frac{\pi}{2\sqrt{6}}(\sqrt{2}+1) \approx 1,55$
Двойная трехфазная нулевая с уравнительным реактором	$\frac{3}{\pi\sqrt{2}} \approx 0,675$	$\frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \approx 1,17$	$\frac{1}{2\sqrt{3}} \approx 0,289$	$\frac{1}{\sqrt{6}} \approx 0,408$	$\frac{\pi}{6}(1+\sqrt{2}) \approx 1,26$
Две трехфазные мостовые с уравнительным реактором	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \approx 1,35$	$\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \approx 2,34$	$\frac{1}{\sqrt{6}} \approx 0,408$	$\frac{\sqrt{\sqrt{3}+2}}{\sqrt{6}} \approx 0,789$	$\frac{\pi}{12}(\sqrt{\sqrt{3}+2}+2) \approx 1,03$
Две последовательно соединенные трехфазные мостовые	$\frac{6\sqrt{2}}{\pi} \approx 2,70$	$\frac{6\sqrt{6}}{\pi} \approx 4,68$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \approx 0,816$	$\frac{\sqrt{2}\sqrt{\sqrt{3}+2}}{\sqrt{3}} \approx 1,577$	$\frac{\pi}{12}(\sqrt{\sqrt{3}+2}+2) \approx 1,03$
Однофазная несимметричная мостовая	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,90$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,90$	$\frac{\sqrt{\pi-\alpha}}{\sqrt{\pi}}$		$\frac{\sqrt{\pi}\sqrt{\pi-\alpha}}{2\sqrt{2}}$
Трехфазная несимметричная мостовая	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \approx 1,35$	$\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \approx 2,34$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \approx 0,816$		$\frac{\pi}{3} \approx 1,047$

Примечания: 1. Коэффициенты линейного тока справедливы при соединении первичных и вторичных обмоток как звездой, так и треугольником.

2. В случае соединения вторичных обмоток трансформатора треугольником не следует пользоваться фазным коэффициентом выпрямленного напряжения, так как в этом случае линейное напряжение одновременно является и фазным напряжением.

3. Коэффициенты тока однофазной несимметричной схемы следует вычислять при минимальных значениях угла управления  $\alpha$  (обычно  $\alpha=0$ ), коэффициенты тока трехфазной несимметричной схемы приведены для  $\alpha < \pi/3$ .

Номинальное *вторичное напряжение трансформатора* должно обеспечивать работу двигателя при номинальной скорости и максимальном токе перегрузки с учетом всех падений напряжения и возможного снижения

напряжения сети на 10 %. В реверсивных преобразователях должно также учитываться снижение величины выпрямленного напряжения, обусловленное ограничением минимального угла управления. Минимальный угол управления принимается исходя из условий безопасного инвертирования.

Точный учет всех падений напряжения на стадии проектирования трансформатора невозможен, поскольку неизвестны параметры цепей. Поэтому вначале определяют вторичное напряжение, пользуясь приближенными величинами сопротивлений, а затем выбирают трансформатор или рассчитывают более близкие к окончательным вероятные значения его параметров. Далее проверяют, удовлетворяет ли преобразователь с данным трансформатором указанным выше требованиям.

Предварительно необходимо найти сопротивление якоря в относительных единицах. Активные сопротивления электрических машин в каталогах и в задании указываются при температуре 15 или 20°C. Расчетная рабочая температура, к которой приводят сопротивления обмоток электрической машины при вычислении потерь, согласно ГОСТ 17154 -71, принимается равной 75 °C для обмоток с изоляцией, соответствующей классам нагревостойкости *A, E, B*, и равной 115 °C для обмоток с изоляцией классов *F* и *H*. Приведение выполняется по формуле

$$R_{я} = k_t (R_{я.о} + R_{д.п} + R_{к.о}) = k_t R_{я.дв}, \quad (4)$$

где  $k_t$  – коэффициент увеличения сопротивления обмоток при нагреве до расчетной рабочей температуры;  $R_{я.о}$ ,  $R_{д.п}$ ,  $R_{к.о}$  – сопротивления якорной обмотки, обмотки дополнительных полюсов и компенсационной обмотки при каталожной температуре;  $R_{я.дв}$  – заданное сопротивление якорной цепи двигателя.

Исходя из температурного коэффициента сопротивления для меди, равного 0,004 1/°C [9, с.24], получим следующие значения коэффициентов увеличения сопротивления обмоток при нагреве до расчетной температуры:

Классы нагревостойкости изоляции	<i>A, E, B</i>	<i>F, H</i>
Пересчет от температуры 15 °C	1,24	1,40
Пересчет от температуры 20 °C	1,22	1,38

После чего находят коэффициент необходимого повышения напряжения, обусловленного увеличением падения напряжения на активных сопротивлениях при перегрузках по току

$$k_R = (\lambda - 1) \frac{R_{я} I_{яN}}{U_{яN}} + \lambda R_{н.э*}, \quad (5)$$

и коэффициент корректировки величины максимального напряжения преобразователя, исходя из требуемого превышения напряжения на якоре

двигателя в переходных режимах  $U_{яmin}$  и желательного ограничения частоты вращения двигателя до величины  $n_{max}$ , меньшей номинальной, ввиду изменившихся технологических требований,

$$k_u = \frac{U_{я.min}}{U_{яN}} \cdot \frac{n_{max}}{n_N} \quad (6)$$

Входящие в формулу (5) номинальные ток и напряжение переводят сопротивление якоря, выраженное в омах, в относительные единицы; символом  $R_{п.з*}$  обозначено эквивалентное сопротивление преобразователя в относительных единицах, которое включает сопротивление обмоток трансформатора или токоограничивающего реактора и сопротивление, обусловленное коммутацией вентилей. Предварительно принимают  $R_{п.з*} = 0,06 - 0,15$ . Чем меньше двигатель, тем больше относительное сопротивление.

Для преобразователей, у которых к вентильным группам подводится трехфазное напряжение, обычно определяют необходимое действующее значение *линейного* номинального вторичного напряжения по формуле

$$U_{2N} = \frac{k_u + k_R}{k_c k_E \cos \alpha_{min}} U_{яN}, \quad (7)$$

где  $k_c = 0,95-0,85$  – коэффициент, учитывающий возможное снижение напряжения сети; согласно ГОСТ 13109-67 допускаются отклонения напряжения на зажимах электроприемников пределах  $\pm 5\%$  от номинального, в отдельных случаях до  $-10\%$ , поэтому, как правило, принимают  $k_c = 0,90$ ; для преобразователей, которые получают питание от высоковольтных сетей,  $k_c = 0,95$ ; коэффициент  $k_c = 0,85$  принимается для электроприводов с высокими требованиями к стабильности на высокой скорости;  $\alpha_{min}$  – минимальный угол управления, определяющий снижение выпрямленного напряжения в реверсивных преобразователях в связи с ограничением угла управления до величины  $\alpha_{min} = 15 - 30^\circ$ ; в нереверсивных преобразователях можно принимать этот угол близким к нулю;  $U_{яN}$  – номинальное напряжение якоря двигателя (по заданию);  $k_E$  ( $k_{E\Phi}$ ) – коэффициент выпрямленного напряжения, равный отношению максимальной ЭДС выпрямителя  $E_{д0}$  к действующему значению напряжения, подведенного к вентилям. Значения  $k_E$  для различных схем приведены в табл.1.

Когда силовой трансформатор соединен в звезду, то удобнее находить действующее значение его *фазного* напряжения по формуле

$$U_{2\phi N} = \frac{k_u + k_R}{k_c k_{E\Phi} \cos \alpha_{min}} U_{яN}. \quad (8)$$

Если необходимое линейное вторичное напряжение получается равным стандартному сетевому (220, 380 В) или отличается от него не более чем на 20

% (например, 440 В при номинальном напряжении сети 380 В); то в курсовом проекте принимают бестрансформаторное питание через токоограничивающие реакторы. Использование при этом завышенного напряжения понижает коэффициент мощности, но зато удешевляет преобразователь.

После выбора схемы рекомендуется нарисовать черновик полной принципиальной схемы преобразователя со всеми комплектами вентилялей и уравнительными реакторами, если они нужны. Эта схема позволит правильно представить однолинейную схему и определить необходимое число реакторов.

Сразу целесообразно вычислить ЭДС преобразователя при номинальном напряжении сети и угле управления  $\alpha = 0$

$$E_{d0} = k_E U_{2N} = k_{E\Phi} U_{2\Phi N}. \quad (9)$$

Номинальное линейное первичное (сетевое) напряжение трансформатора  $U_{1N}$ , выбранного по справочной литературе, указывается в его технических данных. Для нестандартного преобразователя рекомендуется выбирать  $U_{1N}$  исходя из *типовой (расчетной, габаритной)* мощности трансформатора  $S_T$  по табл.2. Типовую мощность  $S_T$ , кВА, можно определить исходя из мощности в цепи выпрямленного тока

$$S_T = k_T E_{d0} I_{dN} 10^{-3}, \quad (10)$$

где  $k_T$  – коэффициент типовой мощности (см. табл. 1). Обычно типовая мощность на 5-80 % превышает мощность двигателя.

Таблица 2

Рекомендуемые напряжения сетевых (первичных) обмоток трансформатора

$S_T$	До 20 кВА	До 400 кВА	0,26-8,0 МВА	Свыше 8 МВА
$U_{1N}$	220 или 380 В	380 или 660 В	6 или 10 кВ	10 или 35 кВ

Действующее значение линейного первичного тока трансформатора также пропорционально выпрямленному току

$$I_1 = \frac{U_{2N}}{U_{1N}} k_1 I_d. \quad (11)$$

Значения коэффициента первичного тока  $k_1$  для полностью сглаженного выпрямленного тока приведены в табл.1.

Для определения номинального линейного первичного тока в (11) нужно подставлять номинальное значение выпрямленного тока.

Следует иметь в виду, что значения коэффициентов  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_T$  зависят от формы тока (степени его сглаживания, типа нагрузки – индуктивной, активной,



емкостной (см. [10, с.57]). Значения коэффициентов и их обоснования приведены в [11, 12, 3 и 2]. Коэффициенты, соответствующие нагрузке, содержащей емкость, не используются в электроприводе.

Первичные обмотки трансформатора можно соединять как звездой, так и треугольником. Обычно их соединяют звездой. Исключением являются трансформаторы, питающие нулевые шестифазную и трехфазную схемы. Соединение первичных обмоток треугольником позволяет при работе на шестифазную схему подавить поток вынужденного намагничивания, а при работе на трехфазную нулевую схему – подавить кратные трем гармоники этого потока.

Схемы соединения вторичных обмоток, как правило, определяются схемой преобразователя. Трехфазную мостовую схему можно питать от вторичной обмотки, соединенной звездой или треугольником, а также от сети через токоограничивающие реакторы, которые нужны для уменьшения искажений напряжения сети и ограничения тока короткого замыкания.

Выпрямленный ток преобразователя протекает и по обмоткам трансформатора, который в связи с этим вносит в цепь постоянного тока активное  $R_n$  и индуктивное  $X_n$  сопротивление преобразователя. Точное определение этих сопротивлений очень сложно. Величины вносимых сопротивлений зависят от параметров каждой обмотки, их взаимной индукции, схемы соединения и угла коммутации. В проектной практике точный расчет этих сопротивлений не делается. В преобразователях очень большой мощности  $R_n$  часто вообще не учитывают ввиду относительной малости [2].

При работе преобразователя в режиме непрерывного тока происходит потеря напряжения, обусловленная коммутацией вентилей, которая учитывается как падение напряжения на фиктивном активном сопротивлении  $R_\gamma$ , обусловленном коммутацией. С ростом мощности преобразователя относительное влияние этого сопротивления возрастает, поскольку уменьшается сопротивление якоря и обмоток трансформатора в относительных единицах. Таким образом, эквивалентное активное сопротивление преобразователя имеет два слагаемых

$$R_{\text{пб}} = R_n + R_\gamma. \quad (12)$$

Рассмотрим приближенную методику расчета активного и индуктивного сопротивлений преобразователя [11], которые вносятся в цепь постоянного тока.

Активное сопротивление обмоток одной фазы трансформатора, которое представляет сумму активного сопротивления первичной обмотки, приведенного ко вторичной цепи, и активного сопротивления вторичной обмотки, определяется на основании данных опыта короткого замыкания, полагая соединение обмоток по схеме звезда – звезда. Активную составляющую напряжения короткого замыкания в процентах можно вычислить по предложенной нами эмпирической формуле

$$u_a = \frac{k_a}{\sqrt[4]{S_T}}, \quad (13)$$

где  $k_a$  – коэффициент, зависящий от конструкции трансформатора;  $S_T$  – типовая мощность трансформатора, кВА. Для преобразовательных трансформаторов мощностью от 0,01 до 10000 кВА  $k_a = 8,0 - 5,0$ .

Тогда  $R_T$  вычисляется по формуле, Ом,

$$R_T = \frac{u_a}{100} \cdot \frac{U_{1N}}{\sqrt{m_1 k_{тр}^2} I_{1N}} = \frac{P_k}{m_1 k_{тр}^2 I_{1N}^2}, \quad (14)$$

где  $P_k$  – мощность короткого замыкания, Вт;  $u_a$  – активная составляющая напряжения короткого замыкания; %,  $m_1$  – число фаз подведенного к вентилям напряжения сети;  $k_{тр}$  – коэффициент трансформации трансформатора. Коэффициент трансформации в общем случае равен отношению напряжения первичной обмотки к напряжению вторичной или отношению чисел витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки, если они имеют одинаковые схемы соединения

$$k_{тр} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \quad (15)$$

В шестифазной нулевой схеме следует пользоваться тем линейным напряжением, которое в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного.

Активное сопротивление преобразователя, которое вносится в цепь постоянного тока, зависит от расчетного числа  $n_n$  последовательно включенных обмоток в сложных схемах, по которым протекает ток

$$R_n = n_n R_T, \quad (16)$$

где  $R_T$  – активное сопротивление обмоток одной фазы трансформатора, приведенное ко вторичной цепи, или обмотки токоограничивающего реактора. Расчетное число обмоток для различных схем приведено в табл.3.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной цепи  $X_T$ , Ом, (часто обозначается  $X_a$ ), вычисляется по формуле

$$X_T = \frac{u_p}{100} \cdot \frac{U_{1N}}{\sqrt{m_1 k_{тр}^2} I_{1N}}, \quad (17)$$

где  $u_p$  – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %.

При отсутствии технических данных реактивное сопротивление короткого замыкания можно принять равным 5 – 8 % независимо от мощности

трансформатора. Для мощных преобразователей вместо реактивной составляющей часто пользуются полным напряжением короткого замыкания ввиду их близости.

Вносимая в цепь постоянного тока индуктивность преобразователя  $L_n$ , Гн, определяется по формуле, аналогичной формуле (16),

$$L_n = \frac{n_n X_T}{\omega_c}, \quad (18)$$

где  $\omega_c$  – угловая частота сети, равная  $100\pi$  рад/с.

Фиктивное активное сопротивление преобразователя, Ом, обусловленное коммутацией вентилей, определяется по выражению

$$R_\gamma = k_\gamma \frac{P}{2\pi} X_T, \quad (19)$$

где  $k_\gamma$  – коэффициент, учитывающий особенности схем;  $p$  – пульсность преобразователя в целом (указана на рис. 2 - 4).

В однофазной мостовой схеме при коммутации ток во вторичной обмотке трансформатора изменяется на  $2I_d$  (от  $I_d$  до  $-I_d$ ), тогда как во всех остальных схемах ток изменяется только на  $I_d$  (от  $I_d$  до нуля или наоборот). Поэтому в однофазной мостовой схеме больше угол коммутации и удваивается потеря напряжения. Для этой схемы  $k_\gamma = 2$ .

Для простых многофазных схем  $k_\gamma = 1$ . У сложных схем с параллельным соединением простых через уравнивательный реактор ток в каждой простой схеме уменьшается вдвое, но одновременно приблизительно в два раза увеличивается индуктивное сопротивление рассеяния обмоток и формула (19) остается справедливой. У сложных преобразователей с последовательным соединением двух простых и питанием от трехобмоточных трансформаторов с последовательным соединением простых схем индуктивные сопротивления рассеяния, приведенные ко вторичной цепи, приблизительно удваиваются. В простых преобразователях протекает одинаковый ток во всех уравнивательных реакторах. Значения рассматриваемых коэффициентов для различных схем приведены в табл.3.

Таблица 3  
Расчетные коэффициенты различных схем преобразователей

Наименование схемы	$n_n$	$k_\gamma$	$k_\phi$	$k_{гр}$	$\alpha_F$
1	2	3	4	5	6
Однофазная мостовая	1	2	$\sqrt{2}$	1,00	2,5
Двухфазная нулевая	1	1	$\sqrt{2}$	1,00	
Трехфазная нулевая	1	1	$\sqrt{3}$	0,40	20,7

1	2	3	4	5	6
Трехфазная мостовая	2	1	$\sqrt{3}$	0,093	10,1
Шестифазная нулевая	1	1	$\sqrt{6}$		
Двойная трехфазная нулевая с уравнительным реактором	1	1	$\sqrt{3}$		
Две трехфазные мостовые с уравнительным реактором	2	1	$\sqrt{3}$	0,023	
Две последовательно соединенные трехфазные мостовые	4	2	$\sqrt{3}$	0,093	
Однофазная несимметричная мостовая	1*	1	$\sqrt{2}$	0,57	35,3
Трехфазная несимметричная мостовая	2*	1	$\sqrt{3}$	0,24	10,1

Примечание. Верхней звездочкой \* обозначены значения при  $\alpha = 0$ .

Индуктивные сопротивления токоограничивающих (анодных) реакторов, рассчитывают по номинальным первичным линейным напряжению и току

$$X_T = (0,04 - 0,06) \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}I_{1N}} \quad (20)$$

Индуктивное сопротивление, которое вносится в цепь выпрямленного тока, равно

$$X_{\Pi} = n_{\Pi} X_T \quad (21)$$

Активное сопротивление токоограничивающего реактора, мОм, при курсовом проектировании можно определить по эмпирической формуле

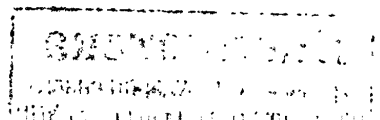
$$R_T = 220 \frac{U_{1N}^{0,74}}{I_{1N}^{1,42}} \quad (22)$$

Напряжение подставляется в вольтах, ток – в амперах.

Активное сопротивление, которое вносится в цепь якоря вычисляется по формуле

$$R_{\Pi} = n_{\Pi} R_T \quad (23)$$

аналогичной (21)



#### 4. ВЫБОР ВЕНТИЛЕЙ

В ходе проектирования выбираются типы вентиляей и их класс по напряжению. Тип полупроводникового вентиля определяется требуемым выпрямленным током и заданной перегрузочной способностью, а класс — максимальными повторяющимися (мгновенными) напряжениями. Длительно допускаемый средний ток вентиля в значительной степени зависит от условий его охлаждения. Поэтому вначале выбирают способ охлаждения.

Естественное воздушное охлаждение является бесшумным, удобным и наиболее надежным, но тиристоры при этом допускают ток в 1,6 – 2,5 раза меньше, чем при принудительном воздушном охлаждении. Преобразователи с естественным воздушным охлаждением имеют самые большие габариты. Оно используется в преобразователях небольшой мощности с номинальным выпрямленным током до 320 – 1600 А.

Принудительное воздушное охлаждение осуществляется с помощью вентилятора. Оно позволяет уменьшить габариты и массу преобразователя, а также количество параллельно включенных вентиляей в мощных преобразователях. Однако в случае отказа вентилятора ветровое реле подает звуковой сигнал и через несколько минут преобразователь должен быть отключен. Скорость охлаждающего воздуха обычно принимается 6 м/с, реже — 9 м/с. При скорости 12 м/с создается слишком большой шум и принимать ее не рекомендуется. Принудительное воздушное охлаждение используется при токах 320 – 12000 А.

Еще более эффективным является водяное охлаждение. Длительный максимально допустимый ток мощных тиристоров с водяным охлаждением (см. прил. 3) равен предельному и рассчитывать его нет необходимости. Неудобно то, что оно требует непрерывного водоснабжения чистой водой и отвода этой воды. Часто используют внутренний замкнутый контур дисциллированной воды, охлаждаемой проточной технической водой с температурой до 33 °С. Водяное охлаждение используется для самых мощных преобразователей на токи более 1 кА.

Правильно выбранные вентили должны длительно работать при номинальном токе с некоторым запасом, а при расчетных перегрузках температура *p-n* перехода не должна превышать максимально допустимую.

В дальнейшем будем рассматривать выбор только тиристоров, поскольку выбор диодов принципиальных отличий не имеет.

Во всех схемах преобразователей, кроме сложных с *последовательным* соединением простых, средний ток вентиля определяется числом вентиляей  $n_{ш}$ , подсоединенных к одной выходной шине: положительной (катодной) или отрицательной (анодной), исключая нулевые диоды,

$$I_{TAV} = \frac{I_{dN}}{n_{ш}} \quad (24)$$

При естественном охлаждении рекомендуется предварительно выбрать тиристор с предельным током, в 6-10 раз превышающим его средний ток и в два раза меньшим в случае принудительного охлаждения. В обозначении типа тиристора число, стоящее после трех цифр и дефиса, представляет предельный ток в амперах. Сведения о некоторых типах оптронных и триодных (с выводом управляющего электрода) тиристоров приведены в прил. 1, 2 и 3.

Если вентиляей на требуемый большой ток нет, то применяют параллельное соединение  $n_{\text{пар}}$  тиристоров. С учетом неравномерности распределения нагрузки допускаемый ток каждого тиристора в этом случае принимается на 20 % меньше, чем одиночного,

$$I_{TAV} = \frac{I_{aN}}{0,8n_{\text{пар}}n_{\text{ш}}} \quad (25)$$

В приводах небольшой мощности с токами вентиляей до 60 – 100 А используют оптронные тиристоры.

Максимальный длительно допускаемый средний ток тиристора  $I_{TAVm}$  зависит от температуры среды, конструкции охладителя, формы тока, угла проводимости и параметров тиристора. Поэтому после предварительного выбора следует убедиться в его правильности. Для этого вычисляют максимальный длительно допускаемый средний ток тиристора по формуле [5]

$$I_{TAVm} = \frac{\sqrt{U_{T(ТО)}^2 + 4k_{\phi}^2 r_T \frac{T_{jm} - T_a}{R_{thja}} - U_{T(ТО)}}}{2k_{\phi}^2 r_T} \quad (26)$$

где  $U_{T(ТО)}$  – пороговое напряжение тиристора в открытом состоянии, В;  $k_{\phi}$  – коэффициент формы тока тиристора, равный отношению действующего значения тока к среднему, для полностью сглаженного тока значения  $k_{\phi}$  приведены в табл. 3;  $r_T$  – дифференциальное сопротивление тиристора в открытом состоянии, Ом;  $T_{jm}$  – максимально допустимая температура  $p-n$  перехода, для силовых тиристоров на токи до 1 кА  $T_{jm} = 125^{\circ}\text{C}$  (см. прил. 3);  $T_a$  – температура окружающей (охлаждающей) среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_{thja}$  – тепловое сопротивление переход – охлаждающая среда с определенным охладителем,  $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ .

В курсовом проекте преобразователи разрабатываются для умеренного климата и с размещением в отопляемых помещениях (УХЛ4) с температурой воздуха в пределах от +1 до +40  $^{\circ}\text{C}$ . Так как тиристоры располагаются в шкафах и других конструкциях, где воздух дополнительно нагревается на 10-20  $^{\circ}\text{C}$ , то рекомендуется принимать температуру охлаждающей среды  $T_a = 50-60^{\circ}\text{C}$ .

Поскольку при написании методических указаний не удалось найти все требуемые параметры для оптронных тиристоров, то в прил. 1 приведены

приближенные значения длительно допускаемого среднего тока, которые можно использовать при курсовом проектировании без расчета по (26).

После определения  $I_{TAVm}$  вычисляют коэффициент запаса по току

$$k_{зт} = \frac{I_{TAVm}}{I_{TAV}} \quad (27)$$

Рекомендуется иметь коэффициент запаса  $k_{зт} = 2-3$ . Если он получился больше или меньше, то следует выбрать тиристор с меньшим или большим предельным током или изменить количество параллельно соединенных вентилялей.

При перегрузках среднеквадратичный выпрямленный ток не должен превышать номинальный в течение интервала времени длительностью 15 мин с наибольшим током, включающим перегрузку, то есть на остальной части интервала ток должен быть меньше номинального.

Полагая, что до перегрузки преобразователь длительно работал с номинальным выпрямленным током, найдем максимальное значение тока, которое может выдержать тиристор в течение заданного времени перегрузки (напр.,  $t_p = 15$  с) с полуторакратным запасом. Затем найдем ток преобразователя и сравним его с  $I_{я\max}$  (током перегрузки).

При номинальном токе установившаяся температура  $p-n$  перехода равна

$$T_{jN} = R_{thja} P_{TN} + T_a, \quad (28)$$

где

$$P_{TN} = U_{T(TO)} I_{aN} + r_T k_\phi^2 I_{aN}^2 \quad (29)$$

мощность рассеяния (потерь) тиристора в открытом состоянии при номинальном токе преобразователя, Вт.

Максимально допустимая мощность рассеяния, при которой за время перегрузки (например, 15 с) температура перехода достигает максимально допустимой величины, равна [5, с.66]

$$P_{T15} = \frac{T_{jm} - T_{jN}}{Z_{(th)15ja}}, \quad (30)$$

где  $Z_{(th)15ja}$  – переходное тепловое сопротивление  $p-n$  переход – охлаждающая среда в момент времени 15 с, °C/Вт. В справочной литературе [5] для каждого типа тиристора приводятся графики, позволяющие найти переходное тепловое сопротивление для любого момента времени и нескольких скоростей охлаждающей среды. При курсовом проектировании можно принимать переходное тепловое сопротивление  $Z_{(th)15ja} = (0,7 - 0,9) R_{thja}$ . Чем больше ток

тиристора, тем меньше коэффициент. В случае перегрузки длительностью 60 с  $Z_{(th)60s} \approx R_{thja}$  [15].

Рассмотрим расчет перегрузочной способности. Максимально допустимый ток предварительно нагретого тиристора за время перегрузки вычисляется по формуле

$$I_{TAV15m} = \frac{\sqrt{U_{T(TO)}^2 + 4k_{\phi}^2 r_T P_{T15}} - U_{T(TO)}}{2k_{\phi}^2 r_T} \quad (31)$$

Максимально допустимый ток перегрузки преобразователя с полупроводниковым запасом вычисляется так:

$$I_{d15m} = n_{ш} I_{TAVm} / 1,5 \quad \text{или} \quad I_{d15m} = 0,8n_{пар} n_{ш} I_{TAV15m} / 1,5. \quad (32)$$

Второе выражение используется при наличии параллельно включенных вентиляей.

Условие допустимости перегрузки длительностью менее 15 с  $I_{я,max} \leq I_{d15m}$ . Аналогично производится расчет, если задана длительность перегрузки 60 с.

Диоды несимметричных схем выбираются таким же образом.

Максимально допустимая температура  $p-n$  перехода у диодов существенно больше, чем у тиристоров. Следует обратить внимание на то, что максимальный средний ток диода, который входит в состав несимметричного моста, зависит от минимального угла управления  $\alpha_{min}$ . Ввиду неопределенности при курсовом проектировании этот угол можно принять равным нулю. Максимальный средний ток нулевого диода обычно в 2-3 раза больше среднего тока тиристоров и зависит от максимального угла управления, который определяется минимальной скоростью привода. При курсовом проектировании в этом расчете следует принять  $\alpha_{max} = \pi$ .

Приводим формулы для вычисления максимального среднего тока диода, который входит в состав несимметричного моста (выпрямленный ток предполагается полностью сглаженным) в номинальном режиме:

- в однофазной схеме  $I_{FAV} = I_{dN}(\pi - \alpha_{min})/2\pi, \quad (33)$

- в трехфазной схеме при  $\alpha \leq \pi/3$   $I_{FAV} = I_{dN}/3. \quad (34)$

Максимальный средний ток нулевого диода

- в однофазной схеме  $I_{FAV} = I_{dN} \alpha_{max} / \pi, \quad (35)$

- в трехфазной схеме при  $\alpha_{max} \geq \pi/3$   $I_{FAV} = I_{dN}(3\alpha_{max} - \pi)/2\pi. \quad (36)$



Выбор диодов по току производится по тем же формулам, что и тиристоров (26) и (31). Пороговое напряжение диодов обозначается  $U_{(т)}$ . Параметры диодов приведены в прил. 4.

Рассмотрим выбор класса тиристоров по напряжению. Тиристоры каждого типа выпускаются на различные максимально допустимые повторяющиеся напряжения в прямом закрытом состоянии  $U_{DRMm}$  и в обратном направлении  $U_{RRMm}$ , которые считаются равными и кратными 100 В в большей части диапазона. У правильно выбранного тиристора все максимально допускаемые импульсные напряжения (рабочее, повторяющееся и неповторяющееся в прямом закрытом и обратном направлениях) должны быть больше соответствующих напряжений, которые возникают при работе преобразователя, с запасом не менее 50 – 100 %.

Максимальное импульсное рабочее напряжение определяется по формуле

$$U_{RWM} = \sqrt{2} k_{cn} U_{2N}, \quad (37)$$

где  $k_{cn}$  – коэффициент, учитывающий возможное повышение напряжения в сети, обычно  $k_{cn} = 1,10$ , иногда принимают  $k_{cn} = 1,15$ . В формуле (37) для шестифазной и двухфазной нулевых схем линейное напряжение следует принимать равным удвоенному фазному.

Максимально допускаемые напряжения определяются для каждого тиристора индивидуально и нельзя превышать их даже на несколько микросекунд. Для уменьшения повторяющихся и неповторяющихся напряжений в каждом преобразователе используется несколько устройств [11], одним из которых обязательно являются RC-цепочки, которые подключаются параллельно всем вентилям. Параллельные вентили могут использовать одну общую RC-цепочку.

Тиристоры должны быть выбраны так, чтобы все максимально допускаемые ими напряжения превышали расчетные и экспериментально проверенные импульсные рабочее, повторяющееся и неповторяющееся напряжения, то есть должны быть выполнены условия:  $U_{RWMm} > U_{RWM}$ ;  $U_{RRMm} > U_{RRM}$ ;  $U_{RSMm} > U_{RSi}$ .

Расчет всех этих напряжений довольно сложен, поскольку он должен учитывать конструкцию преобразователя (компоновку элементов) и вероятные перенапряжения. Основными напряжениями, которые учитываются при выборе тиристоров по напряжению, являются максимально допустимые *повторяющиеся* импульсные равные напряжения: обратное  $U_{RRMm}$  и прямое в закрытом состоянии  $U_{DRMm}$ . В каталогах и справочной литературе приводятся только максимальные значения этих напряжений для каждого типа тиристоров и поэтому индекс  $m$  опускается. При заказе вентиля указывается их *класс*, численно равный целой части числа  $U_{RRMm}/100$ . У обычных (не лавинных) тиристоров  $U_{RWMm} = 0,8 U_{RRMm}$ . Исходя из импульсного рабочего напряжения и коэффициента запаса по напряжению  $k_{з.н} = 1,5 - 2,0$  формула для определения класса вентиля имеет вид:

$$\text{Класс вентиля} = \left[ \frac{k_{з.н} U_{RWM}}{0,8 \cdot 100} + 1 \right]. \quad (38)$$

Заклучение числа в квадратные скобки обозначает отбрасывание его дробной части.

## 5. ВЫБОР РЕАКТОРОВ

В тиристорных выпрямительно-инверторных преобразователях могут использоваться, кроме токоограничивающих, следующие реакторы:

- 1) сглаживающий, который уменьшает пульсации тока якоря двигателя;
- 2) уравнильный, усредняющий мгновенные значения напряжения параллельно включенных вентиляльных комплектов, которые работают со сдвигом фаз питающего напряжения для увеличения пульсности в сложных схемах преобразователей;
- 3) уравнильные (ограничивающие), ограничивающие величину уравнильного тока двух вентиляльных комплектов реверсивного преобразователя при совместном управлении.

В прошедшие времена реакторы назывались также дросселями. С 1974 г. по ГОСТ 18624-73 принято, что термин "дроссель" является недопустимым.

Для определения требуемых индуктивностей реакторов в дальнейшем необходимо знать индуктивность якорной цепи двигателя. Если величина этой индуктивности не задана, то ее величину в Гн можно вычислить по приближенной формуле Линвилля-Уманского

$$L_{я} = \frac{C_L U_{яN}}{n_N p_n I_{яN}}, \quad (39)$$

где  $C_L$  — постоянная, равная 1-2,5 для компенсированных двигателей (меньшая величина относится к большинству хорошо компенсированных двигателей и к тихоходным),  $C_L = 3-4$  для быстроходных некомпенсированных двигателей,  $C_L = 4-6$  — для некомпенсированных двигателей ( $n_N > 1800$  об/мин);  $n_N$  — номинальная частота вращения двигателя, об/мин;  $p_n$  — число пар полюсов двигателя. При курсовом проектировании можно считать компенсированными двигатели мощностью более 30 кВт, с номинальным напряжением менее 100 В (высокомоментные) и при перегрузочной способности более 2.

Индуктивность сглаживающего реактора в цепи якоря двигателя выбирается исходя из условия ограничения заданной величины пульсаций тока якоря. Для того чтобы величина действующего значения переменной составляющей тока якоря не превышала допустимой величины, выраженной в относительных единицах  $I_{я(p)^*} = I_{я(p) \text{ доп}} / I_{яN}$ , индуктивность сглаживающего реактора должна быть, Гн,

$$L_{с.р} \geq \frac{E_{d(p)^*}}{p\omega_c I_{я(p)^*}} \cdot \frac{E_{d0}}{I_{яN}} - (L_{я} + L_{п} + L_{γ}), \quad (40)$$

где  $E_{d(p)^*}$  - относительная величина действующего значения ЭДС низшей гармоники преобразователя; ее величина указана в табл. 4. Допускаемая величина переменной составляющей указывается заводом-изготовителем двигателя. При курсовом проектировании следует использовать указанные в задании допустимые относительные пульсации тока якоря  $I_{я(p)}$ .

Таблица 4

Относительные величины действующего значения ЭДС низшей гармоники преобразователя и значения коэффициентов граничного тока для схем с различной пульсностью

$p$	2	3	6	12
$E_{d(p)^*}$	0,62	0,32	0,13	0,06
$k_{гр}^*$	1,000	0,395	0,093	0,023

Индуктивность  $L_{у.п}$ , Гн, двух полуобмоток уравнительного реактора, который устанавливается для увеличения пульсности двух *параллельных* комплектов вентилях в сложной схеме, находится исходя из максимальной величины намагничивающего тока  $(0,01 - 0,02)I_{яN}$  и для трехфазных нулевых схем вычисляется по формуле полученной из [14]

$$L_{у.п} = (23 - 7,8) \frac{U_{2фN}}{\omega_c I_{яN}} \quad (41)$$

В случае трехфазных мостовых схем

$$L_{у.п} = (3 - 1) \frac{U_{2N}}{\omega_c I_{яN}} \quad (42)$$

Индуктивность якорной цепи этот реактор не изменяет, поскольку ток якоря протекает по двум параллельным полуобмоткам, которые включены встречно.

Активное сопротивление сглаживающих реакторов со стальным магнитопроводом можно вычислять по предложенной нами эмпирической формуле

$$R = \frac{78L}{I_N^{0,52}} \quad (43)$$

Если индуктивность подставляется в миллигенри, то сопротивление получается в миллиомах (если в генри, то в омах). Подставлять следует

номинальный ток *реактора*, А. Поскольку реактор не рассчитывается, то студенты могут подставить в формулу номинальный ток преобразователя. В цепь якоря входит четвертая часть сопротивления, реакторов удваивающих пульсность (см. рис.3)

$$R_y = R_{yp}/4. \quad (44)$$

Необходимая индуктивность контура уравнивающего тока в реверсивном преобразователе с совместным управлением рассчитывается по формуле

$$L_{y,k} \geq k_{yp} \frac{E_{d0}}{\omega_c I_{yp}}, \quad (45)$$

где  $k_{yp}$  – коэффициент среднего уравнивающего тока, зависящий от схемы преобразователя, магнитной связи обмоток, угла управления и угла рассогласования;  $I_{yp}$  – принятая величина среднего значения уравнивающего тока при номинальной скорости, А. Обычно принимают  $I_{yp} = 0,1 I_{ян}$ . Наиболее распространенные схемы реверсивных преобразователей приведены в [1, 3 с.94 и 126-128] и др. Графики  $k_{yp}$  для различных схем при отсутствии магнитной связи и угле рассогласования, равном нулю, приведены в [1]. В курсовом проекте следует принимать для трехфазной нулевой схемы при встречно-параллельном включении простых преобразователей  $k_{yp} = 0,68$ , для трехфазных мостовых при встречно-параллельной схеме соединения  $k_{yp} = 0,34$ , для трехфазных мостовых при перекрестном соединении и шестифазных нулевых при встречно-параллельном соединении  $k_{yp} = 0,186$ . При расчете преобразователя с пульсностью, равной двум, в (45) следует подставлять коэффициент  $k_{yp} = 1,27$ . Влияние магнитной связи и угла рассогласования  $\alpha_p$  на уравнивающие токи частично рассмотрено в [11, с. 165-177].

Индуктивность каждого уравнивающего реактора, ограничивающего ток в цепи вентильных комплектов реверсивного преобразователя, равна

$$L_{y,p} = \frac{L_{y,k}}{n_{y,k}}, \quad (46)$$

где  $n_{y,k}$  – количество уравнивающих (ограничивающих) реакторов в контуре уравнивающего тока, определяется по схеме силовых цепей, в нулевых схемах  $n_{y,k} = 2$ , в мостовых схемах возможны  $n_{y,k} = 1$  и 2.

В цепь якоря входит индуктивность одного или двух реакторов

$$L_y = n_{y,y} L_{y,p} k_{нас}, \quad (47)$$

где  $n_{y,y}$  – количество уравнивающих реакторов, которые входят в цепь якоря (смотреть по схеме силовых цепей);  $k_{нас}$  – коэффициент насыщения

уравнительного реактора при токе перегрузки, для ненасыщающегося реактора он равен единице. Если реакторы насыщающиеся, то их индуктивность зависит от величины тока. Ориентировочно можно полагать, что при номинальном токе индуктивность уменьшается в 5 – 10 раз ( $k_{нас} = 0,2 - 0,1$ ). При курсовом проектировании активное сопротивление уравнительных реакторов в цепи якоря вычисляется также по формуле (43), исходя из насыщенной индуктивности  $L_y$ .

Для построения внешних характеристик необходимо знать максимальный граничный ток (при  $\alpha = 90^\circ$ )

$$I_{я.гр.мах} = \frac{k_{гр} E_{d0}}{\omega_c L_{я.ц}}, \quad (48)$$

где  $k_{гр}$  – коэффициент граничного тока, зависящий от схемы силовых цепей и пульсности преобразователя. Значения  $k_{гр}$  приведены в табл. 4.

Если защита тиристоров мостового преобразователя от токов короткого замыкания на выводах двигателя осуществляется увеличением угла управления с последующим отключением контактором, то для ограничения скорости нарастания тока короткого замыкания до величины, при которой контакторы могут разорвать цепь [3, с.132], необходима индуктивность сглаживающего реактора, превышающая

$$L_{о.к.з} = \frac{2,1U_{2N}}{\omega_c (I_{TSMm} - I_{dN})} - L_{ц} - L_y, \quad (49)$$

где  $I_{TSMm}$  – допустимое значение ударного неповторяющегося тока тиристора в открытом состоянии при длительности его протекания 10 мс и максимально допустимой температуре перехода, А. Значения  $I_{TSMm}$  приведены в приложениях. При последовательном соединении простых схем номинальное напряжение в (49) следует умножить на их количество.

## 6. РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Вначале рассчитываются внешние характеристики  $E_d(I_{я})$  системы ТП-Д. Предварительно находят приближенную границу (полагая  $R_{яц} = 0$ ) между зонами прерывистого и непрерывного токов при  $\alpha_F < \alpha < \alpha_S$ .

Координаты границы для симметричных схем

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha, \quad (50)$$

$$I_{я.гр} = k_{гр} \frac{E_{d0}}{\omega_c L_{я.ц}} \sin \alpha. \quad (51)$$

Для несимметричных схем

$$E_d = E_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}. \quad (52)$$

Граничный ток несимметричной двухпульсной схемы

$$I_{я.гр} = \frac{E_{d0}}{2\omega_c L_{я.ц}} \left[ \sin \alpha + \alpha - \frac{\pi}{2}(1 - \cos \alpha) \right]. \quad (53)$$

Граничный ток несимметричной трехфазной мостовой схемы при  $\alpha \leq \pi/3$

$$I_{я.гр} = \frac{E_{d0}}{2\omega_c L_{я.ц}} \left[ \sin \alpha + \alpha + \frac{2\pi}{3} \cos \left( \alpha + \frac{\pi}{3} \right) - \frac{\pi}{3} \cos \alpha \right], \quad (54)$$

при  $\alpha \geq \pi/3$

$$I_{я.гр} = \frac{E_{d0}}{2\omega_c L_{я.ц}} \left[ \frac{\pi}{3} \cos \alpha + \sin \alpha + \alpha - \frac{2\pi}{3} \right]. \quad (55)$$

Далее задаются несколькими (5 – 7) значениями напряжения управления  $U_{y1}$  в пределах, соответствующих указанным углам  $\alpha$ . При согласованном управлении и косинусоидальном развертывающем напряжении для первого вентиляльного комплекта

$$\alpha_1 = \arccos(U_{y1}/U_{pm}), \quad (56)$$

где  $U_{pm}$  – амплитуда развертывающего напряжения. Максимальное напряжение управления равно амплитуде развертывающего. Его удобно принять 10 В.

В случае пилообразного развертывающего напряжения

$$\alpha_I = 90 \left( 1 - \frac{U_{yI}}{U_{y\max}} \right), \quad (57)$$

где  $U_{y\max}$  – максимальное напряжение управления (обычно 10 В).

По этим же уравнениям строят фазовые характеристики при согласованном управлении для первого вентильного комплекта. Для построения фазовых характеристик второго вентильного комплекта следует в формулы (56) и (57) подставлять напряжение управления вторым вентильным комплектом  $U_{yII} = -U_{yI}$ . Не рекомендуется рассчитывать характеристики во всех режимах при  $\alpha < \alpha_F$  и  $\alpha > \pi - \alpha_F = \alpha_S$ .

При токах, превышающих граничный (в режиме непрерывного тока), внешние характеристики являются прямыми линиями

$$E_{\text{я}} = E_d(\alpha) - R_{\text{я}} I_{\text{я}} - (\Delta U_{\text{щ}} + n_{\text{пос}} \Delta U_{\text{T}}) \text{sign} I_{\text{я}}, \quad (58)$$

где  $\Delta U_{\text{щ}} = 2$  В – падение напряжения на щеточных контактах двигателя;  $n_{\text{пос}} \Delta U_{\text{T}}$  – прямое падение напряжения на открытых тиристорах, равное произведению числа тиристорov, по которым последовательно протекает ток якоря (в мостовых схемах брать две фазы), на среднее падение на каждом из них, равное 1,1 – 1,5 В (точнее  $U_{T(TO)} + r_m I_{TAV}$ );  $R_{\text{я}}$  – эквивалентное активное сопротивление цепи якоря.

При номинальном напряжении двигателя 220 В и более падениями напряжения на щетках и вентилях часто пренебрегают ввиду их малости и постоянства.

Эквивалентное активное сопротивление якорной цепи

$$R_{\text{я}} = R_{\text{я}} + R_{\text{γ}} + R_{\text{с.р}} + n_{\text{п}} R_{\text{T}} + R_{\text{γ}}. \quad (59)$$

В режиме прерывистого тока в начале находят  $E_{\text{я}0}$  – минимальную ЭДС якоря при  $I_{\text{я}} = 0$ . Полагая, что используются широкие импульсы управления тиристорами, при малых  $\alpha < \pi/p$

$$E_{\text{я}0} = \sqrt{2} U_{2N}, \quad (60)$$

где  $U_{2N}$  – номинальное фазное напряжение для нулевых схем и линейное напряжение для мостовых схем. В случае последовательного соединения двух схем напряжение следует удвоить.

При больших углах управления ( $\alpha > \pi/p$ ):

$$E_{\text{я}0} = \sqrt{2} U_{2N} \sin \left( \alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{p} \right). \quad (61)$$

Здесь для несимметричной трехфазной мостовой схемы следует подставлять  $p = 2$ .

Затем, задаваясь рядом значений угла проводимости  $\lambda$ , рад, с равным шагом  $\Delta\lambda$  от  $\Delta\lambda$  до  $2\pi/p$ , вычисляют  $E_{я}$  и  $I_{я}$  и по ним строят характеристики. Для симметричных схем:

$$E_{я} = \sqrt{2} U_{2N} \cos \varphi \frac{\cos \left( \alpha - \frac{\pi}{p} - \varphi + \lambda \right) - \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{p} - \varphi \right) \cdot e^{-\lambda \operatorname{ctg} \varphi}}{1 - e^{-\lambda \operatorname{ctg} \varphi}}, \quad (62)$$

$$I_{я} = \frac{P}{2\pi R_{яц}} \left\{ \sqrt{2} U_{2N} \left[ \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{p} + \lambda \right) - \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{p} \right) \right] - \lambda E_{я} \right\}, \quad (63)$$

где  $R_{яц} = R_{с.р} + n_{ц} R_{г} + R_{г} = R_{з} + R_{г}$  (64)

активное сопротивление якорной цепи;

$$\operatorname{ctg} \varphi = \frac{R_{яц}}{\omega_c L_{яц}}, \quad \cos \varphi = \frac{\omega_c L_{яц}}{\sqrt{R_{яц}^2 + (\omega_c L_{яц})^2}}. \quad (65)$$

ЭДС якоря в режиме прерывистого тока с учетом активных сопротивлений можно найти по формуле

$$E_{я} = E_d - R_{яц} I_{я}. \quad (66)$$

Таблица 5

Формулы для расчета внешних характеристик однофазной несимметричной схемы в режиме прерывистого тока при  $\alpha \geq \pi/2$  и  $R_{яц} = 0$

$\lambda \leq \pi - \alpha_F$	$E_d = \frac{\pi E_{d0}}{2\lambda} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \lambda)]$
	$I_{я} = \frac{E_{d0}}{2\omega_c L_{яц}} \left[ \frac{\lambda}{2} \cos \alpha - \sin(\alpha + \lambda) + \sin \alpha + \frac{\lambda}{2} \cos(\alpha + \lambda) \right]$
$\lambda \geq \pi - \alpha$	$E_d = \frac{\pi E_{d0}}{2\lambda} (1 + \cos \alpha)$
	$I_{я} = \frac{E_{d0}}{2\omega_c L_{яц}} \left( \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2} \cos \alpha + \sin \alpha + \alpha - \pi \right)$



Формулы для расчета характеристик несимметричной трехфазной мостовой схемы в режиме прерывистого тока при  $\alpha \geq \pi/2$  и  $R_{\text{яи}} = 0$

$\lambda \leq \pi - \alpha$	$E_d = \frac{\pi E_{d0}}{m\lambda} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \lambda)]$
	$I_a = \frac{E_{d0}}{\omega_c L_{\text{яи}}} \frac{1}{4} [\lambda \cos \alpha + \lambda \cos(\alpha + \lambda) + 2 \sin \alpha - 2 \sin(\alpha + \lambda)]$
$\lambda \geq \pi - \alpha$	$E_d = \frac{\pi E_{d0}}{m\lambda} (1 + \cos \alpha)$
	$I_a = \frac{E_{d0}}{\omega_c L_{\text{яи}}} \frac{1}{4} (\lambda \cos \alpha + 2 \sin \alpha + \lambda + 2\alpha - 2\pi)$

Для построения регулировочной характеристики  $E_d(U_{y1})$  следует выполнить промежуточные вычисления угла управления по (56), (57).

Ограничительная характеристика в режиме непрерывного тока при выполнении курсового проекта рассчитывается по упрощенной формуле

$$E_{\text{я,о.п}} \approx -0,99E_{d0} - (R_{\text{я.и}} - R_r)I_a. \quad (67)$$

Окончательно строятся не внешние  $E_a(I_a)$ , а механические характеристики  $\omega_c(M)$ . Для этого находят коэффициент двигателя

$$c = k\Phi_N = \frac{U_{\text{яN}} - R_r I_{\text{яN}} - \Delta U_{\text{ш}}}{\omega_N}, \quad (68)$$

а затем вычисляют электромагнитный момент и скорость:

$$M = cI_a \quad \text{и} \quad \omega = E_a/c. \quad (69)$$

Механические характеристики реверсивных преобразователей строятся в четырех квадрантах. На них наносятся линии, соответствующие номинальному и максимальному ( $\lambda_l, M_N$ ) электромагнитным моментам, линии, соответствующие положительной и отрицательной номинальным скоростям, ограничительная характеристика и линия раздела между режимами прерывистого и непрерывного тока. На механических характеристиках указываются напряжения управления (не углы  $\alpha$ ). В случае мощных двигателей зона прерывистого тока может оказаться очень узкой. Не надо расстраиваться. и пытаться её увеличить. Вычерчивайте такой как она есть.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ОПТРОННЫХ ТИРИСТОРОВ

Тип тиристора	$I_{TAV}$ , А	Класс	$I_{TAVm}$ , А	$I_{TSMm}$ , А	$U_{y.от}$ ( $U_{GT}$ ), В	$I_{y.от}$ ( $I_{GT}$ ), МА
ТО125-10	10	1-14	5,1	250	2,5	80
ТО125-12,5	12,5		6,6	350		
ТО132-25	25	6-12	13	600		150
ТО132-40	40		15	750		
ТО142-50	50		17	800		
ТО142-63	63		21	1200		
ТО142-80	80		23	1350		

Условные обозначения:  $I_{TAV}$  – максимально допустимый (предельный) средний ток при заданной температуре в определенной точке корпуса согласно техническим условиям;  $I_{TAVm}$  – максимально допустимый средний ток в условиях проектируемого преобразователя;  $I_{TSMm}$  – ударный неповторяющийся ток с длительностью до 10 мс при начальной температуре  $p-n$  перехода 100 °С; максимально допустимая температура  $p-n$  перехода 100 °С, для тиристорov TO-125-10 и TO125-12,5 - 110 °С.

Приложение 2

## ПАРАМЕТРЫ МОЩНЫХ ТРИОДНЫХ ТИРИСТОРОВ

Тип тиристора	Класс	$U_{T(ТО)}$ , В	$r_T$ , мкОм	$R_{thja}$ , °С/Вт	$I_{TSMm}$ , кА	$U_{GT}$ , В	$I_{GT}$ , МА
T273-1250	18-25	1,30	0,365	0,02698*	32	5,0	400
T273-1600	20-26	1,00	0,150	0,03270*	38	6,0	400
T273-2000	18-25	0,95	0,150	0,02568*	45	3,5	300
T193-2000	54-60	1,30	0,235	0,01661*	50	3,5	400
T193-2500	26-34	1,10	0,140	0,01767*	70	3,5	400
T193-3200	16-24	1,00	0,070	0,01776*	75	3,5	400
T173-3200	2-10	0,83	0,067	0,02333*	60	2,5	300
T173-5000	1-8	0,85	0,047	0,01543*	62	2,5	300

Примечания: 1. Значения тепловых сопротивлений даны для курсового проектирования (\* не каталожные) при водяном охлаждении с расходом воды 3 л/мин при температуре 30 °С. 2. Максимально допустимая температура  $p-n$  переходов у тиристорov типа T173-5000 равна 150 °С, у тиристорov типа T173 - 3200 - 140 °С. У тиристорov типов T273-1250, T273-1600 и T193-2000 максимально допустимая температура  $p-n$  переходов равна 120 °С, у всех остальных тиристорov  $T_{jm} = 125$  °С.

## ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ ТРИОДНЫХ ТИРИСТОРОВ

Тип тиристора	Класс	$U_{(TO)}$ , В	$R_T$ , мОм	$R_{thja}$ , °С/Вт		$I_{TSMm}$ , кА
				$V=0$	$V=6$ м/с	
T112-10	1-12	1,25	29,30	13,3	4,9*	0,15
T112-16	1-12	1,20	11,90	10,2	3,9*	0,20
T122-20	1-12	1,15	17,20	4,00	1,6*	0,30
T122-25	1-12	1,10	10,90	3,90	1,5*	0,35
T132-40	1-12	1,05	5,60	3,27	1,48	0,75
T132-50	1-12	1,03	4,60	3,07	1,40	0,80
T142-63	1-12	0,95	4,10	2,84	1,30	1,20
T142-80	1-12	0,93	3,20	2,63	1,19	1,35
T132-16	13-20	1,40	23,90	3,53	1,5*	0,24
T132-25	13-20	1,30	11,50	3,73	1,4*	0,36
T142-32	13-20	1,25	9,50	3,38	1,3*	0,42
T142-50	13-20	1,20	6,40	2,86	1,2*	0,82
T152-63	13-20	1,15	5,30	2,73	1,15	1,10
T152-80	13-20	1,10	4,10	2,67	1,14	1,20
T151-100	3-16	1,15	2,54	2,06	1,881	2,00
T161-125	3-16	1,15	1,80	1,36	0,471	2,50
T161-160	3-16	1,15	1,40	1,41	0,479	4,00
T171-200	3-16	1,15	1,00	0,824	0,326	5,00
T171-250	3-16	1,05	0,83	0,818	0,328	6,00
T171-320	3-16	1,00	0,55	0,840	0,328	7,00
T123-200	4-16	1,10	1,50	0,788	0,268	3,30
T123-250	4-12	1,00	1,08	0,784	0,277	4,50
T133-320	9-20	1,20	1,10	0,723	0,225	6,00
T133-400	4-16	1,05	0,68	0,444	0,137	7,00
T143-400	18-24	1,20	0,95	0,321	0,115	8,00
T143-500	4-16	1,10	0,57	0,335	0,119	10,00
T143-630	4-12	1,0	0,43	0,323	0,119	12,00
T153-630	13-24	1,25	0,55	0,305	0,109	14,00
T153-800	10-18	1,15	0,34	0,297	0,102	16,00
T253-800	20-24	1,20	0,44	0,290	0,909	17,50
T253-1000	10-18	1,10	0,25	0,264	0,100	22,00

Примечания: 1.  $V$  – скорость охлаждающего воздуха, м/с.

2. Максимально допустимая температура  $p-n$  перехода у всех тиристорov  $T_{jm} = 125$  °С.

3. Звездочкой \* отмечены предполагаемые значения.

## ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ ДИОДОВ

Тип диода	Класс	$U_{(TO)}$ , В	$r_T$ , МОм	$R_{thja}$ , °С/Вт		$I_{FSMm}$ , кА
				$V=0$	$V=6$ м/с	
Д112-10	1 – 14	0,9	17,5	16,91	12,19	0,23
Д112-16		0,9	10,5	12,34	8,87	0,27
Д112-25		0,9	6,1	8,51	5,56	0,33
Д122-32		0,85	5,0	7,98	4,42	0,44
Д122-40		0,85	4,0	6,42	3,51	0,55
Д132-32		0,83	3,6	5,19	2,69	1,0
Д132-63		0,83	2,8	4,1	2,11	1,1
Д132-80		0,83	2,1	3,47	1,62	1,2
Д141-100		3 – 16	0,95	1,6	2,52	1,23
Д151-125	0,90		1,3	2,16	0,914	2,4
Д151-160	0,90		1,0	2,14	0,941	3,3
Д161-200	0,90		0,80	1,32	0,477	6,0
Д161-250	0,90		0,64	1,30	0,486	7,0
Д161-320	0,90		0,50	1,28	0,496	8,2
Д171-400	0,99		0,56	1,40	0,356	12,0
Д133-400	10 – 40	1,0	0,95	0,617	0,180	7,5
Д133-500	10 – 28	1,0	0,57	0,573	0,170	10,0
Д133-800	4 – 16	1,0	0,27	0,225	0,172	13,0
Д143-630	10 – 40	1,0	0,65	0,312	0,118	10,0
Д143-800	10 – 28	1,0	0,32	0,323	0,142	15,0
Д143-1000	4 – 16	0,9	0,26	0,309	0,119	18,0
Д253-1600	4 – 20	1,0	0,12	0,302	0,113	28,0

Примечания: 1. Диоды на ток 10-80 А выпускаются на напряжения с 1 по 14 классы. Диоды на ток 100-1600 А выпускаются на напряжения с 3 по 16 классы.

2. Максимально допустимая температура  $p$ - и переходов у всех диодов  $T_{jm} = 190$  °С. Исключениями являются диоды типа Д133 на токи 400 и 630 А, у которых  $T_{jm} = 150$  °С, и диоды Д143 на токи 500 и 800 А, у которых  $T_{jm} = 175$  °С.

3. Тепловые сопротивления приведены для естественного охлаждения ( $V=0$ ).

## ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

На основании технических данных двигателя постоянного тока и требований к электроприводу выполнить электрический расчет тиристорного выпрямительно-инверторного преобразователя (управляемого выпрямителя) и его системы управления, рассчитать характеристики разомкнутой системы ТП-Д. Преобразователь выполняется на *нестандартное* выходное напряжение и на стандартный ток, реверсивным с отдельным управлением, если нет дополнительных указаний.

## СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЕКТА

Курсовой проект оформляется в виде пояснительной записки, выполненной в соответствии со "Стандартом предприятия СТП УПИ 1-96". В пояснительной записке должны содержаться обоснования всех принятых решений, расчеты и необходимые для понимания записки рисунки. Обоснования и формулы должны сопровождаться ссылками на литературные источники за исключением материалов, содержащихся в методических указаниях к данному проекту.

В пояснительной записке должны быть следующие материалы:

1. ЗАДАНИЕ.
2. ВЫБОР СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.
3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ИЛИ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ РЕАКТОРОВ.
4. ВЫБОР ВЕНТИЛЕЙ.
5. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРОВ.
6. ВЫБОР СХЕМ ЯЧЕЕК СИФУ.
7. РАСЧЕТ ФАЗОВОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИК.
8. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЯЧЕЕК СИФУ

*Графическая часть* выполняется на листе чертежной бумаги формата А1 (564 x 841) и включает:

1. Принципиальную схему силовых цепей системы ТП-Д, включая первичные обмотки трансформатора, если он имеется, с коммутационной и защитной аппаратурой и RC-цепочками без указания типов и параметров.

2. Функциональную схему преобразователя с системой импульсно-фазового управления.

3. Векторную диаграмму напряжений одной фазы, включающую напряжения на первичной и вторичной обмотках ТСУ; напряжение, которое подводится к аноду тиристора, и выходное напряжение ФСН.

4. Фазовую характеристику СИФУ и регулировочную характеристику системы ТП-Д в режиме непрерывного тока.

5. Механические характеристики разомкнутой системы ТП-Д не менее чем для пяти значений напряжения управления. На механических характеристиках должны быть проведены линии, соответствующие границе между зонами прерывистого и непрерывного тока ( $R_{я.д} = 0$ ), номинальной скорости, номинальному моменту, моменту перегрузки (полагать момент пропорциональным току) и ограничительная характеристика в инверторном режиме.

В начале записки приводится СОДЕРЖАНИЕ, в конце должны быть ЗАКЛЮЧЕНИЕ и БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

Приложение 6

### ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ (РАБОТЕ)

№ вар.	$P_N$ , кВт	$U_{яN}$ , В	$I_{яN}$ , А	$n_N$ , об/мин	$R_{я.дв}$ , МОм	$t^\circ$ , °С	Кл. из.	$L_{я}$ , мГн	$\lambda_1$	$t_{п}$ , с	$I_{я(p)}$ , %	Доп. требов.
1	55	440	141	560	146	20	Н	—	2,5	60	10	4
2	5000	930	5640	400	3,88	20	F	—	2,2	15	2	8
3	1,5	110	19,5	1500	775	15	B	4,8	1,9	60	20	К
4	22	440	60,9	3000	302	15	F	6,3	1,8	60	12	2
5	—	56	24	1000	139	20	F	0,8	8	15	15	7
6	185	220	920	450	6,6	20	Н	—	2,5	60	8	9
7	1,5	220	9,74	1500	110	15	B	19,5	1,7	15	12	5
8	5,3	110	57,7	2200	94	15	F	1,3	1,6	60	13	1
9	4000	930	4600	100	6,67	20	F	-	2	15	2,5	К
10	5,3	220	28,9	2200	416	15	F	5,2	2	60	7,5	2
11	—	66	78,5	550	31,7	15	Н	0,34	6	15	8	6
12	220	220	1099	1500	4,7	15	B	—	1,8	15	5	3
13	53	440	133	2360	92	15	B	2,1	1,9	60	12	1
14	55	220	282	550	35,6	20	Н	—	1,6	15	10	7
15	3150	930	3650	90	9,55	20	F	—	1,8	15	3,5	3
16	2,5	220	15	2200	1470	15	B	—	2	60	13	5
17	8	440	21	2200	917	15	F	16	1,5	15	14	8К
18	22	220	116	650	108,5	15	Н	—	2,5	60	10	1
19	0,20	36	7	3000	500	20	F	20	3,6	15	22	8
20	110	440	279	1500	49,4	15	B	—	1,7	60	9	5
21	3,2	220	17,6	1600	841	15	F	11,6	1,9	15	18	3
22	15	440	39,6	1500	559	15	B	11	1,5	60	15	9
23	90	220	463	1060	17,3	15	B	—	1,5	15	6	4
24	4500	930	5300	45	7,98	20	F	0,98	2	15	2,4	8
25	—	47	24	600	123	15	Н	15	1,8	60	8	6
26	36	220	192	575	54	20	Н	—	2,4	60	7	4

27	160	440	404	1900	18,7	15	B	—	1,6	60	5	8
28	1,3	220	8,2	800	3360	15	F	43	1,9	15	15	9
29	75	440	186	3150	51	15	B	1,2	1,8	60	7	5
30	26	220	134	2240	63	15	B	1,2	1,4	60	10	3
31	37	440	96	575	210	20	H	-	2,5	60	15	3,М
32	132	220	662	1500	34	15	B	-	1,6	15	10	2
33	8	220	42	2240	246	15	F	4,6	3,6	60	18	8
34	160	440	404	1900	18,7	15	B	-	1,8	15	12	К
35	2,0	220	13,5	2240	1115	15	B	14	5,0	15	15	3
36	1,3	440	4,04	800	1191	15	F	163	6,0	60	20	8
37	185	440	460	450	26	20	H	-	2,2	60	9	2
38	3,0	110	35,5	1600	209	15	F	2,9	4,0	60	25	1
39	160	220	808	1500	6,5	15	B	9,3	1,8	60	15	К
40	2,5	220	15	2200	1470	15	B	9,3	4	15	15	К
41	3150	930	3730	56	11,1	20	F	-	1,6	15	2	М
42	2,0	110	23,3	3000	336	15	B	3,6	5	60	9	5,7
43	150	440	370	490	32,4	20	H	-	2,2	15	11	3,М
44	90	220	462	1060	17,3	15	B	-	2,6	15	13	2
45	15	100	160	1500	35	15	B	0,7	3	60	14	8
46	2500	930	2860	160	9,92	20	F	-	1,5	60	3	К
47	26	220	268	2240	63	15	B	1,2	2,4	60	6	2
48	8	110	84,6	2240	61	15	F	1,1	3,5	60	8	1
49	22	220	61,2	3000	75	15	F	1,6	2	15	8	М
50	185	220	920	450	6,6	20	H	-	2,1	60	4	4
51	132	440	331	1500	36,8	15	B	-	2	15	4	2
52	0,25	36	10	3000	420	20	F	-	6	15	25	7,9

Использованные в заглавии сокращения: Кл.из. – класс нагревостойкости изоляции; Доп. треб. – условные обозначения дополнительных требований, которые должны быть выполнены в проекте.

Дополнительные требования:

- 1- работа только в первом квадранте механической характеристики (ток и ЭДС преобразователя только положительные);
  - 2- допустима длительная бестоковая пауза при реверсе (более 1 с);
  - 3- максимальная частота вращения не превышает 0,85 номинальной;
  - 4- максимальное напряжение на якоре должно быть до  $1,3 U_{яН}$ ;
  - 5- максимальное напряжение на якоре должно превышать номинальное на 100 В;
  - 6- необходим диапазон регулирования скорости  $D_{\max} = 10000:1$ ;
  - 7- необходима полоса пропускания контура скорости  $f_{\max} = 40$  Гц;
  - 8- использовать совместное управление;
  - 9- требуется минимальный объем вентиляционной части;
- М – многоканальное ФСУ; К – комбинированное ФСУ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лихошерст В.И. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии для электроприводов с двигателями постоянного тока: Учебное пособие. 2-е изд., стереотип. Екатеринбург: УГТУ УПИ, 2001. 80 с.
2. Мощные управляемые выпрямители для электроприводов постоянного тока / Э.М.Аптер, Г.Г.Жемеров, И.И.Левитан, А.Г.Элькин. М.: Энергия, 1975. 208 с.
3. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. В.И.Круповича, Ю.Г.Барыбина, М.Л.Самовера. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1982. 416 с.
4. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И.Х.Евзеров, А.С.Горбец, Б.И.Мошкович и др.; Под ред. В.М.Перельмутера. М.: Энергоатомиздат, 1988. 319 с.
5. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошвин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 400 с.
6. ГОСТ 18142-80. Преобразователи электроэнергии статические полупроводниковые переменного тока в постоянные выпрямители. Общие технические условия.
7. Силовые полупроводниковые преобразователи в металлургии: Справочник / С.Р.Резинский, Б.И.Мошкович, И.Х.Евзеров, М.М.Внеделанд. М.: Металлургия, 1976. 184 с.
8. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общ. ред. И.П.Кошыллова и Б.К.Клокова. Т.1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 456 с.
9. Электротехнический справочник: В 3 т. Т.2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ, гл.ред. И.Н.Орлов и др. 7-е изд., испр. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 712 с.
10. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. Киев: Вища школа, 1978. 424 с.
11. Полупроводниковые выпрямители / Е.И.Беркович, В.Н.Ковалев, Ф.И.Ковалев и др.; Под ред. Ф.И.Ковалева и Г.П.Мостковой. 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1978. 448 с.
12. Ривкин Г.А. Преобразовательные устройства. М.: Энергия, 1970. 544 с.
13. Булгаков А.А. Основы динамики управляемых вентильных систем. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 220 с.
14. Каганов И.Л. Электронные и ионные преобразователи. Часть III. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. 528 с.
15. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках / М.И.Абрамович, В.М.Бабайлов, В.Е.Либер и др. М.: Энергоатомиздат, 1992. 432 с.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВОЙ ЧАСТИ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СИСТЕМЫ ТП-Д

Составители Лихошерст Виталий Иванович  
Костылев Алексей Васильевич

Редактор Н. П. Кубыщенко

---

Подписано в печать 20.02.2002

Бумага типографская

Уч. -изд.л. 2,20

Офсетная печать

Тираж 150

Заказ 12

Формат 60x84 1/16

Усл.печ.л. 2,17

Цена "С"

---

Редакционно-издательский отдел ГОУ ВПО УГТУ-УПИ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19





