**Липецкий государственный технический университет**

Факультет автоматизации и информатики

Кафедра электропривода

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

по электронике

«Расчет силовой части тиристорного преобразователя для электропривода постоянного тока»

Вариант 41

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Студент |  | Кондратьев С.Е. |
| Группа АСМР-19-1 |  |  |
| Руководитель |  | Безденежных Д.В. |
| к.т.н., доцент |  |

Оглавление

[1 Задание и исходные данные 3](#_Toc91108512)

[2 Расчет силовой схемы тиристорного преобразователя 5](#_Toc91108513)

[2.1 Определение параметров и выбор трансформатора 5](#_Toc91108514)

[2.2 Выбор тиристоров 8](#_Toc91108515)

[2.3 Расчёт индуктивности уравнительных реакторов 11](#_Toc91108516)

[2.4 Расчёт индуктивности сглаживающего реактора 12](#_Toc91108517)

[2.5 Выбор элементов защиты преобразователя 17](#_Toc91108518)

[2.5.1 Выбор элементов защиты преобразователя 17](#_Toc91108519)

[2.5.2 Защита вентилей от перенапряжений 19](#_Toc91108520)

[2.5.3 Защита двигателя 23](#_Toc91108521)

[2.5.4 Выбор автоматических выключателей 24](#_Toc91108522)

[3 Расчёт и построение регулировочных характеристик 26](#_Toc91108523)

[4 Расчет и построение электромеханических характеристик 29](#_Toc91108524)

[4.1 Зона непрерывных токов 29](#_Toc91108525)

[4.2 Зона прерывистых токов при раздельном управлении 32](#_Toc91108526)

[4.3 Определение границы устойчивого инвертирования 35](#_Toc91108527)

[5 Построение диаграммы уравнительного напряжения и тока 37](#_Toc91108528)

[6 Определение полной мощности, ее составляющих, коэффициента мощности и КПД тиристорного преобразователя 39](#_Toc91108529)

[Список источников 43](#_Toc91108530)

## 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 сети U1 ЛИН.;

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

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

|  |  |
| --- | --- |
| Схема преобразователя | Нулевая встречно-параллельная |
| Δα=(αВ+αИ)-180° | 25 эл. град. |
| αIВ | 35 эл. град |
| IМИН./IНОМ. | 20% |
| ωЯ(IМИН.)/ωЯ.Н. | 40% |
| U1 ЛИН | 220 В |
| Тип и мощность двигателя | П61 4,5 кВт |

Таблица 2 – Параметры двигателя П61

|  |  |
| --- | --- |
| Номинальная мощность Pн | 4,5 кВт |
| Номинальная частота вращения nн | 750 об/мин |
| Номинальный ток якоря Idн | 26 А |
| Номинальное напряжение якоря Udн | 220 В |
| Сопротивление якорной цепи rя+rд.п. | 0,76 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 напряжения 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 – 16/0,7

|  |  |
| --- | --- |
| Группа соединения обмоток | Y/Yн – 0 |
| Номинальная мощность | 12 кВА |
| Номинальное линейное напряжение первичной обмотки | 220 В |
| Номинальное линейное напряжение вторичной обмотки | 410 В |
| Номинальный фазный ток вторичной обмотки | 16,9 А |
| Напряжение короткого замыкания | 5,5% |
| Ток холостого хода | 8% |
| Потери короткого замыкания | 550 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).

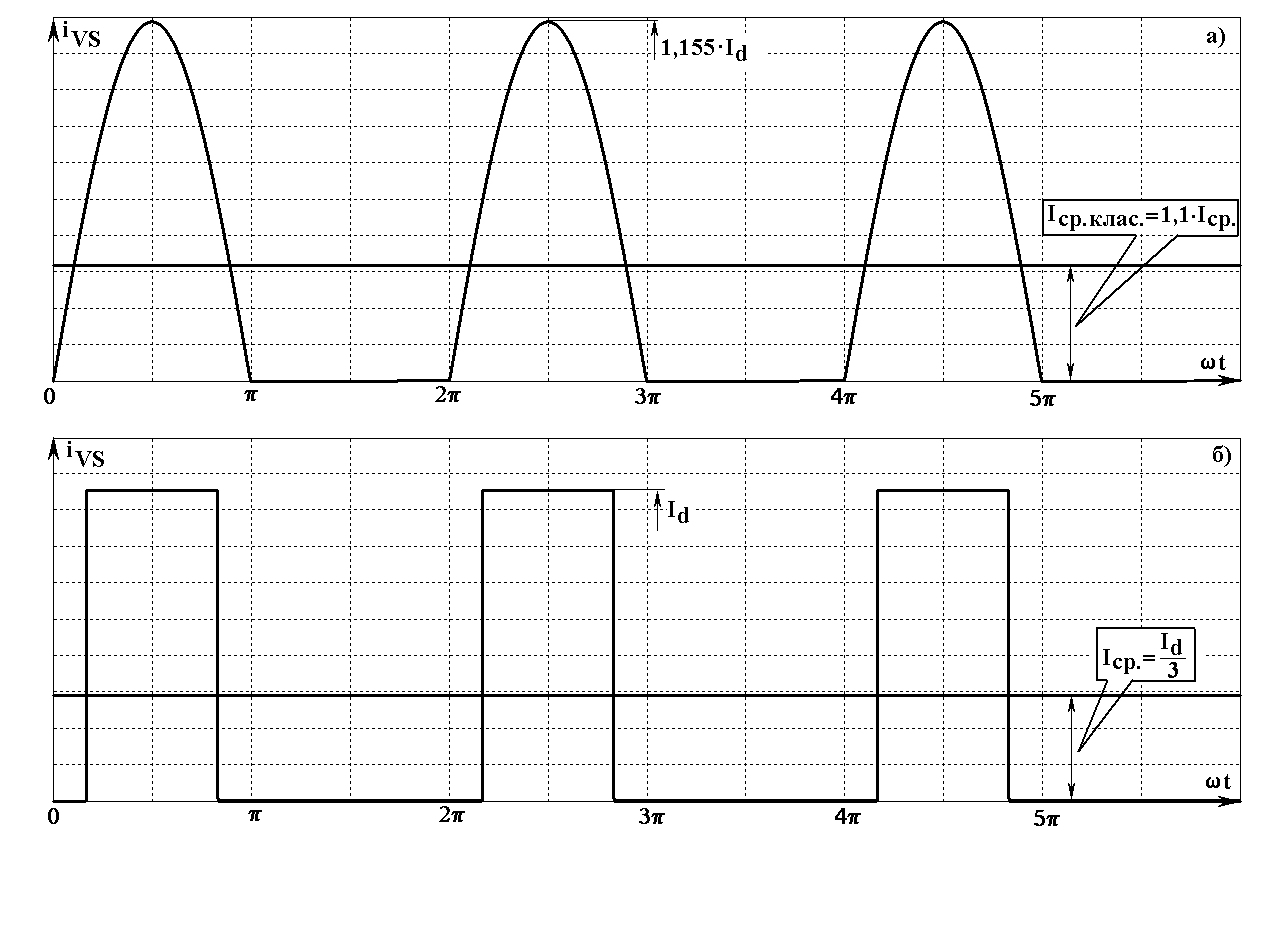


Рисунок 1 – Ток вентиля в классификационной схеме (а) и в трехфазных схемах преобразования (б) при одинаковом действующем значении.

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 – ТБ171-160. Технические данные прибора представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические данные тиристора ТБ171-160

|  |  |
| --- | --- |
| Предельные эксплуатационные параметры | |
| Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии | 1200 В |
| Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии | 160 А |
| Ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии при заданной длительности импульса tи = 10 мс | 4 кА |
| Защитный показатель I2t при заданной длительности импульса tи = 10 мс | 80 кА2∙с |
| Импульсное напряжение в открытом состоянии, | 2 В |
| Время выключения tвыкл | 20-50 мкс |
| Время обратного восстановления tвос. обр. | 2,8 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 нулевой 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 – СРОС-200/6УХЛ4. Его технические характеристики приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики уравнительного реактора СРОС-200/6УХЛ4

|  |  |
| --- | --- |
| Номинальный выпрямленный ток | 50 А |
| Индуктивность | 250 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 нулевой 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 нулевой 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 – ПП57-3127. Его технические данные приведены в таблице 7. Характеристика интеграла Джоуля предохранителя представлена на рисунке 2.

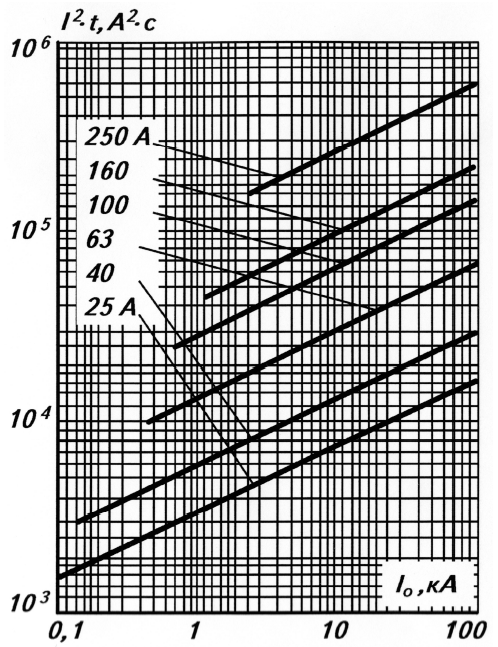


Рисунок 2 – Характеристика интеграла Джоуля предохранителя ПП57-3127

Таблица 7 – Технические данные предохранителя ПП57-3127

|  |  |
| --- | --- |
| Номинальный ток предохранителя | 100 А |
| Номинальный ток плавких вставок | 40 А |
| Номинальное напряжение применяемого предохранителя | 220 В |
| Наибольшее допустимое напряжение постоянного тока | 200 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=0,4 мкФ. В справочнике [3] выбираем конденсатор К77-1-400-0,47 мкФ±5%. Для обеспечения апериодического переходного процесса в контуре, образуемом демпфирующей цепочкой с индуктивностью рассеяния трансформатора, сопротивление резистора выбирают из соотношения:

Принимаем сопротивление Rф =200 Ом. Выберем резистор ПЭВ15-200±5% Для подавления периодических коммутационных перенапряжений на вентиле, возникающих при его запирании, параллельно каждому тиристору подключают цепь RVCV (рисунок 4).

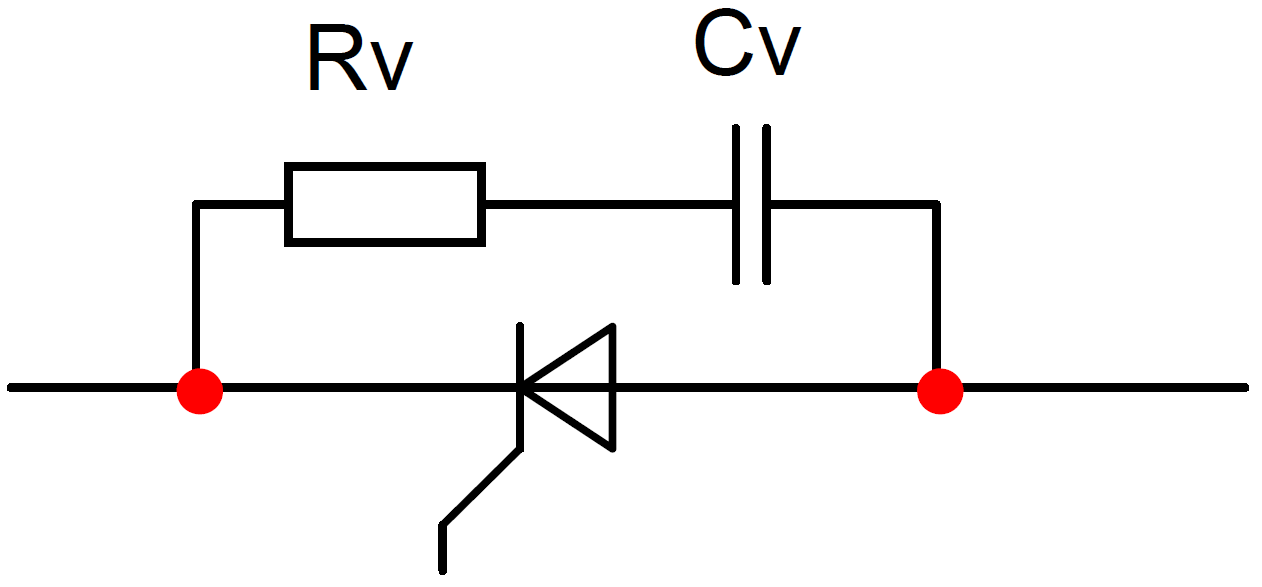


Рисунок 4 – Защита вентиля от коммутационного перенапряжения

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 К77-1-400-0,39 мкФ±5%. Сопротивление RV выбирают равным:

Выберем резистор ПЭВ25-6800 ± 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. 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.

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

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 обеспечивает релейно-контакторная схема, показанная на рисунке 5.

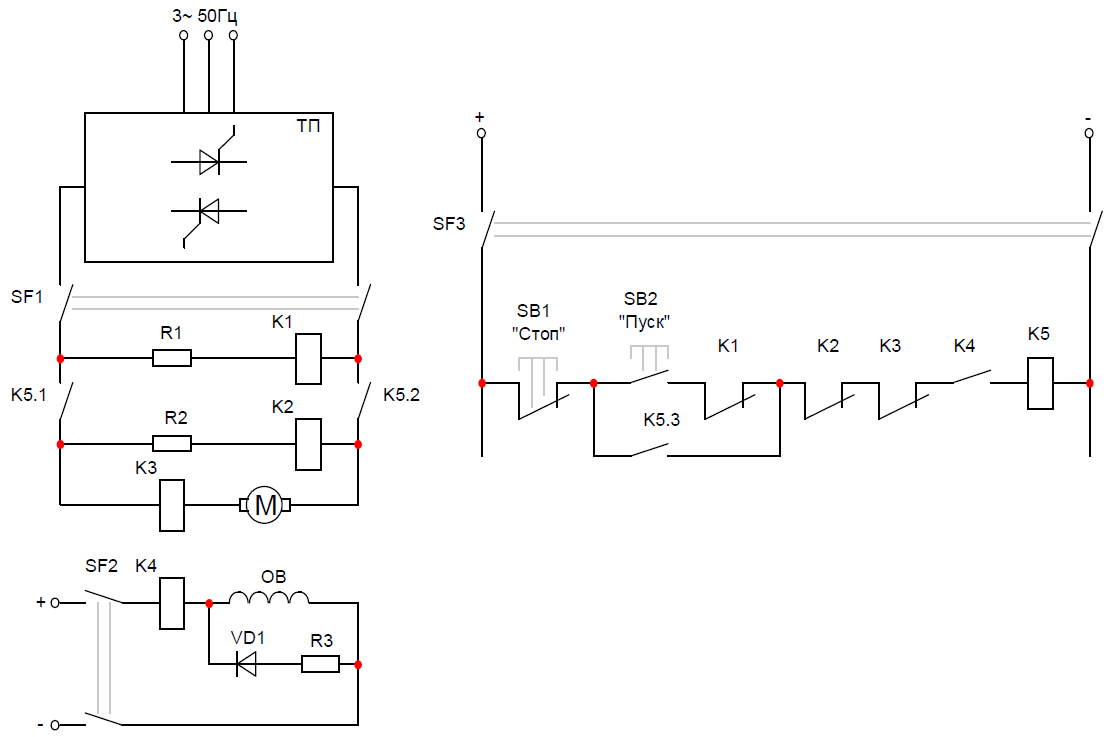


Рисунок 5 – Релейно-контакторная схема защиты двигателя

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 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.

### 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:

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

Для нулевой схемы:

где m – число фаз преобразователя (m=3 для трехфазной нулевой схемы).

Результаты расчета регулировочных характеристик , , , сведены в таблице 8.

Угол рассогласования

Δα=(αВ+αИ)-180°=(α1+α2)-180° = 25 эл. град.

Таблица 8 – Результаты расчета регулировочных характеристик

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| α1, град | Ed1, В | Ud1, В | α2, град | Ed2, В | Ud2, В |
| 0 | 257,3099415 | 235,443592 | 25 | 279,17627 | 257,3099202 |
| 10 | 253,3998141 | 231,533465 | 35 | 275,28435 | 253,4179962 |
| 20 | 241,7882699 | 219,921921 | 45 | 263,69045 | 241,8241029 |
| 30 | 210,7642741 | 188,897925 | 60 | 244,74695 | 222,8806058 |
| 40 | 197,0958782 | 175,229529 | 65 | 219,02959 | 197,1632424 |
| 50 | 165,3733378 | 143,506989 | 75 | 187,31997 | 165,4536241 |
| 60 | 128,6247123 | 106,758363 | 85 | 150,58183 | 128,7154806 |
| 70 | 87,96687906 | 66,1005299 | 95 | 109,93172 | 88,06537064 |
| 80 | 44,6355253 | 22,7691761 | 105 | 66,605096 | 44,73874681 |
| 90 | -0,05240714 | -21,918756 | 115 | 21,918756 | 0,05240714 |
| 100 | -44,73874681 | -66,605096 | 125 | -22,7691761 | -44,6355253 |
| 110 | -88,06537064 | -109,93172 | 135 | -66,1005299 | -87,96687906 |
| 120 | -128,7154806 | -150,58183 | 145 | -106,758363 | -128,6247123 |
| 130 | -165,4536241 | -187,31997 | 155 | -143,506989 | -165,3733378 |
| 140 | -197,1632424 | -219,02959 | 165 | -175,229529 | -197,0958782 |
| 150 | -222,8806058 | -244,74695 | 175 | -188,897925 | -210,7642741 |
| 160 | -241,8241029 | -263,69045 | 185 | -219,921921 | -241,7882699 |
| 170 | -253,4179962 | -275,28435 | 195 | -231,533465 | -253,3998141 |
| 180 | -257,3099202 | -279,17627 | 205 | -235,443592 | -257,3099415 |

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

Рисунок 6 – Графики регулировочных характеристик

## 4 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 шагом 15º, по уравнению:

Здесь – падение напряжения на вентилях.

Для нулевой 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 9. На рисунке 7 представлено семейство электромеханических характеристик в зоне непрерывных токов.

Таблица 9 – Результаты расчета электромеханических характеристик

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Первый комплект | | | Второй комплект | | |
| α | ω | Id | α | ω | Id |
| 25 | 27,8871317 | 78 | 180 | 167,5910394 | -78 |
| 25 | 92,8958585 | 0 | 180 | 102,5823126 | 0 |
| 40 | 13,3858792 | 78 | 165 | 164,0682502 | -78 |
| 40 | 78,394606 | 0 | 165 | 99,05952333 | 0 |
| 55 | -6,5125995 | 78 | 150 | 153,7399548 | -78 |
| 55 | 58,4961274 | 0 | 150 | 88,73122795 | 0 |
| 70 | -30,452256 | 78 | 135 | 137,3100095 | -78 |
| 70 | 34,5564709 | 0 | 135 | 72,30128265 | 0 |
| 85 | -56,801642 | 78 | 120 | 115,8980879 | -78 |
| 85 | 8,20708474 | 0 | 120 | 50,88936106 | 0 |
| 100 | -83,765091 | 78 | 105 | 90,96337712 | -78 |
| 100 | -18,756364 | 0 | 105 | 25,95465026 | 0 |

Окончание таблицы 9

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 115 | -109,50509 | 78 | 90 | 64,20513643 | -78 |
| 115 | -44,496361 | 0 | 90 | -0,803590428 | 0 |
| 130 | -132,26749 | 78 | 75 | 37,44689575 | -78 |
| 130 | -67,258768 | 0 | 75 | -27,56183111 | 0 |
| 145 | -150,50109 | 78 | 60 | 12,51218494 | -78 |
| 145 | -85,492364 | 0 | 60 | -52,49654192 | 0 |
| 160 | -162,96329 | 78 | 45 | -8,899736642 | -78 |
| 160 | -97,954561 | 0 | 45 | -73,9084635 | 0 |
| 175 | -168,80481 | 78 | 30 | -25,32968194 | -78 |
| 175 | -103,79608 | 0 | 30 | -90,3384088 | 0 |

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 нулевой 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 нулевой 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 10.

Таблица 10 – Результаты расчета электромеханических характеристик в зоне прерывистых токов

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| λ | α1 | 1800 | 1650 | 1500 | 1350 | 1200 | 1050 | 900 | 750 | 600 | 450 | 250 |
| 15º | Ея, В | -352,1 | -221,4 | -75,6 | 75,4 | 221,2 | 351,9 | 458,7 | 534,2 | 573,2 | 573,2 | 512,8 |
| ωя, с-1 | -141,5 | -89,0 | -30,4 | 30,3 | 88,9 | 141,4 | 184,3 | 214,6 | 230,3 | 230,3 | 206,1 |
| Id, A | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Окончание таблицы 10

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 30º | Ея, В | -405,5 | -286,7 | -148,5 | -0,1 | 148,3 | 286,5 | 405,3 | 496,4 | 553,7 | 573,2 | 538,6 |
| ωя, с-1 | -162,9 | -115,2 | -59,7 | 0,0 | 59,6 | 115,1 | 162,8 | 199,5 | 222,5 | 230,3 | 216,4 |
| Id, A | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 45º | Ея, В | -448,4 | -344,1 | -216,4 | -73,9 | 73,6 | 216,1 | 343,9 | 448,2 | 522,0 | 560,2 | 551,6 |
| ωя, с-1 | -180,2 | -138,3 | -86,9 | -29,7 | 29,6 | 86,8 | 138,2 | 180,1 | 209,7 | 225,1 | 221,6 |
| Id, A | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| 60º | Ея, В | -479,6 | -391,6 | -277,0 | -143,4 | -0,1 | 143,2 | 276,8 | 391,5 | 479,5 | 534,8 | 551,6 |
| ωя, с-1 | -192,7 | -157,4 | -111,3 | -57,6 | 0,0 | 57,5 | 111,2 | 157,3 | 192,7 | 214,9 | 221,6 |
| Id, A | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| 75º | Ея, В | -498,3 | -428,0 | -328,4 | -206,5 | -70,5 | 70,3 | 206,3 | 328,3 | 427,8 | 498,2 | 538,8 |
| ωя, с-1 | -200,2 | -172,0 | -132,0 | -83,0 | -28,3 | 28,2 | 82,9 | 131,9 | 171,9 | 200,2 | 216,5 |
| Id, A | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 |
| 90º | Ея, В | -504,3 | -452,2 | -369,2 | -261,1 | -135,2 | -0,1 | 135,0 | 260,9 | 369,1 | 452,1 | 514,1 |
| ωя, с-1 | -202,6 | -181,7 | -148,4 | -104,9 | -54,3 | 0,0 | 54,3 | 104,8 | 148,3 | 181,6 | 206,6 |
| Id, A | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,4 | -0,4 | -0,4 |
| 105º | Ея, В | -497,7 | -463,9 | -398,4 | -305,7 | -192,2 | -65,6 | 65,4 | 192,0 | 305,6 | 398,2 | 478,8 |
| ωя, с-1 | -200,0 | -186,4 | -160,1 | -122,8 | -77,2 | -26,4 | 26,3 | 77,2 | 122,8 | 160,0 | 192,4 |
| Id, A | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | -0,1 | -0,2 | -0,4 |
| 120º | Ея, В | -479,5 | -463,2 | -415,3 | -339,2 | -239,9 | -124,2 | -0,1 | 124,0 | 239,7 | 339,0 | 434,6 |
| ωя, с-1 | -192,7 | -186,1 | -166,9 | -136,3 | -96,4 | -49,9 | 0,0 | 49,8 | 96,3 | 136,2 | 174,6 |
| Id, A | 0,7 | 1,0 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,3 | 1,0 | 0,7 | 0,4 | -0,1 |

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.

## 5 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= 35° 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.

## 6 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=1,28 для нулевой 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 11 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 11 – Расчет зависимостей полной мощности и ее составляющих, коэффициента мощности и КПД

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ω |  | a |  |  |  |  |  |  |  | η |
| 0 | 0,0000 | 1,3596 | 0,0410 | 1,3354 | 0,1895 | 0,9817 | 0,9998 | 0,8852 | 0,1419 | 0,4914 |
| 5 | 0,0637 | 1,3099 | 0,0415 | 1,3353 | 0,2378 | 0,9711 | 0,9998 | 0,8851 | 0,1781 | 0,5868 |
| 10 | 0,1273 | 1,2595 | 0,0420 | 1,3352 | 0,2862 | 0,9579 | 0,9998 | 0,8851 | 0,2143 | 0,6520 |
| 15 | 0,1910 | 1,2082 | 0,0427 | 1,3352 | 0,3346 | 0,9421 | 0,9998 | 0,8849 | 0,2506 | 0,6995 |
| 20 | 0,2546 | 1,1560 | 0,0436 | 1,3351 | 0,3829 | 0,9235 | 0,9998 | 0,8848 | 0,2868 | 0,7355 |
| 25 | 0,3183 | 1,1024 | 0,0446 | 1,3350 | 0,4313 | 0,9019 | 0,9998 | 0,8847 | 0,3231 | 0,7638 |
| 30 | 0,3819 | 1,0475 | 0,0459 | 1,3348 | 0,4796 | 0,8772 | 0,9997 | 0,8845 | 0,3593 | 0,7867 |
| 35 | 0,4456 | 0,9907 | 0,0474 | 1,3347 | 0,5280 | 0,8489 | 0,9997 | 0,8842 | 0,3956 | 0,8055 |
| 40 | 0,5092 | 0,9317 | 0,0493 | 1,3345 | 0,5764 | 0,8168 | 0,9997 | 0,8840 | 0,4319 | 0,8213 |
| 45 | 0,5729 | 0,8700 | 0,0516 | 1,3342 | 0,6247 | 0,7804 | 0,9997 | 0,8836 | 0,4682 | 0,8347 |
| 50 | 0,6365 | 0,8048 | 0,0545 | 1,3339 | 0,6731 | 0,7391 | 0,9996 | 0,8832 | 0,5046 | 0,8462 |
| 55 | 0,7002 | 0,7354 | 0,0582 | 1,3335 | 0,7215 | 0,6919 | 0,9996 | 0,8827 | 0,5410 | 0,8563 |
| 60 | 0,7638 | 0,6601 | 0,0631 | 1,3330 | 0,7698 | 0,6375 | 0,9995 | 0,8819 | 0,5775 | 0,8651 |
| 65 | 0,8275 | 0,5766 | 0,0701 | 1,3322 | 0,8182 | 0,5739 | 0,9994 | 0,8809 | 0,6141 | 0,8728 |
| 70 | 0,8912 | 0,4807 | 0,0809 | 1,3311 | 0,8665 | 0,4975 | 0,9992 | 0,8794 | 0,6510 | 0,8798 |
| 75 | 0,9548 | 0,3624 | 0,1004 | 1,3290 | 0,9149 | 0,4005 | 0,9987 | 0,8768 | 0,6884 | 0,8860 |
| 78,55 | 1,0000 | 0,2481 | 0,1307 | 1,3257 | 0,9492 | 0,3077 | 0,9979 | 0,8728 | 0,7160 | 0,8900 |

Графики зависимостей представлены на рисунке 10.

Рисунок 10 – Графики зависимостей полной мощности и ее составляющих, коэффициента мощности и КПД

## 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.