**Липецкий государственный технический университет**

Факультет автоматизации и информатики

Кафедра электропривода

Курсовая работа

по силовой электронике

«Расчет силовой части тиристорного преобразователя для электропривода постоянного тока»

Вариант 7

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Студент |  | Путин В.В. |
| Группа МР-19-1 |  |  |
| Руководитель |  | Безденежных Д.В. |
| к.т.н. |  |

Содержание

[1 Задание и исходные данные 3](#_Toc501052891)

[2 Расчет силовой схемы тиристорного преобразователя 5](#_Toc501052892)

[2.1 Определение параметров и выбор трансформатора 5](#_Toc501052893)

[2.2 Выбор тиристоров 7](#_Toc501052894)

[2.3 Расчёт индуктивности уравнительных реакторов 9](#_Toc501052895)

[2.4 Расчёт индуктивности сглаживающего реактора 10](#_Toc501052896)

[2.5 Выбор элементов защиты преобразователя 14](#_Toc501052897)

[2.5.1 Выбор элементов защиты преобразователя 14](#_Toc501052898)

[2.5.2 Защита вентилей от перенапряжений 15](#_Toc501052899)

[2.5.3 Защита двигателя 18](#_Toc501052900)

[2.5.4 Выбор автоматических выключателей 20](#_Toc501052901)

[3 Расчет и построение регулировочных характеристик 22](#_Toc501052902)

[4 Расчет и построение электромеханических характеристик 25](#_Toc501052903)

[4.1 Зона непрерывных токов 25](#_Toc501052904)

[4.2 Зона прерывистых токов при раздельном управлении 27](#_Toc501052905)

[4.3 Определение границы устойчивого инвертирования 31](#_Toc501052906)

[5 Построение диаграммы уравнительного напряжения и тока 32](#_Toc501052907)

[6 Определение полной мощности, ее составляющих, коэффициента мощности и КПД тиристорного преобразователя 33](#_Toc501052908)

[Список источников 36](#_Toc501052909)

[Приложение А 37](#_Toc501052910)

## Задание и исходные данные

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

1. Составление расчетной электрической схемы силовой части преобразователя и выбор для нее трансформатора, тиристоров и реакторов;
2. Расчет и выбор элементов защиты;
3. Расчет и построение регулировочных характеристик преобразователя;
4. Расчёт и построение семейства электромеханических характеристик привода при совместном и раздельном управлении тиристорными комплектами;
5. Построение временных диаграмм уравнительного напряжения и тока при совместном управлении тиристорными комплектами;
6. Расчёт зависимости потребляемой преобразователем активной, реактивной и полной мощности, коэффициента мощности и коэффициента полезного действия от частоты вращения якоря двигателя (при номинальном токе якоря).
7. Изображение принципиальной электрической схемы силовой части преобразователя, с указаниемназначения всех ее элементов и подробным описанием работы преобразователя в установившемся и переходном режимах.

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 сетиU1 ЛИН.;

6. Тип и мощность двигателя постоянного тока. (Параметры двигателя приведены в таблице 2).

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

|  |  |
| --- | --- |
| Схема преобразователя | Мостовая встречно-параллельная |
| Δα=(αВ+αИ)-180° | 30 эл. град. |
| αIВ | 60 эл. град |
| IМИН./IНОМ. | 35% |
| ωЯ(IМИН.)/ωЯ.Н. | 25% |
| U1 ЛИН | 380 В |
| Тип и мощность двигателя | П101 42 кВт |

Таблица 2 – Параметры двигателя П101

|  |  |
| --- | --- |
| Номинальная мощность Pн | 42 кВт |
| Номинальная частота вращения nн | 750 об/мин |
| Номинальный ток якоря Idн | 222 А |
| Номинальное напряжение якоря Udн | 220 В |
| Сопротивление якорной цепи rя+rд.п. | 0,049 Ом |
| Число полюсов 2p | 2 |

## Расчет силовой схемы тиристорного преобразователя

### 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:

, В, (1)

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.

, В;

, В.

Расчётное значение тока фазы вторичной обмотки трансформатора вычисляем по формуле:

, А,

где – коэффициент, зависящий от схемы преобразования;

– коэффициент, учитывающий отклонение формы фазного тока от прямоугольной;

– номинальный ток якоря двигателя.

, А.

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

, кВА,

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

, кВА.

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 3.

Таблица 3 – Технические данные трансформатора ТСП – 100/0,7

|  |  |
| --- | --- |
| Группа соединения обмоток | ∆/Y – 11 |
| Номинальная мощность | 93 кВА |
| Номинальное линейное напряжение первичной обмотки | 380 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:

, А

- значение линейного тока первичной обмотки:

, А

- активное сопротивление фазы трансформатора:

, Ом

- индуктивное сопротивление фазы трансформатора:



, Ом.

### Выбор тиристоров

Тиристоры выбирают по максимальному значению тока, 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:

, А,

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, 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(рисунок 1а). В трёхфазных схемах, работающих на якорь двигателя в режиме непрерывного тока, форма тока вентиля приближается к прямоугольной, а угол проводимости равен 1200 (рисунок 1б).

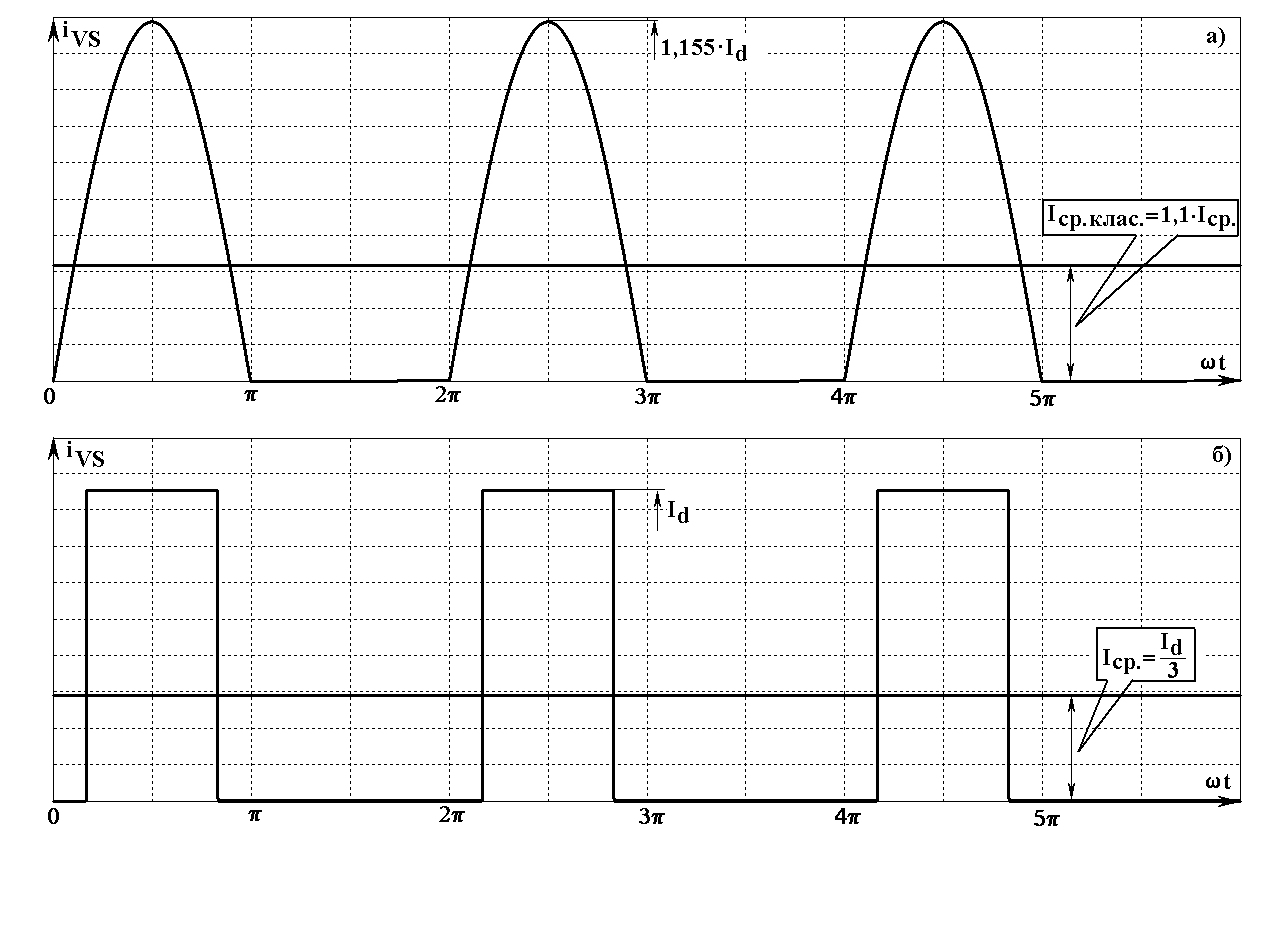


Рисунок 1 – Ток вентиля в классификационной схеме (а) и в трехфазных схемах преобразования (б) при одинаковом действующем значении.

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

, А.

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

, В,

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. Из справочника [2] выбирают тиристоры с предельными эксплуатационными параметрами, определяемыми из условий:

;



Тип выбранного тиристора – Т153-800. Технические данные прибора представлены в таблице 4.

Таблица 4 – 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 призаданной длительности импульса tи= 10 мс | 12 кА |
| Защитный показатель I2t при заданной длительности импульса tи= 10 мс | 750 кА2∙с |
| Импульсное напряжение в открытом состоянии, | 1,8 В |
| Время выключения tвакл | 32-63 мкс |
| Время обратного восстановления tвос. обр. | 4,5 мкс |

### 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 и индуктивность не меньше расчетной.

Тип выбранного уравнительного реактора – РОС64/0,5Т. Его технические характеристики приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики уравнительного реактора РОС64/0,5-Т

|  |  |
| --- | --- |
| Номинальный постоянный ток | 320 А |
| Номинальное действующее значение уравнительного тока | 31А |
| Индуктивность | 18,76 мГн |

### 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 );

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

;

– амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения, определяемая при номинальных 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.

Определим величину индуктивности сглаживающего реактора:

Расчет 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:

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

- 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;

Установка в схему сглаживающего реактора при раздельном управлении не требуется.

### 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 (1)…(3) 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:

где – ударный неповторяющийся ток тиристора в открытом состоянии.

Условие, которое представлено выше должно выполняться во всем диапазоне изменения тока отключения предохранителя.

Выбранный тип предохранителя – ПП57-3437. Его технические данные приведены в таблице 6. Характеристика интеграла Джоуля предохранителя представлена на рисунке 2.

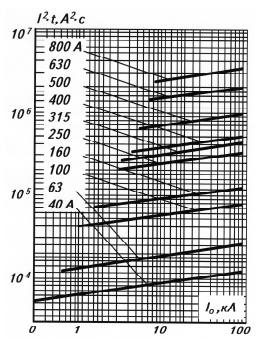


Рисунок 2 – Характеристика интеграла Джоуля предохранителя ПП57-3437.

Таблица 6 – Технические данные предохранителя ПП57-3437

|  |  |
| --- | --- |
| Номинальный ток предохранителя | 250 А |
| Номинальный ток плавких вставок | 250 А |
| Наибольшее допустимое напряжение постоянного тока | 440 В |

#### 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 (рисунок 3).

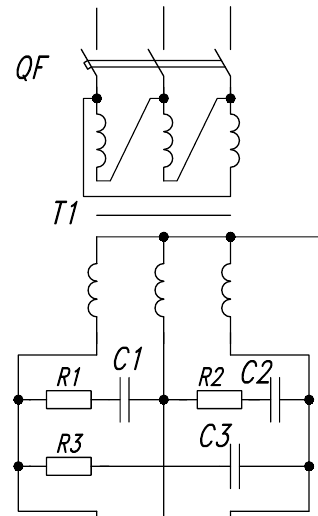


Рисунок 3 – Защита вентилей от перенапряжений в фазах трансформатора.

Емкость 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;

Примем емкость Сф=2,4 мкФ.

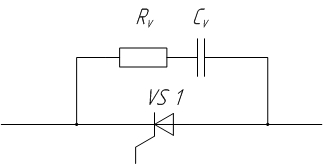
В справочнике [3] выбираем конденсатор К77-1-400-2,7 мкФ±10%

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

Принимаем сопротивление Rф =20 Ом.

Выберем резистор ПЭВ10-20±5%

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

Рисунок 4 – Защита вентиля от коммутационного перенапряжения

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

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

где – угловая частота сети;

– время обратного восстановления вентиля;

– угол управления при номинальных напряжении и токе преобразователя,

– максимальный угол коммутации вентиля.

Принимаем значение .

Выберем конденсатор К72П-6-500-0,01мкФ±10%

Сопротивление RV выбирают равным:

Принимаем значение

Выберем резистор ПЭВ10-200±5%

#### 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. 5. В ней якорь двигателя подключен к выходу преобразователя через главные контакты КМ контактора КМ, в цепи катушки которого находятся контакты защитных реле.

Защита от включения двигателя при наличии напряжения реализована с помощью реле КV1. Его катушка через добавочный резистор R16 подключена к выходу преобразователя ТП до главных контактов контактора, а размыкающий контакт реле включен последовательно с пусковой кнопкой SB2.

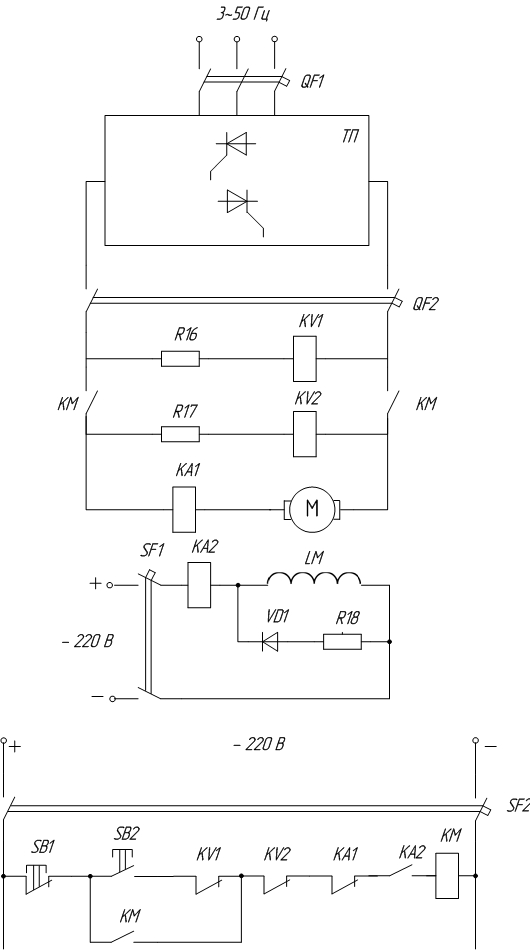


Рисунок 5 – Релейно-контакторная схема защиты двигателя

Защита якоря двигателя от недопустимого увеличения напряжения выполнена на реле КV2. Его катушка через добавочный резистор R17 подключена к выходу преобразователя после главных контактов контактора, а размыкающий контакт включен последовательно с катушкой контактора КM.

Реле КA1 осуществляет максимальную токовую защиту. Его катушка включена последовательно с якорем двигателя, а размыкающий контакт - последовательно с катушкой контактора КM.

Защиту от чрезмерного уменьшения тока возбуждения осуществляет реле КA2, катушка которого включена в цепь обмотки возбуждения двигателя, а замыкающий контакт находится в цепи катушки контактора КM. Вентиль VD1 с резистором R18 образуют цепь разряда индуктивности обмотки возбуждения двигателя после размыкания контактов автоматического выключателя SF1.

#### 2.5.4 Выбор автоматических выключателей

Для преобразователей, питающихся от сети с напряжением не более 380 В, на первичной стороне устанавливают автоматический выключатель переменного тока серии АП50Б или А3700. 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 А3715Б (QF1) 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 А3725Б (QF2):

- номинальный ток выключателя;

– номинальное напряжение;

- номинальный ток полупроводниковых расцепителей.

Для включения цепи возбуждения параллельной обмотки двигателя и релейно-контакторной схемы применим автоматические выключатели постоянного тока АП50Б2МТ (SF1, SF2):

– номинальное напряжение;

- номинальный ток расцепителей.

## Расчет 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:

Здесь – 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 расчета регулировочных характеристик , , , сведены в таблице 7.

Угол рассогласования Δα=(αВ+αИ)-180°=(α1+α2)-180° = 30 эл. град.

Таблица 7 – Результаты расчета регулировочных характеристик

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| α1, град | Ed1, В | Ud1, В | α2, град | Ed2, В | Ud2, В |
| 0 | 277,19 | 267,2 | - | - | - |
| 10 | 272,98 | 262,99 | - | - | - |
| 20 | 260,47 | 250,48 | 180 | 277,19 | 267,2 |
| 30 | 240,05 | 230,06 | 170 | 272,98 | 262,99 |
| 40 | 212,34 | 202,35 | 160 | 260,47 | 250,48 |
| 50 | 178,17 | 168,18 | 150 | 240,05 | 230,06 |
| 60 | 138,6 | 128,61 | 140 | 212,34 | 202,35 |
| 70 | 94,80 | 84,81 | 130 | 178,17 | 168,18 |
| 80 | 48,13 | 38,14 | 120 | 138,6 | 128,61 |
| 90 | 0 | -9,99 | 110 | 94,80 | 84,81 |
| 100 | -48,13 | -58,12 | 100 | 48,13 | 38,14 |
| 110 | -94,80 | -104,80 | 90 | 0 | -9,99 |
| 120 | -138,60 | -148,59 | 80 | -48,13 | -58,12 |
| 130 | -178,17 | -188,16 | 70 | -94,80 | -104,80 |
| 140 | -212,34 | -222,33 | 60 | -138,60 | -148,59 |
| 150 | -240,05 | -250,04 | 50 | -178,17 | -188,16 |
| 160 | -260,47 | -270,46 | 40 | -212,34 | -222,33 |
| 170 | -272,98 | -282,97 | 30 | -240,05 | -250,04 |
| 180 | -277,19 | -287,74 | 20 | -260,47 | -270,46 |
| - | - | - | 10 | -272,98 | -282,97 |
| - | - | - | 0 | -277,19 | -287,18 |

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



1 – Ed2; 2 – Ud2; 3 – Ed1; 4 – Ud1

Рисунок 6 – Графики регулировочных характеристик

## Расчет 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:

Здесь - 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. На рисунке 7 представлено семейство электромеханических характеристик в зоне непрерывных токов.

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 |
| 180 | 126,74 | 104,06 | 30 | 67,25 | 89,93 |
| 165 | 123,15 | 100,47 | 45 | 50,5 | 73,18 |
| 150 | 112,62 | 89,94 | 60 | 28,66 | 51,34 |
| 135 | 95,86 | 73,18 | 75 | 3,23 | 25,91 |
| 120 | 74,02 | 51,34 | 90 | -24,05 | -1,37 |
| 105 | 48,59 | 25,92 | 105 | -51,33 | -28,65 |
| 90 | 21,31 | -1,37 | 120 | -76,76 | -54,08 |
| 75 | -5,97 | -28,66 | 135 | -98,6 | -75,92 |
| 60 | -31,4 | -54,08 | 150 | -115,35 | -92,67 |
| 45 | -53,24 | -75,92 | 165 | -125,88 | -103,2 |
| 30 | -69,99 | -92,67 | 180 | -129,48 | -106,8 |

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 15º и вычисляют эдc и ток якоря двигателя, используя формулы:

где – амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора. Для мостовой схемы:

По значениям эдс, полученным из формулы выше вычислим угловую частоту вращения якоря двигателя ωЯ:

Суммарная индуктивность цепи выпрямленного тока вычисляется как

где LТ – индуктивность трансформатора, приведенная ко вторичной обмотке:

для мостовой схемы

По значениям ωЯ и Id строим электромеханическую характеристику в зоне прерывистых токов для фиксированных значений угла управления α.

Результаты расчета электромеханических характеристик сведены в таблице 9. На рисунке 8 представлено семейство электромеханических характеристик в зоне прерывистых токов. График регулировочных характеристик в зоне прерывистых токов представлен на рисунке 9.

Таблица 9 – Результаты расчета электромеханических характеристик в зоне прерывистых токов

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| λ | α1 | 30º | 45º | 60º | 75º | 90º | 105º | 120º | 135º | 150º | 165º | 180º |
| 15º | Ея, В | 267,1 | 286,6 | 286,6 | 267,1 | 229,3 | 176,0 | 110,6 | 37,7 | -37,8 | -110,7 | -176,1 |
| Id, A | 101,6 | 109,0 | 109,0 | 101,6 | 87,2 | 66,9 | 42,1 | 14,3 | -14,4 | -42,1 | -67 |
| ωя, с-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30º | Ея, В | 276,8 | 286,6 | 276,8 | 248,2 | 202,6 | 143,3 | 74,1 | -0,1 | -74,2 | -143,4 | -202,7 |
| Id, A | 105,3 | 109,0 | 105,3 | 94,4 | 77,1 | 54,5 | 28,2 | 0 | -28,2 | -54,5 | -77,1 |
| ωя, с-1 | -0,1 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 45º | Ея, В | 280,1 | 280,1 | 261,0 | 224,1 | 172 | 108,1 | 36,8 | -36,9 | 261,0 | 280,1 | 280,1 |
| Id, A | 106,5 | 106,5 | 99,3 | 85,2 | 65,4 | 41,1 | 14,0 | -14 | 99,3 | 106,5 | 106,5 |
| ωя, с-1 | -0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,3 | 0,1 | -0,1 |
| 60º | Ея, В | -239,8 | -195,8 | -138,5 | -71,7 | -0,1 | 71,6 | 138,4 | 195,7 | 239,7 | 267,4 | 276,8 |
| Id, A | -91,2 | -74,5 | -52,7 | -27,3 | 0,0 | 27,2 | 52,6 | 74,5 | 91,2 | 101,7 | 105,3 |
| ωя, с-1 | 0,9 | 1,3 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,7 | 1,6 | 1,3 | 0,9 | 0,5 | 0,0 |
| 75º | Ея, В | -249,2 | -214,0 | -164,2 | -103,3 | -35,3 | 35,1 | 103,2 | 164,1 | 213,9 | 249,1 | 267,3 |
| Id, A | -94,8 | -81,4 | -62,5 | -39,3 | -13,4 | 13,4 | 39,2 | 62,4 | 81,4 | 94,8 | 101,7 |
| ωя, с-1 | 1,3 | 2,1 | 2,7 | 3,2 | 3,4 | 3,4 | 3,2 | 2,7 | 2,1 | 1,3 | 0,5 |
| 90º | Ея, В | -252,1 | -226,1 | -184,6 | -130,6 | -67,6 | -0,1 | 67,5 | 130,5 | 184,5 | 226,0 | 252,1 |
| Id, A | -95,9 | -86,0 | -70,2 | -49,7 | -25,7 | 0,0 | 25,7 | 49,6 | 70,2 | 86,0 | 95,9 |
| ωя, с-1 | 1,5 | 2,9 | 4,1 | 5,1 | 5,7 | 5,9 | 5,7 | 5,1 | 4,1 | 2,9 | 1,5 |
| 105º | Ея, В | -248,9 | -231,9 | -199,2 | -152,9 | -96,1 | -32,8 | 32,7 | 96,0 | 152,8 | 199,1 | 231,9 |
| Id, A | -94,7 | -88,2 | -75,8 | -58,1 | -36,6 | -12,5 | 12,4 | 36,5 | 58,1 | 75,7 | 88,2 |
| ωя, с-1 | 1,2 | 3,5 | 5,5 | 7,2 | 8,4 | 9,0 | 9,0 | 8,4 | 7,2 | 5,5 | 3,5 |
| 120º | Ея, В | -239,7 | -231,6 | -207,7 | -169,6 | -119,9 | -62,1 | 0,0 | 62,0 | 119,8 | 169,5 | 207,6 |
| Id, A | -91,2 | -88,1 | -79,0 | -64,5 | -45,6 | -23,6 | 0,0 | 23,6 | 45,6 | 64,5 | 79,0 |
| ωя, с-1 | 0,0 | 3,4 | 6,6 | 9,4 | 11,5 | 12,8 | 13,2 | 12,8 | 11,5 | 9,4 | 6,6 |

Рисунок 8 – Семейство электромеханических характеристик в зоне прерывистых токов.

Рисунок 9 – Регулировочные характеристики 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, которое представлено выше на семействе электромеханических характеристик построим границы предельного режима инвертирования.

## Построение диаграммы уравнительного напряжения и тока

Диаграмма уравнительного напряжения при совместном управлении определяется как разница мгновенных значений напряжения комплекта , работающего в выпрямительном режиме, и напряжения комплекта , находящегося в режиме готовности к инвертированию:

Построение диаграммы уравнительного напряжения выполняется в следующей последовательности:

1. Для заданного угла αIВ= 60° построим диаграмму напряжения ;
2. По согласованию (αВ+αИ), вычислим угол опережения βIИ для комплекта, находящегося в режиме готовности к инвертированию:
3. Для вычисленного по (46) угла построим диаграмму напряжения ;
4. Построим график , выполнив графическое вычитание из .

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 представлены на рисунке 10.

## Определение полной мощности, ее составляющих, коэффициента мощности и КПД тиристорного преобразователя

Изменение частоты вращения при неизменном номинальном 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=1 для мостовой схемы;

γ- угол коммутации (в радианах).

Относительные величины активной и реактивной составляющих 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 | 0,0000 | 1,4990 | 0,0078 | 1,3389 | 0,0678 | 0,9977 | 1,0 | 0,8903 | 0,0506 | 0,7793 |
| 5 | 0,0637 | 1,4514 | 0,0079 | 1,3389 | 0,1152 | 0,9933 | 1,0 | 0,8903 | 0,0861 | 0,8671 |
| 10 | 0,1273 | 1,4035 | 0,0079 | 1,3389 | 0,1627 | 0,9867 | 1,0 | 0,8903 | 0,1215 | 0,9050 |
| 15 | 0,1910 | 1,3551 | 0,0080 | 1,3389 | 0,2101 | 0,9777 | 1,0 | 0,8903 | 0,1569 | 0,9260 |
| 20 | 0,2546 | 1,3063 | 0,0081 | 1,3389 | 0,2575 | 0,9663 | 1,0 | 0,8903 | 0,1923 | 0,9395 |
| 25 | 0,3183 | 1,2568 | 0,0082 | 1,3389 | 0,3049 | 0,9524 | 1,0 | 0,8903 | 0,2278 | 0,9487 |
| 30 | 0,3819 | 1,2065 | 0,0083 | 1,3388 | 0,3524 | 0,9359 | 1,0 | 0,8902 | 0,2632 | 0,9556 |
| 35 | 0,4456 | 1,1553 | 0,0085 | 1,3388 | 0,3998 | 0,9166 | 1,0 | 0,8902 | 0,2986 | 0,9608 |
| 40 | 0,5092 | 1,1028 | 0,0087 | 1,3388 | 0,4472 | 0,8944 | 1,0 | 0,8902 | 0,3340 | 0,9649 |
| 45 | 0,5729 | 1,0489 | 0,0090 | 1,3388 | 0,4946 | 0,8691 | 1,0 | 0,8901 | 0,3695 | 0,9683 |
| 50 | 0,6365 | 0,9933 | 0,0093 | 1,3387 | 0,5420 | 0,8403 | 1,0 | 0,8901 | 0,4049 | 0,9710 |
| 55 | 0,7002 | 0,9355 | 0,0097 | 1,3387 | 0,5895 | 0,8078 | 1,0 | 0,8900 | 0,4403 | 0,9733 |
| 60 | 0,7638 | 0,8753 | 0,0101 | 1,3387 | 0,6369 | 0,7709 | 1,0 | 0,8900 | 0,4758 | 0,9753 |
| 65 | 0,8275 | 0,8118 | 0,0107 | 1,3386 | 0,6843 | 0,7292 | 1,0 | 0,8899 | 0,5112 | 0,9770 |
| 70 | 0,8912 | 0,7442 | 0,0115 | 1,3385 | 0,7317 | 0,6816 | 1,0 | 0,8897 | 0,5467 | 0,9785 |
| 75 | 0,9548 | 0,6712 | 0,0125 | 1,3384 | 0,7792 | 0,6268 | 1,0 | 0,8896 | 0,5822 | 0,9798 |
| 78,55 | 1,0000 | 0,6150 | 0,0134 | 1,3383 | 0,8128 | 0,5824 | 1,0 | 0,8894 | 0,6074 | 0,9806 |
| 85 | 1,0821 | 0,4993 | 0,0161 | 1,3380 | 0,8740 | 0,4858 | 1,0 | 0,8890 | 0,6532 | 0,9820 |
| 90 | 1,1458 | 0,3888 | 0,0201 | 1,3376 | 0,9214 | 0,3884 | 0,99 | 0,8884 | 0,6889 | 0,9829 |
| 95 | 1,2094 | 0,2339 | 0,0316 | 1,3364 | 0,9689 | 0,2471 | 0,99 | 0,8866 | 0,7250 | 0,9837 |

Графики зависимостей представлены на рисунке 11.

Рисунок 11 – Графики зависимостей полной мощности и ее составляющих, коэффициента мощности и КПД.

## Моделирование

В приложении А представлены результаты моделирования, рассчитанного тиристорного преобразователя в среде моделирования MATLAB Simulink. В пункте 1 приложения, на рисунке А.1 представлена осциллограмма уравнительного тока и напряжения. В пункте 2 приложения, на рисунке А.2 представлено осциллограммы выпрямленного тока и напряжения при изменении значения выпрямленного тока. Изменение тока производились путем изменения заданного угла α. α1=60º, α2=150º. В пункте 3 приложения, на рисунке А.3 представлены осциллограммы переходных процессов активной, реактивной и полной мощности сети при пуске двигателя с нагрузкой.

## Список источников

1. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977 – 432 с.
2. Черепанов В.П., Хрулев А.К. Тиристоры и их зарубежные аналоги Справочник в 2 томах. М.: ИП РадиоСофт, 2002 – 512 с.
3. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1987 – 656 с.
4. Зимин Е.Н., Кацевич В.Л., Козырев С.К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоиздат, 1981.
5. Силовые полупроводниковые преобразователи в металлургии. Под ред. С.Р.Рязинского. М.: Металлургия, 1976.
6. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Петухов В.М. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник. М.: Радио и связь, 1988.
8. Справочник по проектированию электропривода, силовых и осветительных установок / Под ред. Н.М.Большама и др. М.: Энергия, 1974.
9. Александров К.К., Кузьмина Е.Г. Электротехнические чертежи и схемы. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
10. 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.
11. 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.
12. Стандарт организации. Студенческие работы. Общие требования к оформлению: метод.указания для студентов №2929. Липецк: ЛГТУ, 2011. 32 с.

Приложение А

1 Осциллограмма уравнительного тока и напряжения

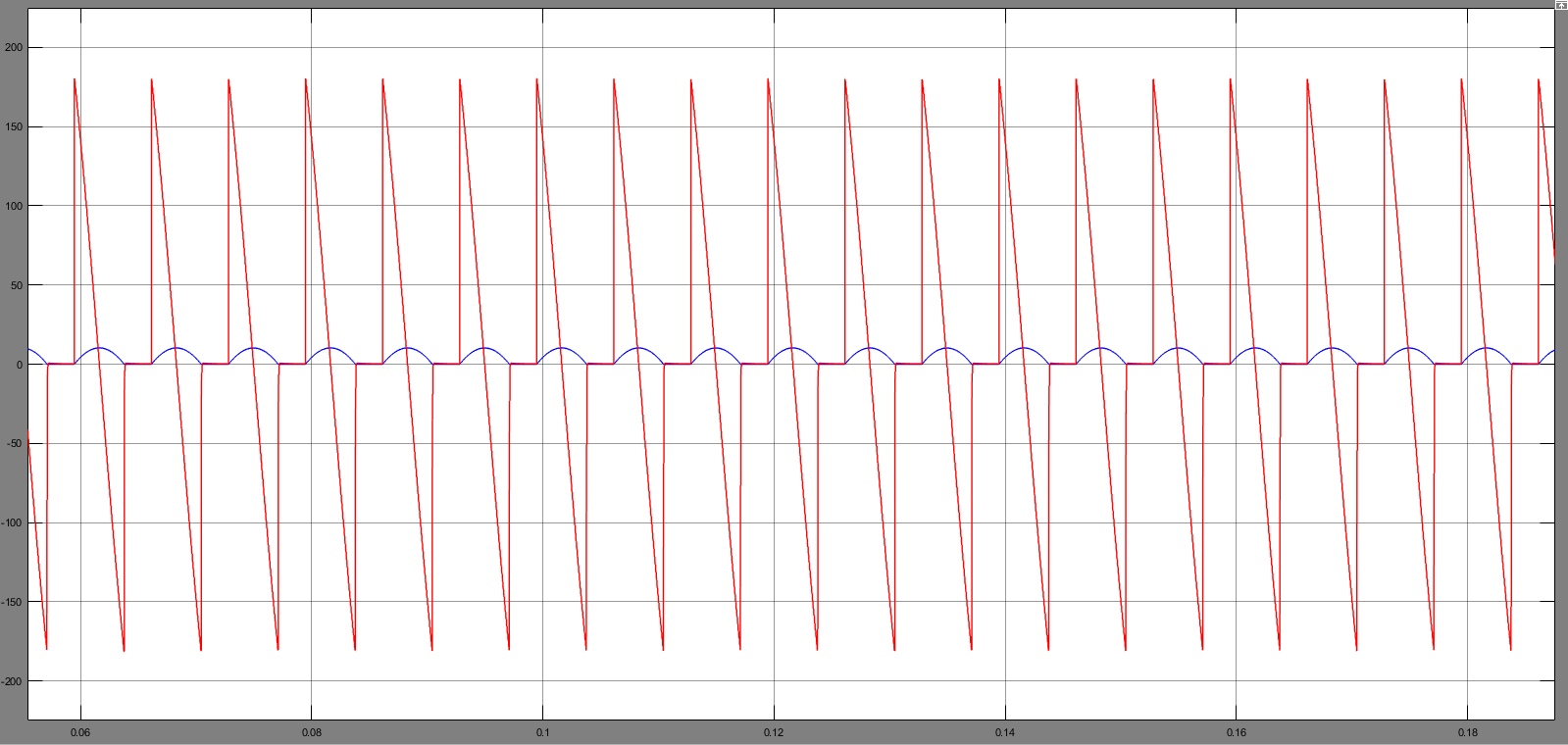


Рисунок А.1 – Осциллограмма уравнительного тока и напряжения

2 Осциллограммы выпрямленного тока и напряжения при переходном процессе – изменении значения выпрямленного тока

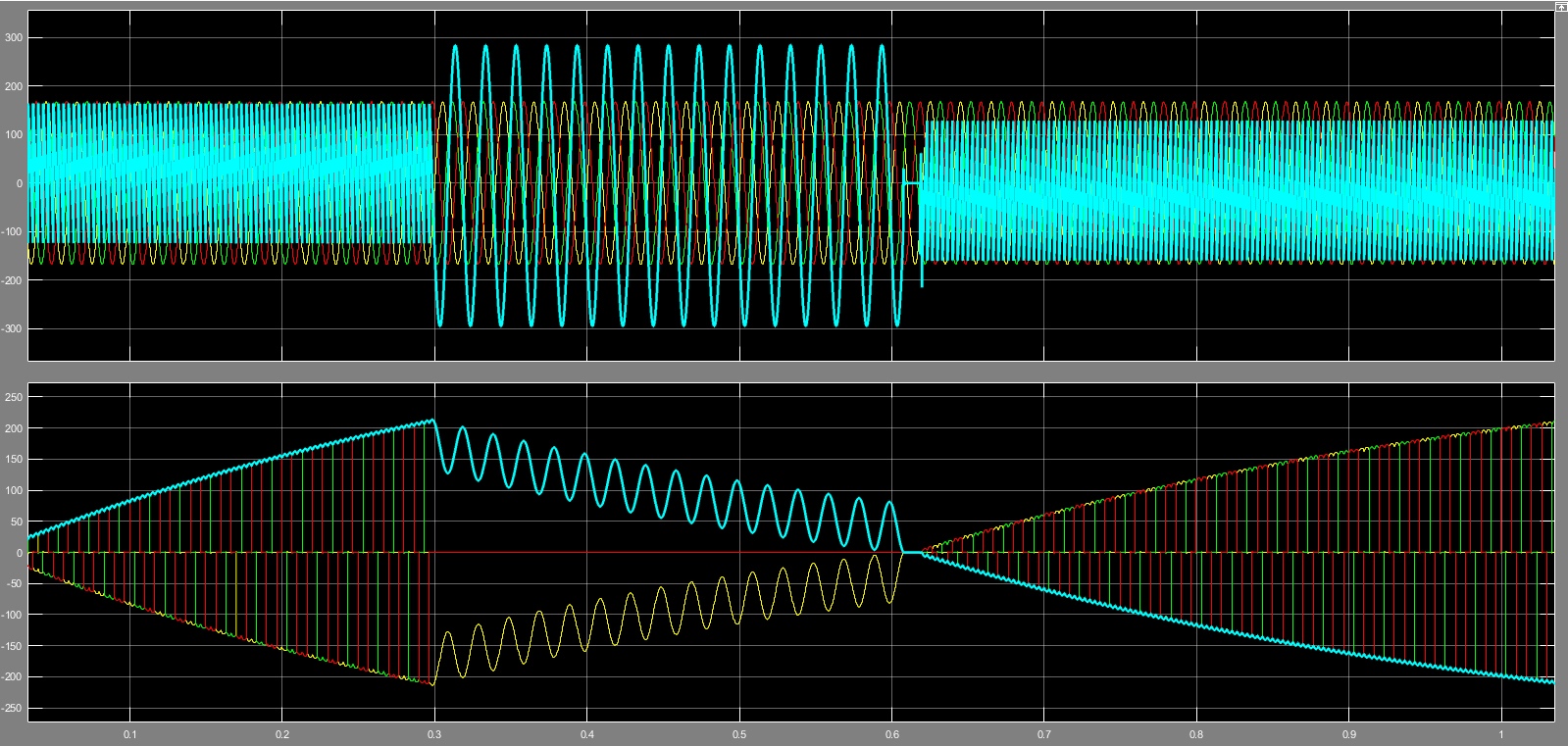


Рисунок А.2 – Осциллограммы выпрямленного напряжения и тока

3 График тока якоря, скорости вращения вала, электромагнитного момента

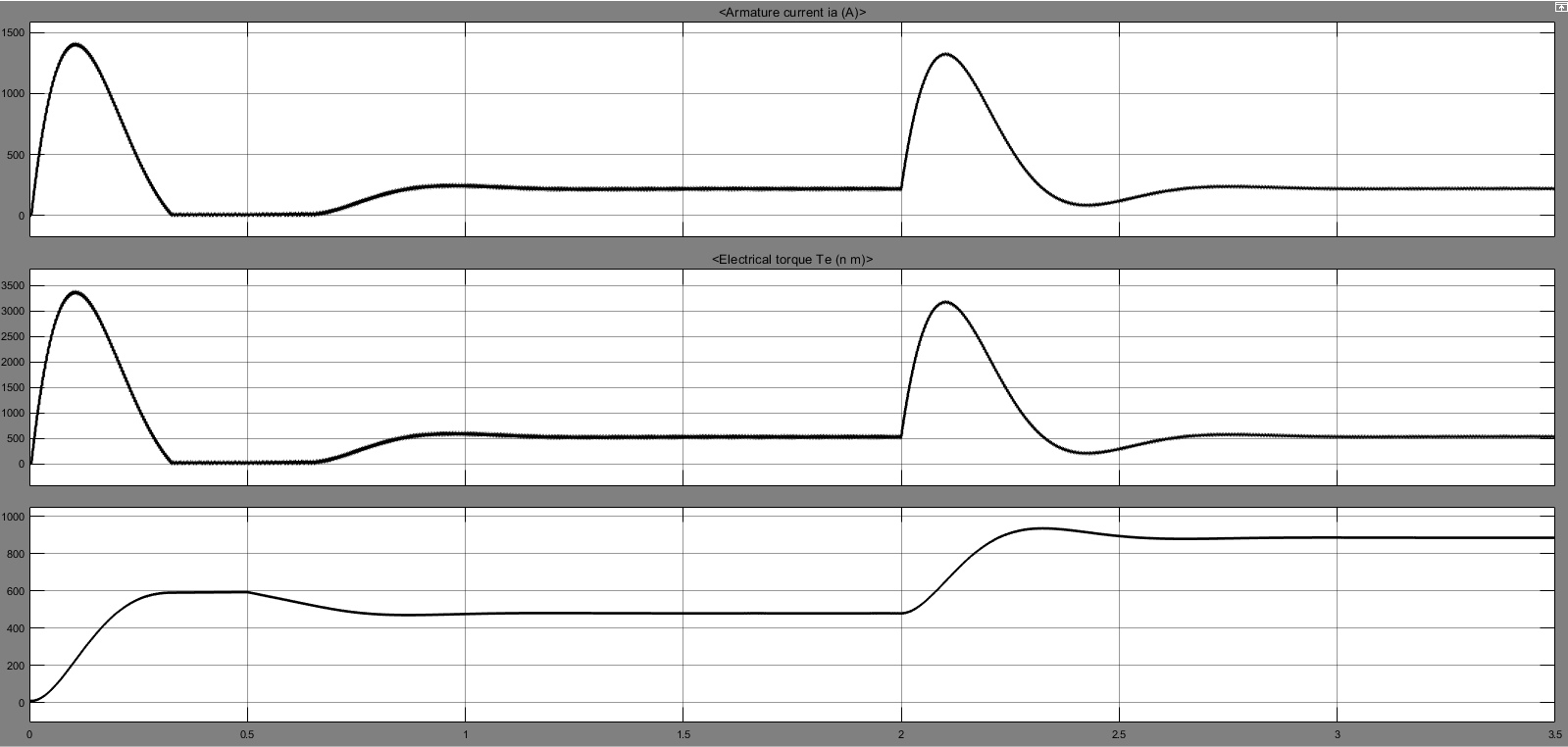


Рисунок А.3 – График тока якоря, скорости вращения вала,  
 электромагнитного момента

4 Осцилограммы переходных процессов активной, реактивной, полной мощности сети при пуске двигателя с нагрузкой

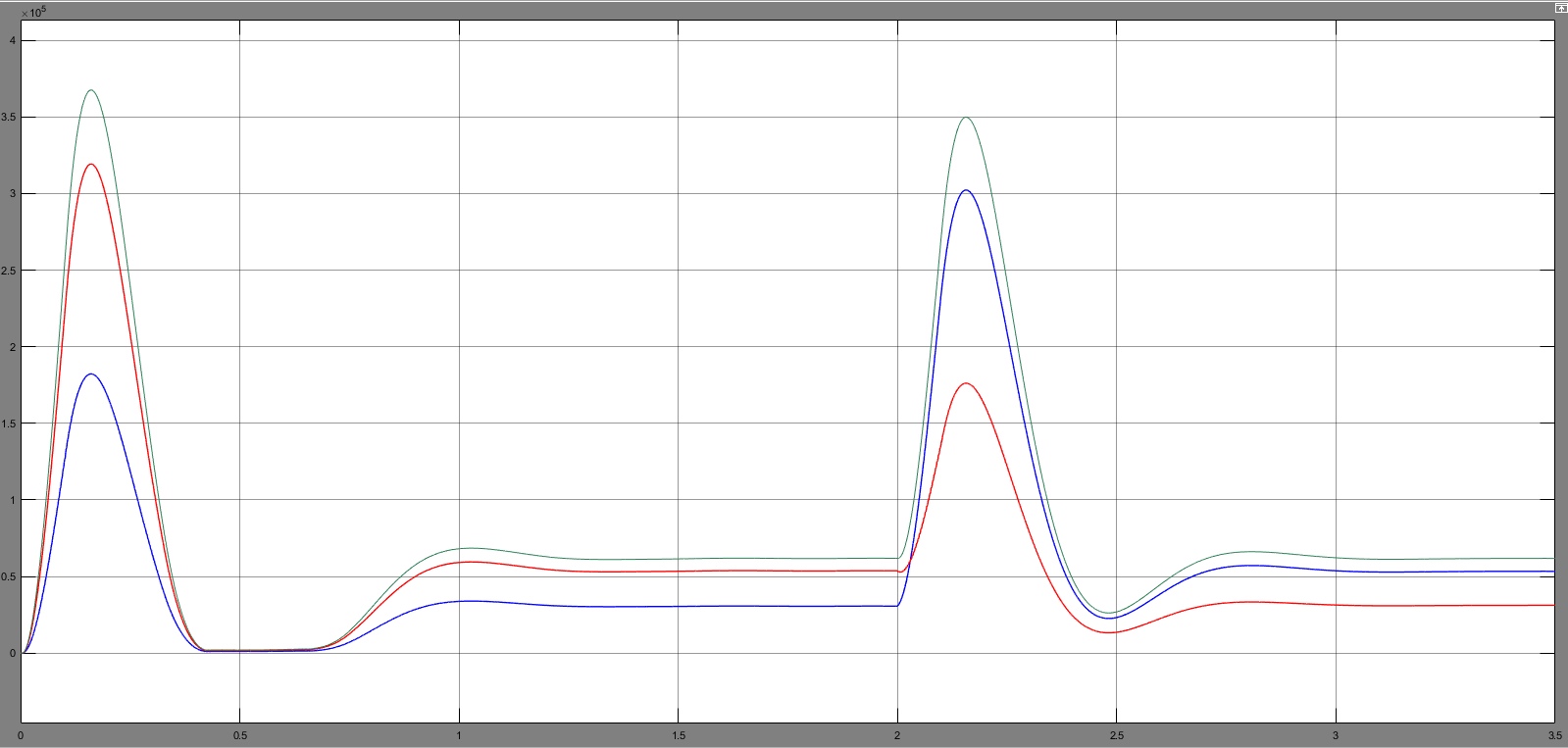


Рисунок А.4 – Осциллограммы переходных процессов мощностей.