Липецкий государственный технический университет

Кафедра электропривода

КУРСОВАЯ РАБОТА

по силовой электронике

«Расчет силовой части тиристорного преобразователя

для электропривода постоянного тока»

Вариант 24

Студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Группа

Преподаватель \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Безденежных Д.В.

К.т.н., доцент

Аннотация

С. 42. Ил. 11. Табл. 9. Литература 7 назв.

В курсовой работе выполнен расчет силовой части реверсивного двухкомплектного тиристорного преобразователя.

# 

Оглавление

[1 Задание и исходные данные 4](#_Toc532564968)

[2 Расчёт силовой схемы тиристорного преобразователя 7](#_Toc532564969)

[2.1 Определение параметров и выбор трансформатора 7](#_Toc532564970)

[2.2 Выбор тиристоров 10](#_Toc532564971)

[2.3 Расчёт индуктивности уравнительных реакторов 13](#_Toc532564972)

[2.4 Расчёт индуктивности сглаживающего реактора 15](#_Toc532564973)

[2.5 Выбор элементов защиты преобразователя 19](#_Toc532564974)

[2.5.1 Выбор элементов защиты преобразователя 19](#_Toc532564975)

[2.5.2 Защита вентилей от перенапряжений 22](#_Toc532564976)

[2.5.3 Защита двигателя 25](#_Toc532564977)

[3 Расчёт и построение регулировочных характеристик 28](#_Toc532564978)

[4 Расчёт и построение электромеханических характеристик 31](#_Toc532564979)

[4.1 Зона непрерывных токов 31](#_Toc532564980)

[4.2 Зона прерывистых токов при раздельном управлении 33](#_Toc532564981)

[4.3 Определение границы устойчивого инвертирования 38](#_Toc532564982)

[5 Построение диаграммы уравнительного напряжения и тока 39](#_Toc532564983)

[6 Определение полной мощности, её составляющих, коэффициента мощности и КПД тиристорного преобразователя 41](#_Toc532564984)

[Библиографический список 44](#_Toc532564985)

# 1 Задание и исходные данные

Выполнить расчет силовой части реверсивного двухкомплектного тиристорного преобразователя, предназначенного для питания якорной цепи двигателей постоянного тока, в следующей последовательности:

1) составить расчетную электрическую схему силовой части преобразователя и выбрать для нее трансформатор, тиристоры и реакторы;

2) рассчитать и выбрать элементы защиты;

3) рассчитать и построить регулировочные характеристики преобразователя;

4) рассчитать и построить семейство электромеханических харак­теристик привода при совместном и раздельном управлении тиристорными комплектами;

5) построить временные диаграммы уравнительного напряжения и тока при совместном управлении тиристорными комплектами;

6) рассчитать зависимость потребляемой преобразователем активной, реактивной и полной мощности, коэффициента мощности и коэффициента полезного действия от частоты вращения якоря двигателя (при номинальном токе якоря).

Исходные данные для расчета приведены в таблице 1. Она содержит:

1) схему реверсивного преобразова­теля;

2) угол рассогласования Δα=(αв +αи)-180° между выпрямительным и инверторным комплектом;

3) угол управления выпрямительной группы αIВ для построения диаграмм уравнительного напряжения и тока при совместном управлении;

4) координаты гранично-непрерывного режима Iмин./Iном. и ωЯ(IМИН.)/ωЯ.НОМ.при раздельном управлении;

5) линейное напряжение питающей сетиU1лин.;

6) тип и мощность двигателя постоянного тока.

Таблица 1- Исходные данные для расчёта

|  |  |
| --- | --- |
| Схема преобразователя | Мостовая встречно-параллельная |
| Δα=(αв +αи)-180° | 5 эл. град. |
| αIв | 40 эл. Град |
| Iмин./Iном. | 40% |
| ωЯ(Iмин.)/ωя.ном. | 50% |
| U1лин. | 660 В |
| Тип и мощность двигателя | П102 55кВт |

Технические данные двигателя П102 55 кВт:

– номинальная мощность: P=55кВт;

– номинальная частота вращения: n=750 об/мин;

– номинальный ток: Idн дв.=286А;

– номинальное напряжение: Udн дв.=220 В;

– сопротивление якоря + сопротивления добавочных полюсов: rя+rдп=0,0311 Ом;

– сопротивление параллельной обмотки возбуждения: rпар=32,5 Ом;

– число активных проводников якоря: N=222;

– число параллельных ветвей якоря: 2a=2;

– число витков полюса параллельной обмотки возбуждения: ωпар=840;

– полезный магнитный поток полюса: Φ=37,0 мВб;

– номинальный ток возбуждения параллельной обмотки: iн=4,84 А;

– максимальная допускаемая частота вращения: nmax=1500об/мин;

– момент инерции якоря: J=12,0 кг∙м2;

– число полюсов: 2р=4

– масса двигателя:985 кг.

# 2 Расчёт силовой схемы тиристорного преобразователя

# 2.1 Определение параметров и выбор трансформатора

Трансформатор выбирают по типовой (габаритной) мощности при условии, что напряжения и токи его обмоток соответствуют расчётным значениям. При работе в зоне непрерывных токов расчётное значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора определяют по формуле:

где коэффициент, зависящий от схемы преобразования;

– коэффициент, учитывающий возможное снижение напряжения в сети;

– коэффициент, учитывающий неполное открывание вентилей для минимального угла управления при;

– коэффициент, учитывающий внутреннее падение напряжения в преобразователе;

– номинальное напряжение якоря двигателя.

Для минимальных и максимальных значений коэффициентов формулы (1) вычисляют расчётные значения фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора и, соответственно.

Расчётное значение тока фазы вторичной обмотки трансформатора вычисляем по формуле:

где – коэффициент, зависящий от схемы преобразования;

– коэффициент, учитывающий отклонение формы фазного тока от прямоугольной;

– номинальный ток якоря двигателя.

.

Типовая мощность трансформатора характеризует его габариты и расход материалов на изготовление магнитопровода и обмоток. Её определяют в по формуле:

где– коэффициент, зависящий от схемы преобразования и группы соединения обмоток.

.

Трансформатор выбирают, определяя его типовую мощность, номинальные значения фазного напряжения и фазного тока вторичной обмотки из соотношений:

Номинальное значение межфазного напряжение первичной обмотки трансформатора должно быть равно линейному напряжению сети.

Тип выбранного трансформатора – ТСП-100/0,7. Его технические данные приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Технические данные трансформатора ТСП – 100/0,7

|  |  |
| --- | --- |
| Группа соединения обмоток | Δ/Y – 11 |
| Номинальная мощность | 93 кВА |
| Номинальное линейное напряжение первичной обмотки | 660 В |
| Номинальное линейное напряжение вторичной обмотки | 205 В |
| Номинальный фазный ток вторичной обмотки | 262 А |
| Напряжение короткого замыкания | 5,8% |
| Ток холостого хода | 4% |
| Потери короткого замыкания | 2300 Вт |

По техническим данным вычисляем:

– коэффициент трансформации:

– номинальное значение фазного тока первичной обмотки:

– активное сопротивление фазы трансформатора:

– индуктивное сопротивление фазы трансформатора:

# 2.2 Выбор тиристоров

Тиристоры выбирают по максимальному значениютока, протекающего через открытый вентиль в переходных режимах пуска и торможения двигателя, и по максимальному значению напряжения, которое прикладывается к вентилю в закрытом состоянии.

Среднее значение тока через открытый вентиль вычисляют по формуле:

где – коэффициент запаса, учитывающий увеличение тока через вентиль в переходном процессе пуска или торможения двигателя;

– коэффициент, учитывающий интенсивность охлаждения тиристора (при естественном воздушном охлаждении с использованием стандартного радиатора 0,3…0,35, при принудительном охлаждении).

В паспортных данных тиристоров указан максимально допустимый средний ток в открытом состоянии, значение которого дано для классификационной схемы – однофазной однополупериодной схемы выпрямления синусоидального тока с активной нагрузкой при угле проводимости вентиля 1800(рис. 1, а). В трёхфазных схемах, работающих на якорь двигателя в режиме непрерывного тока, форма тока вентиля приближается к прямоугольной, а угол проводимости равен 1200(рис. 1, б).

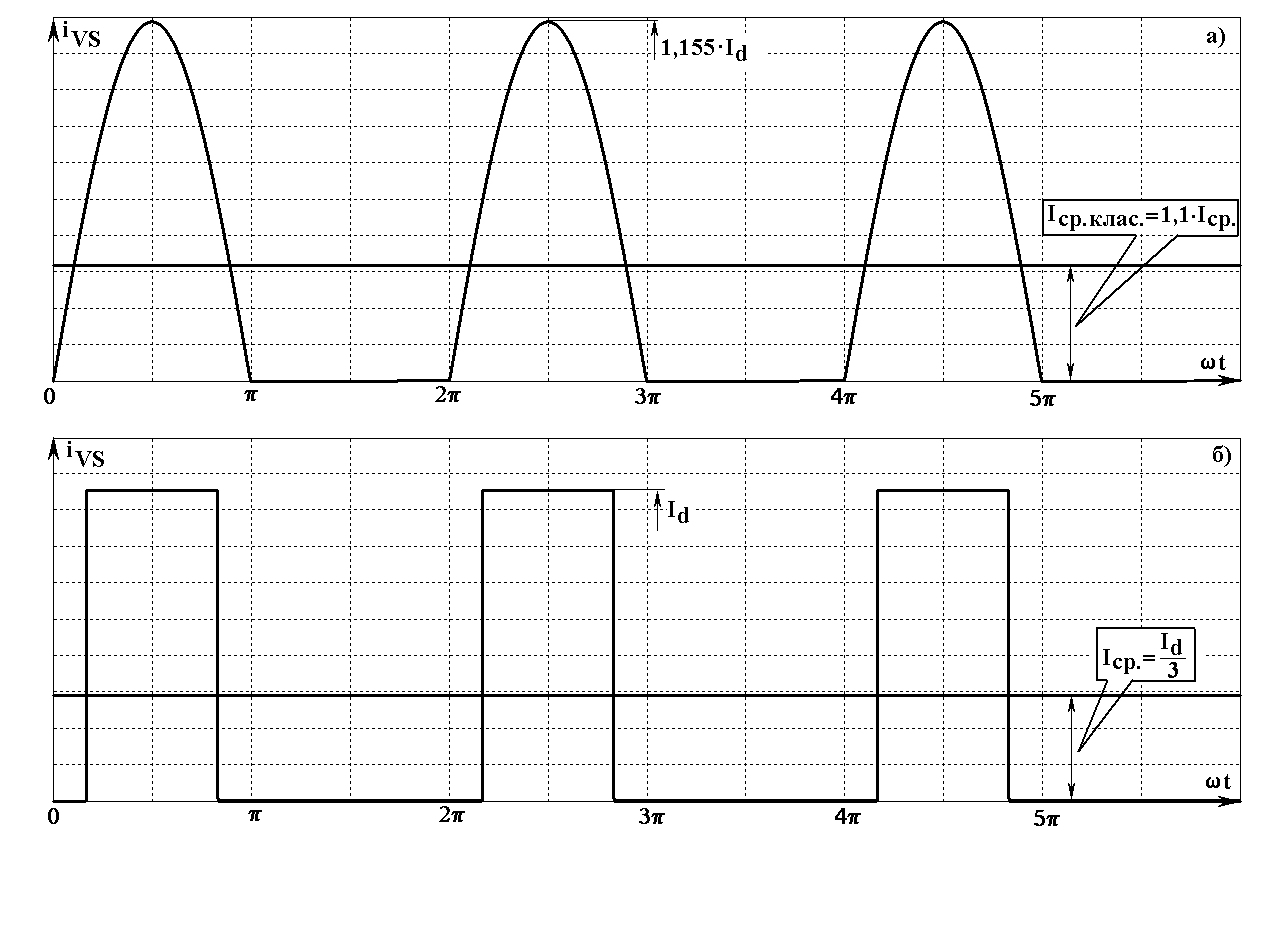


Рисунок 1 – Ток вентиля в классификационной схеме (а) и в трехфазных схемах преобразования (б) при одинаковом действующем значении

Как следует из рисунка 1, для правильного выбора тиристора значение необходимо привести к классификационной схеме:

Максимальное напряжение на вентиле в запертом состоянии в трёхфазных схемах равно межфазному напряжению вторичной обмотки трансформатора. С учётом возможных перенапряжений его вычисляют по формуле:

,

где – коэффициент запаса по напряжению.

В паспортных данных тиристоров указано повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии , – максимально допустимое мгновенное значение напряжения, которое может быть приложено к запертому вентилю. Выбирают тиристоры с предельными эксплуатационными параметрами, определяемыми из условий:

Тип выбранного тиристора –ТБ153-800. Технические данные прибора представлены в таблице 3.

Таблица 3- Технические данные тиристора ТБ153-800

|  |  |
| --- | --- |
| Предельные эксплуатационные параметры | |
| Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии | 600-1200, В |
| Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии | 800, А |
| Ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии при заданной длительности импульса tи= 10 мс | 12, кА |
| Защитный показатель I2t при заданной длительности импульса tи= 10 мс | 720, кА2∙с |
| Электрические параметры | |
| Импульсное напряжение в открытом состоянии, | 1,8, В |
| Время выключения tвыкл | 32-63, мкс |
| Время обратного восстановления tвос. обр. | 4,5, мкс |

# 2.3 Расчёт индуктивности уравнительных реакторов

В реверсивных тиристорных преобразователях при совместном управлении группами мгновенные значения напряжений выпрямителя и инвертора могут быть неодинаковы, поэтому появляется неуравновешенное напряжение, под действием которого протекает ток. Для ограничения этого тока применяют уравнительные реакторы, индуктивность которых определяют по формуле:

где – действующее значение уравнительного тока (),–частота питающей сети, – коэффициент действующего значения уравнительного тока. Для расчёта используют максимальное значение коэффициента, определённое из графика зависимости для мостовой встречно-параллельной схемы.

Номинальный ток выбранного уравнительного реактора должен быть не меньше номинального тока якоря двигателя.

Выбираем насыщающийся реактор. Его индуктивность выбирается из соотношения:

Тип выбранного уравнительного реактора – РОС-100/05-Т. Его технические характеристики приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики уравнительного реактора РОС-100/0,5-Т

|  |  |
| --- | --- |
| Номинальный постоянный ток | 500, А |
| Номинальное действующее значение уравнительного тока | 48 , А |
| Индуктивность | 12 ,мГн |

# 2.4 Расчёт индуктивности сглаживающего реактора

Сглаживающий реактор включают последовательно с якорем двигателя. Его индуктивность выбирают из условия снижения пульсаций выпрямленного тока до допустимого значения, указанного в задании.

Расчёт индуктивности цепи выпрямленного тока при совместном управлении производят по формуле:

где – количество пульсаций за период сетевого напряжения (для трёхфазной мостовой схемы, kp = 6)

– допустимый коэффициент пульсаций, вычисляемый как отношение амплитуды основной гармоники выпрямленного тока к номинальному току якоря

– амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения, определяемая при номинальной частоте вращения и токе якоря двигателя.

Тиристорные преобразователи с симметричными схемами выпрямления при номинальных значениях напряжения и тока имеют угол управления около 30º, что позволяет, в случае необходимости, компенсировать понижение напряжения в сети и увеличение внутреннего падения напряжения в преобразователе. Поэтому величину определяют при, используя график зависимости ,().

.

Учитывая наличие в цепи нагрузки индуктивности якоря двигателя и уравнительных реакторов , величину индуктивности сглаживающего реактора определяют как:

Коэффициент перед индуктивностью уравнительного реактора в зависимости от его типа и схемы преобразования принимает следующее значение:

-, при использовании насыщающихся реакторов.

Индуктивность якоря двигателя определяют по формуле:

где – для некомпенсированных машин;

– число пар полюсов двигателя;

– номинальная угловая частота вращения якоря.

Примем:

Определим величину индуктивности сглаживающего реактора:

Расчёт индуктивности сглаживающего реактора из условия обеспечения непрерывного тока в рабочем диапазоне изменения нагрузок при раздельном управлении группами тиристорного преобразователя при трехфазной мостовой схеме производим по формуле:

где –гранично-непрерывный ток, определяемый по формуле:

– угол регулирования, определяемый по формуле:

гдеопределяется по формуле:

– минимальное значение частоты вращения двигателя при гранично-непрерывном токе, определяемое по формуле:

С –конструктивная постоянная двигателя при неизменном потоке главных полюсов, определяемая по формуле:

где – номинальная ЭДС якоря двигателя;

- номинальная частота вращения якоря двигателя;

– сопротивление якорной цепи при температуре 15°С, включающее сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов;

При вычислении LСГЛ. РАСЧ., в случае раздельного управления, в формулу (21) подставляют наибольшее из рассчитанных значений и .

В таком случае величина индуктивности сглаживающего реактора будет равна:

Номинальный ток выбранного сглаживающего реактора должен быть не меньше номинального тока якоря двигателя.

Выбираем ненасыщающийся реактор. Его индуктивность выбирается из соотношения:

Тип выбранного сглаживающего реактора – ФРОС-65/0,5. Его технические характеристики приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики уравнительного реактора ФРОС-65/0,5

|  |  |
| --- | --- |
| Номинальный постоянный ток | 320, А |
| Индуктивность | 1 ,мГн |

# 2.5 Выбор элементов защиты преобразователя

# 2.5.1 Выбор элементов защиты преобразователя

Для защиты вентилей от аварийных перегрузок по току используют плавкие предохранители, которые включают последовательно с тиристорами.

Они характеризуются значениями номинального напряжения., номинального тока плавкой вставки и интеграла Джоуля (защитного показателя) . Для обеспечения нормального гашения дуги, возникающей при расплавлении вставки, номинальное напряжение применяемого предохранителя должно быть не меньше номинального напряжения преобразователя:

Номинальный ток плавкой вставки определяют по номинальному току двигателя из соотношения:

где – коэффициент запаса, учитывающий увеличение тока через вентиль в переходном процессе пуска или торможения двигателя;

– количество параллельно соединенных вентилей.

Номинальный ток держателя (или основания) предохранителя должен быть не меньше номинального тока плавкой вставки:

По условиям (28)…(30) выбираем предохранитель и плавкую вставку для него. Выбранный предохранитель должен ограничивать время протекания аварийного тока через вентиль таким образом, чтобы не превысить максимально допустимую температуру полупроводника и предела термодинамической стойкости элементов конструкции вентиля. Для оценки защищенности вентиля сравнивают его защитный показатель с интегралом Джоуля предохранителя . При этом должно выполняться условие:

, (А2c); (32)

где Iос.удр= 12 кА – ударный неповторяющийся ток в открытом состоя-нии;

tu=10-2 – длительность импульса.

Условие (31) должно выполняться во всем диапазоне изменения тока отключения предохранителя.

Выбранный тип предохранителя – ПП57-3998.

Характеристика интеграла Джоуля предохранителя представлена на ри-сунке 2.

3∙105 А2с…4∙105 А2с < 7,2∙105 А2с

Так как условие выполняется, то предохранитель выбран верно. Данные предохранителя представлены в таблице 6.

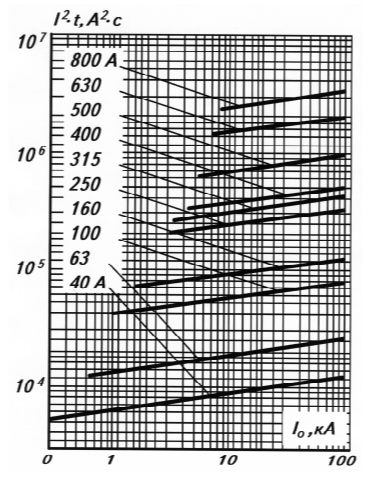


Рисунок 2 – Характеристика интеграла Джоуля предохранителя ПП57-3737

Таблица 6 - Технические данные предохранителя ПП57-3737

|  |  |
| --- | --- |
| Номинальный ток предохранителя | 400 А |
| Номинальный ток плавких вставок | 315 А |
| Наибольшее допустимое напряжение постоянного тока | 440В |

# 2.5.2 Защита вентилей от перенапряжений

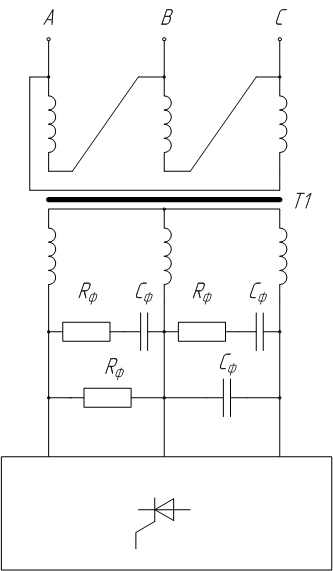
Для защиты тиристоров от перенапряжений, возникающих при включении и отключении трансформатора, между фазными выводами вторичной обмотки включают демпфирующие цепи (рис. 3).

Рисунок 3 – Защита вентилей от перенапряжений в фазах трансформатора

Ёмкость конденсатора такой цепи определяют по формуле (в микрофарадах):

где – номинальная мощность трансформатора, кВА;

– ток холостого хода трансформатора, А;

. – максимально допустимое повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии вентиля, В;

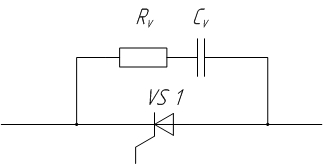
– максимальное напряжение на закрытом вентиле в схеме, В;

Выберем конденсатор К75-10б-1000В-8 мкФ±10%

Для обеспечения апериодического переходного процесса в контуре, образуемом демпфирующей цепочкой с индуктивностью рассеяния трансформатора, сопротивление резистора выбирают из соотношения:

Выберем резистор ПЭВ-3-12Ом ±5%.

Для подавления периодических коммутационных перенапряжений на вентиле, возникающих при его запирании, параллельно каждому тиристору подключают цепь RVCV (рис. 4).

Рисунок 4 – Защита вентиля от коммутационного перенапряжения

Ёмкость конденсатора в этой цепи определяют по формуле (в микрофарадах):

где – напряжение короткого замыкания трансформатора, в %. Максимальное значение обратного тока тиристора , вычисляют из соотношения:

Где – угловая частота сети;

– время обратного восстановления вентиля;

– угол управления при номинальном напряжении и токе преобразователя,

– максимальный угол коммутации вентиля.

Принимаем значение.

Выберем конденсатор К75-12-630В-0,01мкФ10%.

Сопротивление RV выбирают равным:

Принимаем значение

Выберем резистор ПЭВ-3-200 Ом 10%.

# 2.5.3 Защита двигателя

В преобразователе предусматривают защиты: от включения двигателя при наличии напряжения на выходе преобразователя, от превышения напряжения на якоре, максимальную токовую и от чрезмерного ослабления магнитного потока главных полюсов. Их обеспечивает релейно-контакторная схема, показанная на рис. 7. В ней якорь двигателя подключен к выходу преобразователя через главные контакты К5.1 и К5.2 контактора К5, в цепи катушки которого находятся контакты защитных реле. Защита от включения двигателя при наличии напряжения реализована с помощью реле К1. Его катушка через добавочный резистор R1 подключена к выходу преобразователя ТП до главных контактов контактора, а размыкающий контакт реле включен последовательно с пусковой кнопкой SB2.

Защита якоря двигателя от недопустимого увеличения напряжения выполнена на реле К2. Его катушка через добавочный резистор R2 подключена к выходу преобразователя после главных контактов контактора, а размыкающий контакт включен последовательно с катушкой контактора К5.

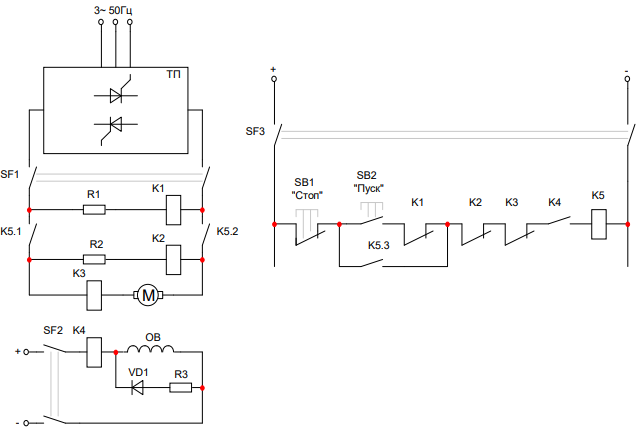


Рисунок 5 – Релейно-контакторная схема защиты двигателя

Реле К3 осуществляет максимальную токовую защиту. Его катушка включена последовательно с якорем двигателя, а размыкающий контакт - последовательно с катушкой контактора К5.

Защиту от чрезмерного уменьшения тока возбуждения осуществляет реле К4, катушка которого включена в цепь обмотки возбуждения двигателя, а замыкающий контакт находится в цепи катушки контактора К5. Вентиль VD1 с резистором R3 образуют цепь разряда индуктивности обмотки возбуждения двигателя после размыкания контактов автоматического выключателя SF2.

2.5.4 Выбор автоматических выключателей

Для преобразователей, питающихся от сети с напряжением не более 380 В, на первичной стороне устанавливаем автоматический выключатель переменного тока серии А3700 или АП50Б. Для включения якоря двигателя к преобразователю используют быстродействующий автоматический выключатель постоянного тока серии А3700, который одновременно выполняет функции защиты от аварийных режимов. Для включения питания обмотки возбуждения двигателя и цепи собственных нужд преобразователя используют автоматический выключатель постоянного тока серии АП50Б.

Для включения трансформатора в сеть выберем автоматический выключатель серии А3716Б на переменный ток с параметрами:

- номинальный ток выключателя;

– номинальное напряжение;

- номинальный ток тепловых расцепителей.

Для включения якоря двигателя к преобразователю применим автоматический выключатель постоянного тока А3795Н:

- номинальный ток выключателя;

– номинальное напряжение;

- номинальный ток тепловых расцепителей.

Для включения цепи возбуждения параллельной обмотки двигателя и релейно-контакторной схемы применим автоматические выключатели постоянного тока АП50Б2М:

– номинальное напряжение;

- номинальный ток расцепителей.

# 3 Расчёт и построение регулировочных характеристик

Регулировочные характеристики для ЭДС преобразователя в зоне непрерывных токов рассчитаны по соотношению . Построены характеристики для первого комплекта и второго комплекта преобразователя, как в выпрямительном, так и в инверторном режиме работы. С использованием этих характеристик построены характеристики и для напряжения преобразователя при номинальном токе, используя формулу:

где – эквивалентное сопротивление тиристорного преобразователя, позволяющее учитывать падение напряжения на активном сопротивлении фаз трансформатора и коммутационное падение напряжения:

Для мостовой схемы:

где m – число фаз преобразователя (m=6 для трехфазной мостовой схемы).

Результаты расчёта регулировочных характеристик , , , сведены в таблице 7.

Угол рассогласования Δα=(αв+αи) – 180°=(α1+α2)– 180° = 5 (эл. град)

Таблица 7 - Результаты расчета регулировочных характеристик

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| α1,град | Ud1, В | Ed1=Ud0∙cosα1,В | α2,град | Ud2, В | Ed2=Ud0∙cosα2,В |
| 0 | 264,32 | 277,18 | - | - | - |
| 5 | 263,26 | 276,13 | 0 | 290,05 | 277,18 |
| 10 | 260,10 | 272,97 | 5 | 288,99 | 276,13 |
| 15 | 254,87 | 267,74 | 10 | 285,84 | 272,97 |
| 20 | 247,60 | 260,47 | 15 | 280,60 | 267,74 |
| 25 | 238,35 | 251,21 | 20 | 273,33 | 260,47 |
| 30 | 227,18 | 240,05 | 25 | 264,08 | 251,21 |
| 35 | 214,19 | 227,05 | 30 | 252,91 | 240,05 |
| 40 | 199,47 | 212,33 | 35 | 239,92 | 227,05 |
| 45 | 183,13 | 196,00 | 40 | 225,20 | 212,33 |
| 50 | 165,30 | 178,17 | 45 | 208,86 | 196,00 |
| 55 | 146,12 | 158,99 | 50 | 191,04 | 178,17 |
| 60 | 125,72 | 138,59 | 55 | 171,85 | 158,99 |
| 65 | 104,28 | 117,14 | 60 | 151,46 | 138,59 |
| 70 | 81,93 | 94,80 | 65 | 130,01 | 117,14 |
| 75 | 58,87 | 71,74 | 70 | 107,67 | 94,80 |
| 80 | 35,27 | 48,13 | 75 | 84,61 | 71,74 |
| 85 | 11,29 | 24,16 | 80 | 61,00 | 48,13 |
| 90 | -12,87 | 0,00 | 85 | 37,03 | 24,16 |
| 95 | -37,03 | -24,16 | 90 | 12,87 | 0,00 |
| 100 | -61,00 | -48,13 | 95 | -11,29 | -24,16 |
| 105 | -84,61 | -71,74 | 100 | -35,27 | -48,13 |
| 110 | -107,67 | -94,80 | 105 | -58,87 | -71,74 |
| 115 | -130,01 | -117,14 | 110 | -81,93 | -94,80 |
| 120 | -151,46 | -138,59 | 115 | -104,28 | -117,14 |
| 125 | -171,85 | -158,99 | 120 | -125,72 | -138,59 |
| 130 | -191,04 | -178,17 | 125 | -146,12 | -158,99 |
| 135 | -208,86 | -196,00 | 130 | -165,30 | -178,17 |
| 140 | -225,20 | -212,33 | 135 | -183,13 | -196,00 |
| 145 | -239,92 | -227,05 | 140 | -199,47 | -212,33 |
| 150 | -252,91 | -240,05 | 145 | -214,19 | -227,05 |
| 155 | -264,08 | -251,21 | 150 | -227,18 | -240,05 |
| 160 | -273,33 | -260,47 | 155 | -238,35 | -251,21 |
| 165 | -280,60 | -267,74 | 160 | -247,60 | -260,47 |
| 170 | -285,84 | -272,97 | 165 | -254,87 | -267,74 |
| 175 | -288,99 | -276,13 | 170 | -260,10 | -272,97 |
| 180 | -290,05 | -277,18 | 175 | -263,26 | -276,13 |
| - | - | - | 180 | -264,32 | -277,18 |

Графики регулировочных характеристик для ЭДС и напряжений преобразователя представлены на рисунке 6.

Рисунок 6 – Графики регулировочных характеристик для ЭДС и напряжений преобразователя

# 4 Расчёт и построение электромеханических характеристик

# 4.1 Зона непрерывных токов

Семейство электромеханических характеристик системы «преобразователь – двигатель» рассчитывают и строят, изменяя угол управления α от 0º до 180º с шагом15º, по уравнению:

где - падение напряжения на вентилях.

Для мостовой схемы:

Суммарное сопротивление цепи выпрямленного тока вычисляется как

где – сопротивление якорной цепи двигателя при температуре 15º С;

- сопротивление щеточного контакта;

– активные сопротивления реакторов;

Ток двигателя при расчете изменялся в пределах от . до .Результаты расчёта электромеханических характеристик сведены в таблице 8.

Таблица 8 - Результаты расчета электромеханических характеристик

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| α2, град | ωя(-3Idн), рад/с | ωя(0), рад/с | α1, град | ωя(0), рад/с | ωя(3Idн), рад/с |
| 170 | 135,72 | 103,97 | 15 | 99,30 | 67,55 |
| 155 | 127,54 | 95,79 | 30 | 88,89 | 57,14 |
| 140 | 112,92 | 81,17 | 45 | 72,33 | 40,58 |
| 125 | 92,87 | 61,12 | 60 | 50,75 | 19,00 |
| 110 | 68,74 | 36,99 | 75 | 25,62 | -6,13 |
| 95 | 42,18 | 10,43 | 90 | -1,35 | -33,10 |
| 80 | 15,00 | -16,74 | 105 | -28,32 | -60,07 |
| 65 | -10,94 | -42,68 | 120 | -53,45 | -85,20 |
| 50 | -33,88 | -65,63 | 135 | -75,03 | -106,78 |
| 35 | -52,26 | -84,00 | 150 | -91,59 | -123,34 |
| 20 | -64,82 | -96,56 | 165 | -102,00 | -133,75 |
| 5 | -70,70 | -102,45 | 180 | -105,55 | -137,30 |

Рисунок 7 – Семейство электромеханических характеристик в зоне непрерывных токов

# 4.2 Зона прерывистых токов при раздельном управлении

При раздельном управлении двухкомплектным преобразователем электромеханические характеристики привода в зоне прерывистых токов существенно изменяются. Для их вычисления задаются значениями угловой длительности прохождения тока λ от нуля до с шагом  и вычисляют ЭДС и ток якоря двигателя, используя формулы:

В данных формулах: U2m – амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора

Для мостовой схемы :

Суммарная индуктивность выпрямленного тока вычисляется по формуле:

,

где LТ – индуктивность трансформатора, приведённая ко вторичной обмотке (для мостовой схемы)

ЭДС:

По значениям ЭДС, вычислим угловую частоту вращения якоря двигателя ωЯ:

Ток в якорной обмотке двигателя:

Таблица 9 – Расчет электромеханических характеристик в зоне прерывистых токов

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 комплект | | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | 135 | 150 | 165 | 180 |
| λ = 150 | EЯ, B | 286,68 | 286,74 | 267,27 | 229,58 | 176,25 | 110,91 | 38,00 | -37,49 | -110,43 | -175,84 | -229,27 | -267,07 |
| Id, A | -0,05 | 0,05 | 0,14 | 0,22 | 0,28 | 0,33 | 0,35 | 0,35 | 0,33 | 0,28 | 0,22 | 0,14 |
| ωЯ, с-1 | 107,77 | 107,80 | 100,48 | 86,31 | 66,26 | 41,69 | 14,29 | -14,09 | -41,51 | -66,10 | -86,19 | -100,40 |
| λ = 300 | EЯ, B | 286,74 | 277,11 | 248,58 | 203,12 | 143,82 | 74,71 | 0,52 | -73,72 | -142,92 | -202,39 | -248,07 | -276,84 |
| Id, A | -0,01 | 0,73 | 1,42 | 2,01 | 2,46 | 2,75 | 2,85 | 2,75 | 2,47 | 2,02 | 1,43 | 0,74 |
| ωЯ, с-1 | 107,80 | 104,18 | 93,45 | 76,36 | 54,07 | 28,09 | 0,19 | -27,71 | -53,73 | -76,09 | -93,26 | -104,07 |
| λ =450 | EЯ, B | 280,01 | 260,76 | 223,74 | 171,47 | 107,51 | 36,23 | -37,52 | -108,72 | -172,50 | -224,53 | -261,26 | -280,18 |
| Id, A | 1,31 | 3,81 | 6,04 | 7,86 | 9,15 | 9,81 | 9,81 | 9,13 | 7,84 | 6,01 | 3,77 | 1,27 |
| ωЯ, с-1 | 105,27 | 98,03 | 84,11 | 64,46 | 40,42 | 13,62 | -14,11 | -40,87 | -64,85 | -84,41 | -98,22 | -105,33 |
| λ = 600 | EЯ, B | 267,33 | 239,57 | 195,50 | 138,09 | 71,28 | -0,39 | -72,03 | -138,77 | -196,04 | -239,96 | -267,53 | -276,86 |
| Id, A | 5,97 | 11,51 | 16,26 | 19,90 | 22,18 | 22,96 | 22,17 | 19,87 | 16,21 | 11,45 | 5,91 | -0,03 |
| ωЯ, с-1 | 100,50 | 90,07 | 73,49 | 51,92 | 26,80 | -0,15 | -27,08 | -52,17 | -73,70 | -90,21 | -100,57 | -104,08 |

Окончание таблицы 9

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2 комплект | | 180 | 165 | 150 | 135 | 120 | 105 | 90 | 75 | 60 | 45 | 30 | 15 |
| λ = 150 | EЯ, B | 267,07 | 229,27 | 175,84 | 110,43 | 37,49 | -38,00 | -110,91 | -176,25 | -229,58 | -267,27 | -286,74 | -286,68 |
| Id, A | -0,14 | -0,22 | -0,28 | -0,33 | -0,35 | -0,35 | -0,33 | -0,28 | -0,22 | -0,14 | -0,05 | 0,05 |
| ωЯ, с-1 | 100,40 | 86,19 | 66,10 | 41,51 | 14,09 | -14,29 | -41,69 | -66,26 | -86,31 | -100,48 | -107,80 | -107,77 |
| λ = 300 | EЯ, B | 276,84 | 248,07 | 202,39 | 142,92 | 73,72 | -0,52 | -74,71 | -143,82 | -203,12 | -248,58 | -277,11 | -286,74 |
| Id, A | -0,74 | -1,43 | -2,02 | -2,47 | -2,75 | -2,85 | -2,75 | -2,46 | -2,01 | -1,42 | -0,73 | 0,01 |
| ωЯ, с-1 | 104,07 | 93,26 | 76,09 | 53,73 | 27,71 | -0,19 | -28,09 | -54,07 | -76,36 | -93,45 | -104,18 | -107,80 |
| λ = 450 | EЯ, B | 280,18 | 261,26 | 224,53 | 172,50 | 108,72 | 37,52 | -36,23 | -107,51 | -171,47 | -223,74 | -260,76 | -280,01 |
| Id, A | -1,27 | -3,77 | -6,01 | -7,84 | -9,13 | -9,81 | -9,81 | -9,15 | -7,86 | -6,04 | -3,81 | -1,31 |
| ωЯ, с-1 | 105,33 | 98,22 | 84,41 | 64,85 | 40,87 | 14,11 | -13,62 | -40,42 | -64,46 | -84,11 | -98,03 | -105,27 |
| λ = 600 | EЯ, B | 276,86 | 267,53 | 239,96 | 196,04 | 138,77 | 72,03 | 0,39 | -71,28 | -138,09 | -195,50 | -239,57 | -267,33 |
| Id, A | 0,03 | -5,91 | -11,45 | -16,21 | -19,87 | -22,17 | -22,96 | -22,18 | -19,90 | -16,26 | -11,51 | -5,97 |
| ωЯ, с-1 | 104,08 | 100,57 | 90,21 | 73,70 | 52,17 | 27,08 | 0,15 | -26,80 | -51,92 | -73,49 | -90,07 | -100,50 |

Рисунок 7 – Семейство электромеханических характеристик

в зоне прерывистых токов

Рисунок 8 – Регулировочная характеристика в зоне прерывистых токов

# 4.3 Определение границы устойчивого инвертирования

Для обеспечения надежности инвертирования необходимо выполнить условие:

или ,

где γ– угол коммутации;

δ–угол восстановления запирающих свойств тиристора, определяемый временем выключения:

Этому условию соответствует наибольшее значение частоты вращения якоря, которое определяют по формуле:

По уравнению (44) на семействе электромеханических характеристик построим границы предельного режима инвертирования.

# 5 Построение диаграммы уравнительного напряжения и тока

Диаграмму уравнительного напряжения при свместном управлении определяют как разницу мгновенных значений напряжения комплекта , работающего в выпрямительном режиме, и напряжения комплекта , находящегося в режиме готовности к инвертированию:

Построение диаграммы уравнительного напряжения выполняют в следующей последовательности:

– для заданного угла αIв = 40 эл. град., строят диаграмму напряжения ;

– по заданному согласованию (αв+αи), вычисляют угол опережения βIи для комплекта, находящегося в режиме готовности к инвертированию:

– для вычисленного угла строят диаграмму напряжения ;

– графически вычитают из диаграммы диаграмму .

Полученный график, в соответствии с уравнением представляет собой диаграмму уравнительного напряжения. Пренебрегая активным сопротивлением контура уравнительного тока iУР, можно записать соотношение:

Отсюда можно вычислить:

Таким образом, применяя метод численного интегрирования, построим диаграмму уравнительного тока.

Диаграммы напряжений и тока приведены на рисунке А.1 (Приложение А).

# 6 Определение полной мощности, её составляющих, коэффициента мощности и КПД тиристорного преобразователя

Изменение частоты вращения при неизменном токе якоря приводит к перераспределению активной и реактивной составляющих полной мощности, потребляемой преобразователем из сети. При этом изменяются коэффициент мощности преобразователя и коэффициент полезного действия привода.

Относительная величина полной мощности, потребляемой тиристорным преобразователем из сети:

где K1 для мостовой схемы равен 1;

γ – угол коммутации (в радианах).

Относительная величина активной составляющей мощности:

Относительная величина реактивной составляющей мощности:

Относительная величина мощности основной гармоники:

Относительная величина мощности искажений:

Коэффициент мощности преобразователя:

Коэффициент полезного действия привода при номинальном токе двигателя и относительной частоте вращения якоря :

где

Угол управления α и угол коммутации γ вычисляют из соотношений:

В таблице 10 сведены рассчитанные значения зависимостей полной мощности и ее составляющих, коэффициента мощности и коэффициента полезного действия от изменения относительного значения частоты вращения якоря в пределах от 0 до 1.

Таблица 10 - Расчет зависимостей полной мощности и ее составляющих, коэффициента мощности и КПД

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ω |  | A |  |  |  |  |  |  |  | Η |
| 0 |  | 1,470 |  |  |  |  |  |  |  | 0,465 |
| 5,7 |  | 1,414 |  |  |  |  |  |  |  | 0,653 |
| 11,3 |  | 1,360 |  |  |  |  |  |  |  | 0,742 |
| 16,9 |  | 1,304 |  |  |  |  |  |  |  | 0,795 |
| Продолжение таблицы 10 | | | | | | | | | | |
| 22,5 |  | 1,248 |  |  |  |  |  |  |  | 0,829 |
| 28,1 |  | 1,191 |  |  |  |  |  |  |  | 0,854 |
| 33,7 |  | 1,132 |  |  |  |  |  |  |  | 0,873 |
| 39,3 |  | 1,072 |  |  |  |  |  |  |  | 0,887 |
| 44,9 |  | 1,010 |  |  |  |  |  |  |  | 0,898 |
| 50,5 |  | 0,945 |  |  |  |  |  |  |  | 0,908 |
| 56,1 |  | 0,877 |  |  |  |  |  |  |  | 0,915 |
| 61,7 |  | 0,805 |  |  |  |  |  |  |  | 0,922 |
| 67,3 |  | 0,727 |  |  |  |  |  |  |  | 0,928 |
| 72,9 |  | 0,642 |  |  |  |  |  |  |  | 0,932 |
| 78,54 |  | 0,546 |  |  |  |  |  |  |  | 0,937 |

Графики зависимостей представлены на рисунке 11.

Рисунок 11 – График полной мощности, ее составляющих, коэффициента мощности и КПД тиристорного преобразователя

# Библиографический список

1. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977.

2. Зимин Е.Н., Кацевич В.Л., Козырев С.К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоиздат, 1981.

3. Силовые полупроводниковые преобразователи в металлургии. Под ред. С.Р.Рязинского. М.: Металлургия, 1976.

4. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1985.

5. Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Петухов В.М. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник. М.: Радио и связь, 1988.

6. Резисторы: Справочник/В.В.Дубровский, Д.М.Иванов, Н.Я. Пратусевич и др.; Под ред. И.И.Четверткова и В.М.Терехова. – М.: Радио и связь, 1991.

7. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник/В.П.Берзан, Б.Ю.Геликман, М.Н.Гураевский и др.; Под ред. Г.С.Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987.