

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

Кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта»

ЭТП

Конструкции преобразовательных агрегатов

Методические указания к выполнению контрольной работы
для обучающихся по специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения
поездов»

Составитель: Л.С. Лабунский

Самара
2015

УДК 621.331:621.311.4

ЭТП: методические указания к выполнению контрольной работы «Проектирование выпрямительно-инверторного преобразователя тяговой подстанции постоянного тока» для обучающихся по специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» / составитель Л.С. Лабунский. - Самара: СамГУПС, 2015. - 42 с.

Утверждены на заседании кафедры 23 апреля 2015 года, протокол № 12.
Печатается по решению редакционно-издательского совета университета.

Приведены исходные данные и методические указания к выполнению практических работ «Проектирование выпрямительно-инверторного преобразователя тяговой подстанции постоянного тока».

Составитель: Лабунский Леонид Сергеевич

Рецензент: к.т.т., доцент СамГУПС Е.В. Добрынин;

Редактор И.М. Егорова
Компьютерная верстка: Е.А Ковалева

Подписано в печать __.__.2015. Формат 60х90 1/16.
Усл. печ. л. _____. Электронное издание. Заказ ____.

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергия вырабатывается и используется в различных видах: в виде переменного тока частотой 50 или 60 Гц, в виде переменного тока пониженной (16 1/3 Гц) и повышенной (400 Гц) частоты, а также в виде постоянного тока. Это различие связано с многообразием потребителей электроэнергии и их спецификой. В настоящее время преобразование электроэнергии производят с помощью электронных схем на полупроводниковых приборах.

На железнодорожном транспорте применяются выпрямительно-инверторные агрегаты тяговых подстанций постоянного тока, созданы устройства преобразования постоянного тока и однофазного переменного тока в трёхфазный переменный ток регулируемой частоты для управления частотой вращения асинхронных тяговых двигателей электроподвижного состава.

В промышленности применяются мощные выпрямительные установки для получения чистых металлов методом электролиза и для нанесения гальванических покрытий.

Для изучения дисциплины «ЭТП» требуется освоение дисциплин: «Теоретические основы электротехники», «Материаловедение», «Электроника», «Электрические машины», «Электронная техника и преобразователи». Приступая к изучению дисциплины, студент должен владеть методологией расчета и проектирования электронных схем, выбора электротехнических материалов, проведения электрических измерений.

Компетенции дисциплины:

ПСК-1.6. Знание способов выработки, передачи, распределения и преобразования электрической энергии, закономерности функционирования электрических сетей и энергосистем, теоретические основы электрической тяги.

Знать: однолинейные схемы питания тяговых подстанций от энергосистем, закономерности функционирования распределительных устройств 3,3 кВ, теоретические основы распределения электрической энергии в системе тягового электроснабжения, эксплуатационно-технические требования к выпрямителям и инверторам.

Уметь: проектировать схемы питания тяговых подстанций от энергосистем, использовать закономерности функционирования распределительных устройств 3,3 кВ, учитывать при проектировании эксплуатационно-технические требования к выпрямителям и инверторам.

Владеть: методикой проектирования схем питания тяговых подстанций от энергосистем, методикой расчёта числа вентиля в вентильном плече, выбора электрооборудования по условиям аварийного режима, опытом проектировании выпрямителей и инверторов с учетом эксплуатационно-технических требований.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

№	Наименование исходных данных	Последняя цифра логина									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Схема преобразователя	6-ти пульсовая мостовая		12-ти пульсовая двух мостовая		6-ти пульсовая мостовая		12-ти пуль- совая двух мос- товая		Две обратные звезды с уравнительным реактором	
2	Схема выпрямителя	С неуправляемыми вентильями				С управляемыми вентильями			С управляемыми вентильями		
3	Угол регулирования тиристоров выпрямителя α	0	0	0	0	5	10	15	10	15	5
		Предпоследняя цифра логина									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	Номинальное напряжение выпрямителя $U_{дн}$ ($\alpha=0$), В	3300	825	825	3300	3300	825	825	3300	3300	825
5	Номинальный ток выпрямителя $I_{дн}$, А	2000	2000	3000	3000	2500	2200	2000	2200	2400	2600
6	Тип вентиля: а) для неуправляемого выпрямителя	ДЛ 123- 320	Д 133- 500	ДЛ 133- 500	Д 143- 630	Д 143- 800	Д 143- 1000	В- 200	ВЛ- 200	В- 320	ВЛ- 320
	б) для управляемого выпрямителя и инвертора	Т2- 320	ТЛ2- 200	Т800	Т630	Т4- 500	Т15- 250	ТЛ4- 250	Т15- 200	ТЛ4- 250	Т500
7	Скорость потока охлаждающего воздуха, V, м/с	0	6	12	0	6	12	0	6	12	12
8	Номинальное напряжение питающей сети, $U_{1Л}$, кВ	10	6	35	10	6	35	10	6	35	10
9	Колебания напряжения в питающей сети, ΔU_C , %	3	3,5	4	5	5,5	3	3,5	4	4,5	5
10	Коэффициент повторяющихся перенапряжений, $K_{П}$	1,65	1,75	1,8	1,9	1,5	1,65	1,75	1,8	1,9	1,5
11	Коэффициент неповторяющихся перенапряжений, $K_{НП}$	2,2	2,3	2,4	2,45	2,25	2,2	2,3	2,4	2,45	2,25
12	Напряжение к.з. трансформатора, $u_{КТ}$, %	6,1	7,1	7,2	8,0	6,5	7,5	8,1	6,8	6,6	7,3
13	Мощность к.з $S_{КЗ}$, МВА	250	210	190	180	200	220	250	175	185	230
14	Коэффициент повышения напряжения в режиме инвертирования $K_{И}=U_{2И}/U_{2В}$	1,15	1,15	1,2	1,2	1,25	1,25	1,3	1,3	1,25	1,2
15	Угол опережения инвертора	$\beta = \arccos \frac{U_{2В}}{U_{2И}}$ или $\beta = \arccos \frac{1}{K_{И}}$									

ЗАНЯТИЕ 1. Выбор схемы проектируемого преобразовательного агрегата

Цель занятия. Выбрать в соответствии с заданием схему проектируемого преобразовательного агрегата и исходные данные к проекту.

Краткие теоретические сведения

Для преобразования переменного тока в постоянный для питания тяговых двигателей ЭПС постоянного тока применяются силовые трёхфазные выпрямительные агрегаты. Классификация выпрямительных агрегатов показывает особенности их схем и применяемых силовых полупроводниковых приборов. Различают схемы с общим проводом (две обратные звезды с уравнительным реактором) и мостовые; по количеству пульсов выпрямленного напряжения – 6-ти пульсовые, 12-ти пульсовые. Выпрямительные агрегаты также бывают неуправляемые (в схеме используются диоды) и управляемые (на тиристорах).

При работе электроустановок в ряде случаев возникает необходимость преобразования постоянного тока в переменный ток. Такой процесс называется *инвертированием*. На железнодорожном транспорте необходимость инвертирования появляется при рекуперативном торможении. В режиме рекуперативного торможения тяговые электродвигатели ЭПС переводятся в режим генератора без изменения полярности. В контактную сеть от ЭПС начинает поступать электрическая энергия постоянного тока, которая должна быть потрачена в нагрузку. Для создания тормозного момента цепь генератора должна быть замкнута на какую-либо нагрузку.

Наилучшим вариантом нагрузки при рекуперации одного локомотива является другой локомотив, работающий в режиме тяги. Если такого локомотива не окажется, то цепь генератора можно замкнуть на тормозные реостаты. Однако при этом произведённая в режиме рекуперации электроэнергия расходуется непроизводительно, превращаясь в тепло на тормозных реостатах.

Гораздо выгоднее преобразовать произведённую генераторами ЭПС электроэнергию постоянного тока в переменный ток и вернуть её в питающую сеть переменного тока, где она будет истрачена для питания стационарных нагрузок. Для такого преобразования применяется электроустановка, которая называется *зависимый инвертор*. Зависимый (или ведомый сетью) означает согласованный с питающей трёхфазной сетью по уровню напряжения, частоте и фазе.

Объединение в одной конструкции выпрямителя и инвертора представляет собой выпрямительно-инверторный преобразователь. На железных дорогах РФ используют следующие схемы: ВИПЭ-1 (две обратные звезды с уравнительным реактором), ВИПЭ-2 (6-ти пульсовая мостовая) и В-ПТЭ (12-ти пульсовая двухмостовая).

Ход выполнения занятия

В соответствии с последней цифрой шифра выбрать и зарисовать схему выпрямительно - инверторного агрегата.

Рекомендуемая литература

1. Бурков, А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А.Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
2. Оборудование для железнодорожного транспорта, метрополитена и городского транспорта [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.tet-estel.ru/railway>.

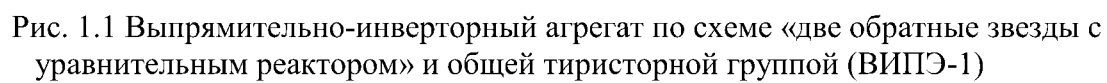


Рис. 1.1 Выпрямительно-инверторный агрегат по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором» и общей тиристорной группой (ВИПЭ-1)

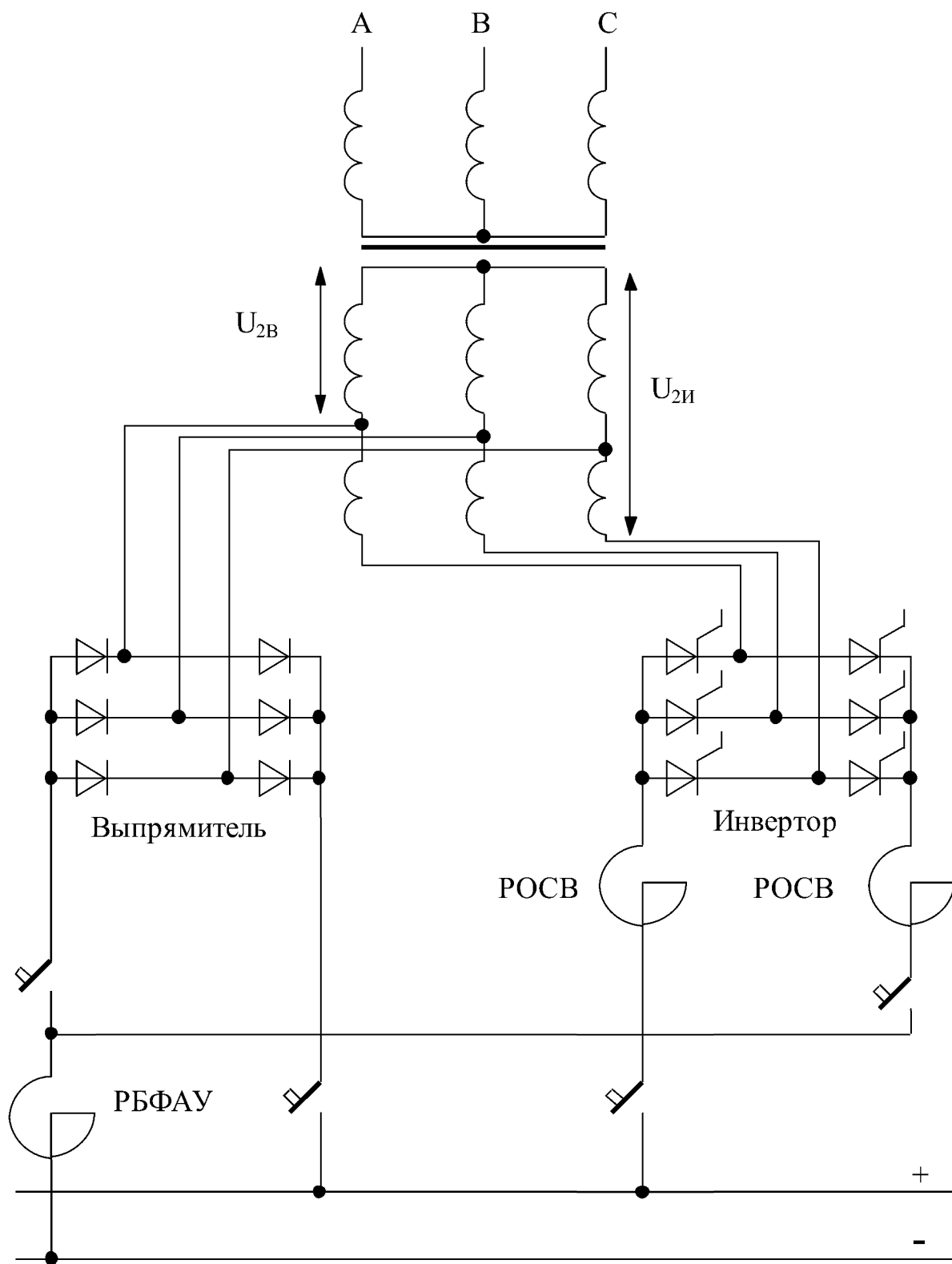


Рис. 1.2. Выпрямительно-инверторный агрегат по 6-ти пульсовой мостовой схеме (ВИПЭ-2)

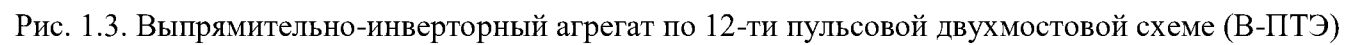


Рис. 1.3. Выпрямительно-инверторный агрегат по 12-ти пульсовой двухмостовой схеме (В-ПТЭ)

ЗАНЯТИЕ 2. Расчет параметров преобразовательного (тягового) трансформатора

Цель занятия. Рассчитать параметры преобразовательного трансформатора в режимах выпрямителя и инвертора и выбрать стандартную габаритную мощность S_T .

Краткие теоретические сведения

Расчет проектных параметров производится для номинального выпрямленного тока I_{dH} при номинальном напряжении в питающей сети $U_{1Л}$.

Схема, поясняющая порядок расчета, представлена на рис. 2.

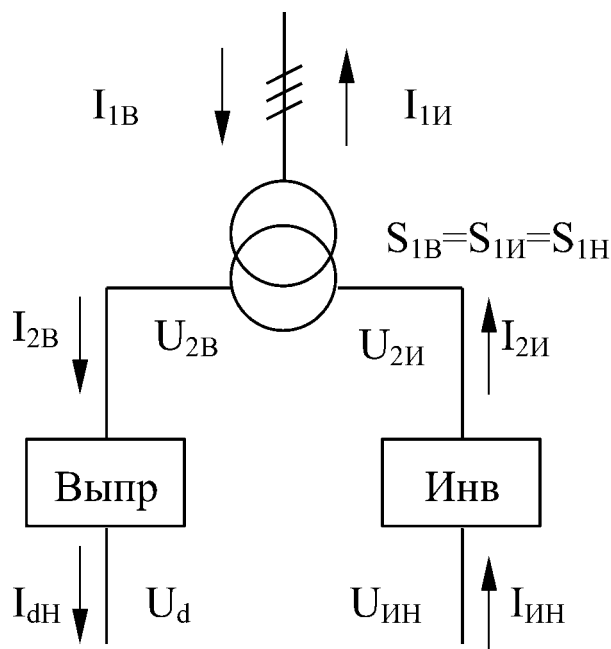


Рис. 2. Порядок расчета проектных параметров преобразовательного трансформатора

Ход выполнения занятия

Для выпрямительного режима

2.1. Напряжение холостого хода выпрямителя

$$U_{d0} = \frac{U_{dH}}{1 - A \frac{u_{\kappa}}{100}},$$

где: A – коэффициент схемы, для шестипульсовых схем преобразователей $A = 0,5$, для двенадцатипульсовых $A = 0,26$;

$u_{\kappa} = u_{\kappa T} + u_{\kappa C}$ – напряжение короткого замыкания, %;

$u_{\kappa T}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

$u_{\kappa C}$ – напряжение короткого замыкания питающей сети, %.

Для предварительного расчета следует принять $u_{\kappa C} = 0,5 u_{\kappa T}$, т.е. $u_{\kappa} = 1,5 u_{\kappa T}$.

2.2. Расчетная мощность выпрямителя

$$P_{d0} = U_{d0} \cdot I_{dH}.$$

2.3. Действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора:

для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором $U_{2В} = \frac{U_{d0}}{1,17};$

для 6-ти пульсовой мостовой схемы

$$U_{2B} = \frac{U_{d0}}{2,34}.$$

Для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы сначала рассчитывают напряжение для одного моста

$$U_M = \frac{U_{d0}}{2};$$

напряжение на фазе звезды:

$$U_{2B\lambda} = \frac{U_M}{2,34},$$

напряжение на фазе треугольника:

$$U_{2B\Delta} = \sqrt{3} \cdot U_{2B\lambda}.$$

2.4. Действующее значение тока вторичной обмотки

для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором

$$I_{2B} = \frac{I_{dH}}{2\sqrt{3}};$$

для 6-ти пульсовой мостовой схемы

$$I_{2B} = I_{dH} \sqrt{\frac{2}{3}};$$

для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы

на фазе звезды

$$I_{2B\lambda} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{dH};$$

на фазе треугольника

$$I_{2B\Delta} = \frac{I_{2B\lambda}}{\sqrt{3}}.$$

2.5. Номинальную расчетную мощность вторичной обмотки

для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором

$$S_{2B} = 6U_{2B} \cdot I_{2B};$$

для 6-ти пульсовой мостовой схемы

$$S_{2B} = 3U_{2B} \cdot I_{2B}.$$

для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы

$$S_{2B} = 3U_{2B\lambda} \cdot I_{2B\lambda} + 3U_{2B\Delta} \cdot I_{2B\Delta}.$$

2.6. Действующее значение фазного напряжения на сетевой (первичной) обмотке трансформатора

$$U_{1\phi} = \frac{U_{1L}}{\sqrt{3}}.$$

2.7. Коэффициент трансформации в режиме выпрямителя:

для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором и 6-ти пульсовой мостовой схемы

$$K_{TB} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2B}};$$

для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы

на фазе звезды

$$K_{TB\lambda} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2B\lambda}};$$

на фазе треугольника

$$K_{TB\Delta} = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2B\Delta}}.$$

2.8. Действующее значение тока сетевой обмотки:

для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором
$$I_{1B} = \frac{I_{dH}}{K_{TB} \sqrt{6}};$$

для 6-ти пульсовой мостовой схемы
$$I_{1B} = \frac{I_{dH}}{K_{TB}} \sqrt{\frac{2}{3}};$$

для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы
$$I_{1B} = I_{1B\lambda} + I_{1B\Delta};$$

где
$$I_{1B\lambda} = \frac{I_{2B\lambda}}{K_{TB\lambda}}; I_{1B\Delta} = \frac{I_{2B\Delta}}{K_{TB\Delta}}.$$

2.9. Номинальная мощность сетевой обмотки $S_{1H} = S_{1B} = 3U_{1\Phi} \cdot I_{1B}$.

2.10. Типовая мощность трансформатора
$$S_T = \frac{S_{1B} + S_{2B}}{2}.$$

По рассчитанной типовой мощности S_T необходимо выбрать ближайшее большее стандартное значение мощности трансформатора из ряда (100; 125; 160; 250; 400; 630; 800)·10ⁿ кВА, где n=0; 1; 2,...[2].

Для инверторного режима

В выпрямительном и инверторном режиме номинальная мощность трансформатора одинакова ($S_{1H} = S_{1B} = S_{1H}$). Это выполняется, если номинальный ток инвертора будет меньше номинального тока выпрямителя.

2.11. Номинальный ток инверторного режима
$$I_{IH} = \frac{I_{dH}}{K_{IH}}.$$

2.12. Действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора:

для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором и 6-ти пульсовой мостовой схемы
$$U_{2IH} = U_{2B} \cdot K_{IH};$$

для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы
$$U_{2IH\lambda} = U_{2B\lambda} \cdot K_{IH}, \quad U_{2IH\Delta} = U_{2B\Delta} \cdot K_{IH}.$$

2.13. Ток вторичной обмотки

для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором
$$I_{2IH} = \frac{I_{IH}}{2\sqrt{3}};$$

для 6-ти пульсовой мостовой схемы
$$I_{2B} = I_{IH} \sqrt{\frac{2}{3}}.$$

для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы

на фазе звезды
$$I_{2IH\lambda} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{IH};$$

на фазе треугольника

$$I_{2H\Delta} = \frac{I_{2H\lambda}}{\sqrt{3}}.$$

2.14. Коэффициент трансформации в режиме инвертора:

для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором и 6-ти пульсовой мостовой схемы

$$K_{TH} = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2H}};$$

для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы

на фазе звезды

$$K_{TH\lambda} = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2H\lambda}};$$

на фазе треугольника

$$K_{TH\Delta} = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2H\Delta}}.$$

2.15. Ток первичной обмотки:

для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором $I_{1H} = \frac{I_{HH}}{K_{TH} \sqrt{6}};$

для 6-ти пульсовой мостовой схемы $I_{1H} = \frac{I_{HH}}{K_{TH}} \sqrt{\frac{2}{3}}.$

для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы

$$I_{1H} = I_{1H\lambda} + I_{1H\Delta};$$

где $I_{1H\lambda} = \frac{I_{2H\lambda}}{K_{TH\lambda}};$ $I_{1H\Delta} = \frac{I_{2H\Delta}}{K_{TH\Delta}}.$

Если расчет выполнен правильно, токи первичной обмотки в режиме выпрямителя и в режиме инвертора должны быть равны:

$$I_{1B} = I_{1H}.$$

Рекомендуемая литература

1. Бурков, А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А.Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.

2. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВА и более. Ряд номинальных мощностей [Электронный ресурс]: ГОСТ 9680-77. – Введ. 1979-01-01. Режим доступа: http://standartgost.ru/g/ГОСТ_9680-77.

ЗАНЯТИЕ 3. Расчет предельного тока заданного вентиля. Расчет числа параллельно включенных вентилях по среднему току вентильного плеча выпрямителя и инвертора

Цель занятия. Рассчитать число параллельно включенных вентилях по среднему току вентильного плеча для выпрямителя и инвертора.

Краткие теоретические сведения

В мощных преобразовательных установках токи нагрузки превышают предельный ток одного полупроводникового прибора. Поэтому для пропуска таких токов силовые диоды и тиристоры приходится соединять параллельно.

Число параллельно включенных вентилях зависит от предельного тока заданного вентиля и от среднего тока вентильного плеча.

Предельный ток силового диода или тиристора указан в его маркировке. Эта величина предельного тока зависит от площади сечения полупроводникового кристалла. В реальных условиях эксплуатации предельный ток всегда меньше и будет зависеть от условий охлаждения [1]. Определить реальную величину предельного тока силового полупроводникового прибора можно по формуле:

$$I_{\Pi} = \frac{\sqrt{U_0^2 + 4k_{\Phi}^2 \cdot R_{\text{д}} \frac{\Theta}{R_T}} - U_0}{2k_{\Phi}^2 \cdot R_{\text{д}}}, \quad (3.1)$$

где U_0 - пороговое напряжение [В],

$R_{\text{д}}$ - динамическое сопротивление [Ом],

k_{Φ} - коэффициент формы тока; отношение эффективного значения тока к средневывпрямленному; для трёхфазных выпрямителей $k_{\Phi} = \sqrt{3}$ [],

Θ – допустимый перегрев: 100° С для диодов, 85° С для тиристоров,

R_T - общее тепловое сопротивление [°С /Вт].

$$R_T = R_{\Pi-K} + R_{K-O} + R_{O-C}. \quad (3.2)$$

Ориентировочно: при естественном охлаждении реальная величина предельного тока составляет около 30...35% от значения, указанного в маркировке диода или тиристора, при скорости потока охлаждающего воздуха $V = 6$ м/с – около 60%, при скорости потока охлаждающего воздуха $V = 12$ м/с – около 90%.

Ход выполнения занятия

3.1. Расчет среднего тока вентильного плеча I_a .

Средний ток вентильного плеча зависит от схемы преобразователя.

Для выпрямительного режима

для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором $I_{aB} = \frac{I_{dH}}{6};$

для 6-ти пульсовой и 12-ти пульсовой мостовой схем $I_{aB} = \frac{I_{dH}}{3}.$

Для инверторного режима

для схемы две обратные звезды с уравнительным реактором $I_{aII} = \frac{I_{III}}{6}$;

для 6-ти пульсовой и 12-ти пульсовой мостовой схем $I_{aII} = \frac{I_{III}}{3}$

3.2. Расчет предельного тока вентиля

По формуле (3.1) предельный ток I_{II} вычисляется **два раза**: для диодов $I_{ПВ}$ и для тиристоров $I_{ПИ}$ в том случае, когда по исходным данным угол регулирования $\alpha=0$, так как в выпрямителе используются неуправляемые вентили (диоды), а в инверторе **всегда** используются тиристоры.

Предельный ток I_{II} вычисляется **один раз** для тиристоров $I_{ПВ} = I_{ПИ}$ в том случае, когда по исходным данным угол регулирования $\alpha > 0$, так как и в выпрямителе и в инверторе используются одинаковые управляемые вентили (тиристоры).

До начала расчетов необходимо выписать из Приложения 1 параметры заданного вентиля: отдельно для диода и тиристора, оформив в виде таблицы.

Таблица 3.1

Пример выбора параметров заданных вентиляей

Тип вентиля	U_0 , В	R_d , мОм	$R_{П-К}$, °С/Вт
ДЛ 123-320	1,7	0,83	0,08
Т 143-500	1,8	0,57	0,034

Затем следует рассчитать R_T - общее тепловое сопротивление по формуле (3.2)

$$R_T = R_{П-К} + R_{К-О} + R_{О-С}.$$

Значение $R_{П-К}$ выбирается из таблицы 3.1, а $R_{К-О}$ и $R_{О-С}$ из таблицы 3.2.

Теперь рассчитываем предельный ток.

При $\alpha=0$:

для диода в выпрямителе
$$I_{П.В} = \frac{\sqrt{U_0^2 + 4k_\phi^2 \cdot R_d \frac{100}{R_T}} - U_0}{2k_\phi^2 \cdot R_d};$$

для тиристора в инверторе
$$I_{П.И} = \frac{\sqrt{U_0^2 + 4k_\phi^2 \cdot R_d \frac{85}{R_T}} - U_0}{2k_\phi^2 \cdot R_d}.$$

При $\alpha > 0$:

для тиристора в выпрямителе и инверторе
$$I_{П.В} = I_{П.И} = \frac{\sqrt{U_0^2 + 4k_\phi^2 \cdot R_d \frac{85}{R_T}} - U_0}{2k_\phi^2 \cdot R_d}.$$

Рекомендуемые охладители и их тепловые сопротивления

Тип вентиля	Рекомендуемый охладитель	$R_{к-о}, ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$R_{о-с}, ^\circ\text{C}/\text{Вт}$		
			$V=0$	$V=6 \text{ м/с}$	$V=12 \text{ м/с}$
ДЛ 123-320	О123-100	0,02	0,7	0,21	0,16
ТЛ2-200					
Т15-200					
Т15-250					
ТЛ4-250					
Д 133-400	О143-150	0,015	0,5	0,12	0,09
Д 133-500					
ДЛ 133-500					
Т 133-320					
Т 143-400					
Т-500					
Т4-500	О243-150	0,01	0,28	0,08	0,063
Д 143-630					
Д 143-800					
Д 143-1000					
Т 143-500					
Т-630	О153-150	0,005	0,27	0,08	0,063
Т-800					
Т 253-800					
Т 253-1000					
Т 253-1250					
Д 253-1600	О273-250	0,005	0,13	0,043	0,033
Д 253-2000					

3.3. Определение числа параллельно включенных вентилях по среднему току

Определение числа параллельно включенных вентилях производится по среднему току длительной нагрузки.

Число параллельно включенных вентилях по среднему току выпрямителя

$$a_{1B} = \frac{I_{aB} \cdot K_H}{I_{1B} \cdot K_V}.$$

Число параллельно включенных вентилях по среднему току инвертора

$$a_{1И} = \frac{I_{aИ} \cdot K_H}{I_{1И} \cdot K_V},$$

где K_H – коэффициент неравномерного деления тока между параллельно включенными вентилями, $K_H=1,1 \dots 1,2$;

K_V – коэффициент снижения скорости охлаждающего воздуха, $K_V=0,9 \dots 0,95$.

Полученные значения a_{1B} и $a_{1И}$ округляют до целого в большую сторону.

Рекомендуемая литература.

1. Чебовский, О.Г. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. / О.Г. Чебовский. – М.: Энергия, 1985. – 400 с.

2. Белоус, А.И. Полупроводниковая силовая электроника / А.И. Белоус, С.А. Ефименко, А.С. Турцевич. – М.: Техносфера, 2013. – 229 с. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.litres.ru>.

ЗАНЯТИЕ 4. Расчет тока короткого замыкания выпрямителя и ударного тока прорыва инвертора. Расчет числа параллельно включенных вентилях вентильного плеча выпрямителя и инвертора по токам аварийного режима

Цель занятия. Рассчитать число параллельно включенных вентилях по токам аварийных режимов для вентильных плеч выпрямителя и инвертора. Выбрать требуемое число параллельно включенных вентилях по результатам расчетов занятий 3 и 4.

Краткие теоретические сведения

Аварийные режимы работы возникают вследствие потери диодами и тиристорами вентильных свойств, а также повреждения изоляции внешних цепей. В выпрямителе возникают токи короткого замыкания, на которые должна реагировать защита. Однако до момента отключения выпрямителя все его конструктивные элементы должны выдержать ток аварийного режима. При расчёте токов короткого замыкания принимается условие, что короткое замыкание «металлическое» или «глухое». Аварийные токи короткого замыкания зависят от схемы выпрямителя и от места точек повреждения контактной сети.

Наиболее тяжёлым будет короткое замыкание *между сборными шинами* тяговой подстанции (точка 1). В этом случае ток короткого замыкания будет иметь наибольшую величину, причём место короткого замыкания будет получать питание от выпрямителя своей тяговой подстанции и от выпрямителей соседних тяговых подстанций по контактной сети. Отключение такого короткого замыкания возможно только одновременным срабатыванием всех коммутационных аппаратов выпрямительного агрегата: быстродействующего выключателя БВ и вакуумного выключателя ВВ под действием реле земляной защиты.

Величина тока такого короткого замыкания будет определяться внутренним сопротивлением выпрямительного агрегата и амплитудным напряжением вторичных обмоток трансформатора, а время действия – временем отключения питания вакуумным выключателем ВВ, которое составляет примерно пять периодов синусоиды напряжения питающей сети – 0,1 секунды. Влияние тока подпитки из контактной сети на величину тока короткого замыкания выпрямителя можно не учитывать, так как его величина будет гораздо меньше из-за относительно большого сопротивления контактной сети между подстанциями, а быстродействующий выключатель отключит этот ток гораздо раньше, чем отключится вакуумный выключатель.

Ход выполнения занятия

4.1. Расчет числа параллельно включенных вентилях выпрямителя по ударному току короткого замыкания

Ударный ток короткого замыкания определяется для режима глухого (металлического) короткого замыкания на шинах постоянного тока выпрямителя и для режима прорыва инвертора.

Максимальное значение ударного тока выпрямителя

$$i_{уд.В} = K_y \cdot I_m, \quad (4.1)$$

где I_m – амплитудное значение установившегося тока к.з., А;

K_y – ударный коэффициент, $K_y = 1, 2 \dots 1, 3$.

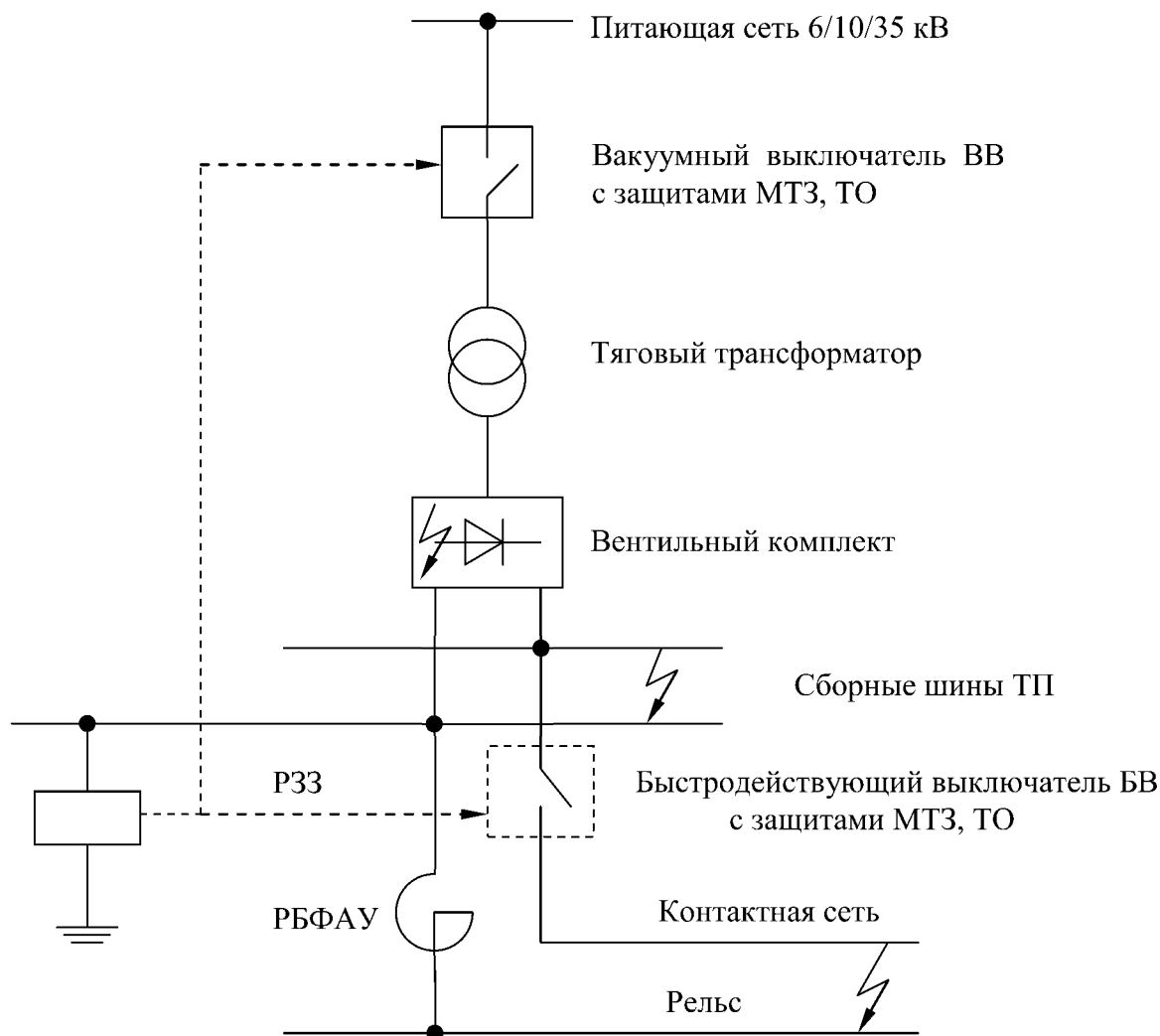


Рис. 4.1. Однолинейная схема выпрямительного агрегата:

1 – короткое замыкание между сборными шинами тяговой подстанции;
 2 – короткое замыкание в контактной сети; 3 – пробой вентильного плеча выпрямителя;
 МТЗ – максимальная токовая защита; ТО – токовая отсечка; РЗЗ – реле земляной защиты

Амплитудное значение установившегося тока короткого замыкания выпрямителя можно определить по формуле

$$I_m = \frac{U_{2m}}{Z_K},$$

где U_{2m} – амплитудное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора;
 Z_K – полное сопротивление цепи короткого замыкания.

Для схемы «две обратные звезды с уравнительным реактором»:

$$U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_{2B}, \quad Z_K = \sqrt{X_{a.B}^2 + R_{a.B}^2};$$

для 6-ти пульсовой мостовой схемы:

$$U_{2m} = \sqrt{6} \cdot U_{2B}, \quad Z_K = \sqrt{(2X_{a.B})^2 + (2R_{a.B})^2};$$

а индуктивное и активное сопротивление цепи короткого замыкания для этих схем

$$X_{a.B} = X_C + X_{TP.B}; \quad R_{a.B} = R_C + R_{TP.B};$$

где: X_C, R_C – индуктивное и активное сопротивление сети;

X_{TP}, R_{TP} – индуктивное и активное сопротивление трансформатора.

Численные значения сопротивлений $X_C, R_C, X_{TP.B}, R_{TP.B}$ в Ом для этих схем определяются по формулам:

$$X_C = \frac{3U_{2B}^2 \cdot 10^{-6}}{S_{K3}}; \quad X_{TP.B} = \frac{3U_{2B}^2 \cdot u_{KT}}{S_{1H} \cdot 10^5};$$

$$R_C = \frac{45U_{2B}^2}{S_{K3} \cdot 10^8}; \quad R_{TP.B} = \frac{3U_{2B}^2 \cdot \Delta P_M}{S_{1H} \cdot 10^3};$$

где: U_{2B} – действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора, В;

u_{KT} – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

S_{K3} – мощность короткого замыкания, МВА;

S_{1H} – номинальная мощность первичной обмотки трансформатора, кВА; $S_{1H} = S_{1B}$;

ΔP_M – потери короткого замыкания трансформатора, $\Delta P_M = (0,006 \dots 0,008)S_{1H}$, кВА.

Для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы выпрямителя:

$$U_{2m} = U_{2mY} + U_{2m\Delta};$$

$$U_{2mY} = \sqrt{6} \cdot U_{2BY}, \quad U_{2m\Delta} = \sqrt{2} \cdot U_{2B\Delta},$$

$$Z_k = \sqrt{\left(2X_C + 2 \cdot X_{TP.12.Y} + \frac{2}{3} \cdot X_{TP.12.\Delta}\right)^2 + \left(2R_C + 2 \cdot R_{TP.12.Y} + \frac{2}{3} \cdot R_{TP.12.\Delta}\right)^2}.$$

Численные значения сопротивлений $X_C, R_C, X_{TP\lambda B}, R_{TP\lambda B}, X_{TP\Delta B}, R_{TP\Delta B}$ в Ом для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы определяются по формулам:

$$X_C = \frac{(3U_{2B\lambda}^2 + 2U_{2B\Delta}^2) \cdot 10^{-6}}{S_{K3}}; \quad X_{TP\lambda B} = \frac{6U_{2B\lambda}^2 \cdot u_{KT}}{S_{1H} \cdot 10^5}; \quad X_{TP\Delta B} = \frac{4U_{2B\Delta}^2 \cdot u_{KT}}{S_{1H} \cdot 10^5};$$

$$R_C = \frac{45 \cdot (U_{2B\lambda}^2 + U_{2B\Delta}^2)}{S_{K3} \cdot 10^8}; \quad R_{TP\lambda B} = \frac{6U_{2B\lambda}^2 \cdot \Delta P_M}{S_{1H} \cdot 10^3}; \quad R_{TP\Delta B} = \frac{4U_{2B\Delta}^2 \cdot \Delta P_M}{S_{1H} \cdot 10^3};$$

где: $U_{2B\lambda}$ и $U_{2B\Delta}$ – действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора, включенной в звезду и треугольник, В;

u_{KT} – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

S_{K3} – мощность короткого замыкания, МВА;

S_{1H} – номинальная мощность первичной обмотки трансформатора, кВА; $S_{1H} = S_{1B}$;

ΔP_M – потери короткого замыкания трансформатора, $\Delta P_M = (0,006 \dots 0,008)S_{1H}$, кВА.

Число параллельно включенных вентиляй по ударному току короткого замыкания выпрямителя вычисляют по формуле:

$$a_{2B} = \frac{i_{уд.B} \cdot K_H}{I_{уд}},$$

где $K_H = 1, 1 \dots 1, 2$ – коэффициент неравномерного деления тока между параллельно включенными вентилями;

$I_{уд}$ – максимально допустимое значение ударного тока заданного диода или тиристора, А, взять из справочника или из приложения 1.

Полученное значение $a_{2В}$ округляют до целого в большую сторону.

4.2. Расчет числа параллельно включенных вентилях по ударному току прорыва инвертора

При прорыве инвертора ударный ток складывается из тока к.з. между фазами инвертора и работающего на рекуперацию локомотива. При этом в цепи ударного тока короткого замыкания инвертора оказывается включенным сглаживающий реактор РБФА-6500/3250 индуктивностью 4,5 мГ с индуктивным сопротивлением $X_d=2,82$ Ом и активным $R_d=0,008$ Ом.

Максимальное значение ударного тока прорыва инвертора определяется для схемы «две обратные звезды с уравнительным реактором»:

$$i_{уд.П} = \frac{K_y \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2И}}{\sqrt{(R_d + R_{a.И})^2 + (X_d + X_{a.И})^2}} + \frac{U_{d0}}{R_d + R_{a.И}} \left(1 - e^{-\frac{R_d + R_{a.И}}{X_d + X_{a.И}} \cdot 2\pi f t} \right); \quad (4.2)$$

для 6-ти пульсовой мостовой схемы

$$i_{уд.П} = \frac{K_y \cdot \sqrt{6} \cdot U_{2И}}{\sqrt{(R_d + 2R_{a.И})^2 + (X_d + 2X_{a.И})^2}} + \frac{U_{d0}}{R_d + 2R_{a.И}} \left(1 - e^{-\frac{R_d + 2R_{a.И}}{X_d + 2X_{a.И}} \cdot 2\pi f t} \right), \quad (4.3)$$

где: $U_{2И}$ – действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора в режиме инвертора, В;

$f = 50$ Гц – частота питающей сети;

$t = 0,07...0,1$ с – время отключения аварийного тока быстродействующим выключателем.

Индуктивное и активное сопротивление цепи короткого замыкания для этих схем при прорыве инвертора

$$X_{a.И} = X_C + X_{ТР.И}; \quad R_{a.И} = R_C + R_{ТР.И};$$

где: X_C, R_C – индуктивное и активное сопротивление сети;

$X_{ТР.И}, R_{ТР.И}$ – индуктивное и активное сопротивление трансформатора в режиме инвертора.

Численные значения сопротивлений $X_{ТР.И}, R_{ТР.И}$ в Ом для этих схем определяются по формулам:

$$X_{ТР.И} = \frac{3U_{2И}^2 \cdot u_{КТ}}{S_{1Н} \cdot 10^5}; \quad R_{ТР.И} = \frac{3U_{2И}^2 \cdot \Delta P_M}{S_{1Н}^2 \cdot 10^3};$$

где: $U_{2И}$ – действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора в режиме инвертора, В;

$u_{КТ}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

$S_{КЗ}$ – мощность короткого замыкания, МВА;

$S_{1Н}$ – номинальная мощность первичной обмотки трансформатора, кВА; $S_{1Н} = S_{1И}$;

ΔP_M – потери короткого замыкания трансформатора, $\Delta P_M = (0,006...0,008)S_{1Н}$, кВА.

Для 12-ти пульсовой двухмостовой схемы ввиду незначительного отличия величин активного R_a и реактивного X_a сопротивлений обмоток трансформатора в

режиме выпрямителя и инвертора максимальное значение ударного тока прорыва инвертора определяется по формуле:

$$i_{уд.И} = \frac{K_y \cdot \sqrt{6} \cdot U_{2И\lambda}}{\sqrt{(0,5R_d + 2R_{TP.\lambda B})^2 + (0,5X_d + 2X_{TP.\lambda B})^2}} + \frac{K_y \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2И\Delta}}{\sqrt{(0,5R_d + \frac{2}{3}R_{TP.\Delta B})^2 + (0,5X_d + \frac{2}{3}X_{TP.\Delta B})^2}} + \frac{U_{d0}}{R_d + 2R_{a.И}} \left(1 - e^{-\frac{R_d + 2R_{a.И}}{X_d + 2X_{a.И}} \cdot 2\pi f t} \right); \quad (4.4)$$

где: $U_{2И\lambda}$ и $U_{2И\Delta}$ – действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора в режиме инвертора, включенной в звезду и треугольник, В;

$f = 50$ Гц – частота питающей сети;

$t = 0,07 \dots 0,1$ с – время отключения аварийного тока быстродействующим выключателем;

$$X_{aИ} = X_C + 2X_{TP.\lambda И} + \frac{2}{3}X_{TP.\Delta И}; \quad R_{aИ} = R_C + 2R_{TP.\lambda И} + \frac{2}{3}R_{TP.\Delta И}.$$

Число параллельно включенных вентиляей по ударному току прорыва инвертора рассчитывают по формуле:

$$a_{2И} = \frac{i_{уд.И} \cdot K_H}{I_{уд}},$$

где K_H – коэффициент неравномерного деления тока между параллельно включенными вентилями, $K_H = 1, 1 \dots 1, 2$;

$I_{уд}$ – максимально допустимое значение ударного тока заданного диода или тиристора, А, взять из справочника [1] или из приложения 1.

Полученное значение $a_{2И}$ округляют до целого в большую сторону.

По результатам расчетов занятия 3 и занятия 4:

для 6-ти и 12-ти пульсовых мостовых схем преобразователя из двух значений $a_{1В}$, $a_{2В}$ выбирают наибольшее для выпрямителя и обозначают $a_{В}$, из двух значений $a_{1И}$, $a_{2И}$ выбирают наибольшее для инвертора и обозначают $a_{И}$;

для схемы «две обратные звезды с уравнительным реактором», в которой применяется общая тиристорная группа (для снижения общего числа тиристорov в преобразователе) из четырех значений $a_{1В}$, $a_{2В}$, $a_{1И}$, $a_{2И}$ выбирают наибольшее и принимают $a_{В} = a_{И}$, равное этому значению.

Рекомендуемая литература

1. Чебовский, О.Г. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. / О.Г. Чебовский. – М.: Энергия, 1985. – 400 с.

2. Белоус, А.И. Полупроводниковая силовая электроника / А.И. Белоус, С.А. Ефименко, А.С. Турцевич. – М.: Техносфера, 2013. – 229 с. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.litres.ru>.

ЗАНЯТИЕ 5. Расчет числа последовательно включенных вентилях вентиляльного плеча выпрямителя и инвертора. Расчет общего числа вентилях преобразовательного агрегата

Цель занятия. Рассчитать число последовательно включенных вентилях по повторяющемуся и неповторяющемуся обратным напряжениям вентиляльного плеча для выпрямителя и инвертора и общее число вентилях преобразовательного агрегата.

Краткие теоретические сведения

Количество последовательно включенных вентилях зависит от максимального обратного напряжения вентиляльного плеча $U_{b.max}$ с учетом перенапряжений, возникающих в схеме преобразователя, и от класса применяемого вентиля. Из практических соображений рекомендуется применение вентилях не ниже 6 и не выше 16 класса ($U_{II} = 600 \dots 1600$ В).

Максимальное обратное напряжение вентиляльного плеча определяется:

для выпрямителя

по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором»

$$U_{b.max.B} = 2,09 \cdot U_{d0};$$

6-ти пульсового мостового выпрямителя

$$U_{b.max.B} = 1,05 \cdot U_{d0};$$

12-ти пульсового двух мостового выпрямителя

$$U_{b.max.B} = 0,52 \cdot U_{d0};$$

для инвертора

по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором»

$$U_{b.max.I} = 2,09 \cdot 1,17 \cdot U_{2И};$$

6-ти пульсового мостового инвертора

$$U_{b.max.I} = 1,05 \cdot 2,34 \cdot U_{2И};$$

12-ти пульсового двух мостового инвертора

$$U_{b.max.I} = 0,52 \cdot 2,34 \cdot U_{2И}.$$

Число последовательно включенных вентилях определяется отдельно для выпрямительного и инверторного режимов по *повторяющемуся* U_{II} и *неповторяющемуся* $U_{нII}$ обратному напряжению для нелавинных вентилях и только по повторяющемуся для лавинных.

Число последовательно включенных вентилях по повторяющемуся обратному напряжению U_{II} :

для вентиляльного плеча выпрямителя

$$b_{1B} = \frac{K'_H \left(1 + \frac{\Delta U_c}{100} \right) \cdot U_{b.max.B}}{U_{II}} \cdot K_{II} + 1; \quad (5.1)$$

для вентильного плеча инвертора

$$b_{1И} = \frac{K'_H \left(1 + \frac{\Delta U_c}{100}\right) \cdot U_{b.\max.И}}{U_{II}} \cdot K_{II} + 1; \quad (5.2)$$

Число последовательно включенных вентилях по неповторяющемуся обратному напряжению U_{HII} :

для вентильного плеча выпрямителя

$$b_{2В} = \frac{K'_H \left(1 + \frac{\Delta U_c}{100}\right) \cdot U_{b.\max.В}}{U_{HII}} \cdot K_{HII} + 1; \quad (5.3)$$

для вентильного плеча инвертора

$$b_{2И} = \frac{K'_H \left(1 + \frac{\Delta U_c}{100}\right) \cdot U_{b.\max.И}}{U_{HII}} \cdot K_{HII} + 1; \quad (5.4)$$

где: K''_H – коэффициент неравномерности распределения напряжений между последовательно включенными вентилями; $K''_H = 1,1 \dots 1,15$ для нелавинных вентилях; $K''_H = 1$ – для лавинных;

ΔU_c – возможные отклонения напряжения в питающей сети, % (из исходных данных);

K_{II} – коэффициент повторяющихся перенапряжений (из исходных данных);

K_{HII} – коэффициент неповторяющихся перенапряжений (из исходных данных);

U_{II} – повторяющееся обратное напряжение для заданного вентиля, В [1, 2] или (приложение 1);

U_{HII} – неповторяющееся обратное напряжение для заданного вентиля, В;

$$U_{HII} = 1,16 U_{II}. \quad (5.5)$$

Ход выполнения занятия

5.1. Расчет числа последовательно включенных вентилях в вентильном плече по повторяющемуся перенапряжению

Для заданной схемы преобразовательного агрегата рассчитать максимальное обратное напряжение вентильного плеча выпрямителя $U_{b.\max В}$ и вентильного плеча инвертора $U_{b.\max И}$.

Из приложения 1 для заданного вентиля выбрать U_{II} – повторяющееся обратное напряжение (не менее 600 В и не более 1600 В).

Рассчитать число последовательно включенных вентилях по повторяющемуся обратному напряжению по формуле (5.1) для выпрямителя и формуле (5.2) для инвертора. Полученные значения $b_{1В}$ и $b_{1И}$ округлить до целого в большую сторону.

5.2. Расчет числа последовательно включенных вентилях в вентильном плече по неповторяющемуся перенапряжению

Только для **нелавинных** вентилях рассчитать U_{HII} – неповторяющееся обратное напряжение по формуле (5.5).

Рассчитать число последовательно включенных вентилях по неповторяющемуся обратному напряжению по формуле (5.3) для выпрямителя и формуле (5.4) для инвертора. Полученные значения $b_{2В}$ и $b_{2И}$ округлить до целого в большую сторону.

5.3. Выбор числа последовательно включенных вентилях в вентильном плече

Для 6-ти пульсовой мостовой и 12-ти пульсовой двух мостовой схемы преобразователя из двух значений $b_{1В}$, $b_{2В}$ выбирают наибольшее для выпрямителя и обозначают $b_{В}$, из двух значений $b_{1И}$ $b_{2И}$ выбирают наибольшее для инвертора и обозначают $b_{И}$.

Только для схемы «две обратные звезды с уравнительным реактором», в которой применяется общая тиристорная группа (для снижения общего числа тиристоров в преобразователе), сначала из двух значений $b_{1В}$, $b_{2В}$ выбирают наибольшее для выпрямителя и обозначают $b_{В}$, затем из двух значений $b_{1И}$ $b_{2И}$ выбирают наибольшее для инвертора и обозначают $b_{И}$.

Теперь число последовательно соединенных тиристоров необходимо разделить на выпрямительную, инверторную и общую группы.

Для этого необходимо определить:

$$\Delta U_{b.\max} = U_{b.\max.И} - U_{b.\max.В},$$

и по величине $\Delta U_{b.\max}$ определить число тиристоров выпрямительной группы $b_{ВС}$ по формулам (5.1 и 5.3) для **нелавинных** тиристоров и **только** по формуле (5.1) для **лавинных** тиристоров:

$$b_{1BC} = \frac{K'_H \left(1 + \frac{\Delta U_c}{100} \right) \cdot \Delta U_{b.\max.B}}{U_{II}} \cdot K_{II} + 1;$$

$$b_{2BC} = \frac{K'_H \left(1 + \frac{\Delta U_c}{100} \right) \cdot \Delta U_{b.\max.B}}{U_{III}} \cdot K_{III} + 1.$$

Полученные значения b_{1BC} и b_{2BC} округлить до целого в большую сторону, выбрать из них наибольшее и обозначить $b_{ВС}$.

Затем определяют число тиристоров в общей группе

$$b_o = b_{В} - b_{ВС};$$

и в инверторной группе

$$b_{ИС} = b_{И} - b_o;$$

где: $b_{ВС}$ – общее число тиристоров выпрямительной группы;

$b_{ИС}$ – общее число тиристоров инверторной группы.

5.4. Расчет общего числа вентилях преобразовательного агрегата

Общее число вентилях преобразовательного агрегата складывается из вентилях выпрямителя и инвертора. Для схемы «две обратные звезды с уравнительным реактором», в которой применяется общая тиристорная группа, общее число тиристоров определяется по формуле:

$$N = \Pi(a_B \cdot b_{BC} + a_{и} \cdot b_{иC} + a_o \cdot b_o).$$

Для 6-ти пульсовой мостовой и 12-ти пульсовой двух мостовой схем отдельно рассчитывается число вентиля выпрямителя и инвертора по формулам:
для выпрямителя

$$N_B = \Pi \cdot a_B \cdot b_B;$$

для инвертора

$$N_{и} = \Pi \cdot a_{и} \cdot b_{и},$$

где: $\Pi = 6$ – число плеч 6-ти пульсового преобразователя;

$\Pi = 12$ – число плеч 12-ти пульсового преобразователя.

Рекомендуемая литература

1. Чебовский, О.Г. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. / О.Г. Чебовский. – М.: Энергия, 1985. – 400 с.
2. Белоус, А.И. Полупроводниковая силовая электроника / А.И. Белоус, С.А. Ефименко, А.С. Турцевич. – М.: Техносфера, 2013. – 229 с. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.litres.ru>.
3. Замятин В.Я. и др. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник / В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, В.М. Петухов. – М.: Радио и связь, 1987. – 576 с.
4. Диоды: Справочник / О.П. Григорьев, В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, С.Л. Пожидаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 336 с.

ЗАНЯТИЕ 6. Выбор схемы выравнивания тока, расчет шунтирующих резисторов и выравнивающих конденсаторов. Составление схем вентильных плеч выпрямителя и инвертора

Цель занятия. Составление схем вентильных плеч выпрямителя и инвертора.

Краткие теоретические сведения

Для надежной работы преобразователя необходимо обеспечить равномерное распределение токов по параллельно включенным вентилям и обратных напряжений между последовательно включенными вентилями.

Несовпадение прямых ветвей вольтамперных характеристик вентиля приводит к неравномерному распределению токов между параллельно включенными вентилями. Для выравнивания токов применяются индуктивные делители тока (ИДТ). Схема включения ИДТ зависит от числа параллельно включенных вентилях (замкнутая кольцевая или схема с задающим вентилем) [1, 5].

При большом числе последовательно включенных неуправляемых вентилях (диодов) ($b > 3$) в выпрямителях ИДТ не применяют.

Для управляемых вентилях (тиристоров) как в выпрямителе, так и в инверторе обязательно применяют ИДТ.

Из-за разности обратных токов вентилях происходит неравномерное распределение напряжения между последовательно включенными вентилями. Это может привести к поочередному пробоем вентилях в вентильном плече или самопроизвольному открыванию тиристоров.

Для выравнивания напряжения между последовательно включенными вентилями параллельно им включают шунтирующие резисторы $R_{ш}$ и резистивно-емкостные цепи $R_B C_B$ [1, 5].

Ход выполнения занятия

6.1. Выбор устройств выравнивания тока

В зависимости от числа параллельно включенных вентилях a_B и a_I выбирают:
при $a_B \leq 5$ и $a_I \leq 5$ замкнутую кольцевую схему включения ИДТ [1];
при $a_B > 5$ и $a_I > 5$ схему включения ИДТ с задающим вентилем [1].

Для неуправляемого выпрямителя (6-ти пульсового и 12-ти пульсового) при $b_B > 3$ ИДТ не устанавливают.

6.2. Расчет шунтирующих резисторов

Сопротивление шунтирующего резистора

$$R_{ш} = \frac{bU_{п} - U_{b, \max}}{(b-1) \cdot a \cdot I_{обр, \max}}, \quad (6.1)$$

где: b – число последовательно включенных вентилях в вентильном плече (b_B или b_I);
 $U_{п}$ – повторяющееся напряжение вентиля, В;
 $U_{b, \max}$ – максимальное обратное напряжение на вентильном плече ($U_{b, \max, B}$ или $U_{b, \max, I}$);
 a – число параллельно включенных вентилях в вентильном плече (a_B или a_I);
 $I_{обр, \max}$ – максимальное значение обратного тока вентиля (из приложения 1), А.

При $\alpha = 0$ $R_{ш}$ рассчитывают два раза – для диодов в выпрямителе и для тиристоров в инверторе:

$$R_{шB} = \frac{b_B U_{II} - U_{b.\max.B}}{(b_B - 1) \cdot a_B \cdot I_{обр.\max}}; \quad R_{шH} = \frac{b_H U_{II} - U_{b.\max.H}}{(b_H - 1) \cdot a_H \cdot I_{обр.\max}}.$$

При $\alpha > 0$ $R_{ш}$ рассчитывают один раз:

$$R_{шB} = R_{шH} = \frac{b_B U_{II} - U_{b.\max.B}}{(b_B - 1) \cdot a_B \cdot I_{обр.\max}}.$$

Полученный результат следует округлить до ближайшего меньшего стандартного значения из ряда E12 (1; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2)·10ⁿ.

При работе шунтирующие резисторы нагреваются. Мощность, рассеиваемую на шунтирующем резисторе, можно определить по формуле:

$$P_B = \left(\frac{U_{b.\max.B}}{b_B} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_{ш.B}}, \quad P_H = \left(\frac{U_{b.\max.H}}{b_H} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_{ш.H}}.$$

где $R_{шB}$ и $R_{шH}$ – выбранные стандартные значения.

В качестве шунтирующих резисторов применяют проволоочные эмалированные влагостойкие резисторы ПЭВ (С5-35В), имеющие ряд мощностей: 10, 16, 25, 50, 80, 100 и 160 Вт. Если рассеиваемая мощность получилась более 160 Вт, следует применять последовательное соединение резисторов для достижения необходимой мощности.

Пример обозначения выбранного шунтирующего резистора:

ПЭВ-50 6,8 к ±5% или С5-35В-100 10 к ±5%.

6.2. Расчет конденсаторов C_B для выравнивания обратного напряжения

Из-за разности зарядов восстановления обратного сопротивления Q_B закрывающихся клапанов может быть неравномерное распределение обратного напряжения в момент коммутации клапанных токов. Для выравнивания этого обратного напряжения применяют резистивно-емкостные цепи $R_B C_B$.

Для лавинных клапанов цепи $R_B C_B$ **не применяют**.

Для нелавинных диодов и тиристоров емкость выравнивающего конденсатора рассчитывают по формуле:

$$C_B = \frac{(b-1) \cdot \Delta Q_B \cdot a}{b U_{II} - U_{b.\max}}, [\text{мкФ}] \quad (6.2)$$

где: $\Delta Q_B = 0,1 \cdot Q_B$ – наибольшая возможная разность зарядов восстановления, мкКл. Значение Q_B взять из приложения 1.

При $\alpha = 0$ C_B рассчитывают два раза – для диодов в выпрямителе и для тиристоров в инверторе:

$$C_{BB} = \frac{(b_B - 1) \cdot \Delta Q_{BVD} \cdot a_B}{b_B U_{II} - U_{b.\max.B}}, \quad C_{BH} = \frac{(b_H - 1) \cdot \Delta Q_{BVS} \cdot a_B}{b_H U_{II} - U_{b.\max.H}}.$$

При $\alpha > 0$ C_B рассчитывают один раз:

$$C_{BB} = C_{BI} = \frac{(b_B - 1) \cdot \Delta Q_{BVD} \cdot a_B}{b_B U_{II} - U_{b.\max.B}}.$$

Полученный результат следует округлить до ближайшего большего стандартного значения из ряда Е6 (0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0) мкФ.

Рабочее напряжение конденсатора

$$U_{CB} = \frac{U_{b.\max.B}}{b_B}; \quad U_{CI} = \frac{U_{b.\max.II}}{b_{II}}.$$

Применяются конденсаторы МБГЧ-1 (металлобумажные, герметизированные, частотные) с рабочими напряжениями 500, 750, 1000 и 1500 В.

Пример обозначения выбранного выравнивающего конденсатора:

МБГЧ-1 1,0 мкФ $\pm 10\%$.

Сопротивление резистора R_B , включенного для ограничения тока через конденсатор C_B , определяется приближенно:

$$R_B = \frac{10}{a}, [\text{Ом}].$$

Мощность резистора R_B выбирается 10...15 Вт.

6.3. Составление схем вентильных плеч выпрямителя и инвертора

По результатам расчетов необходимо нарисовать схему вентильного плеча выпрямителя с устройствами выравнивания обратного напряжения.

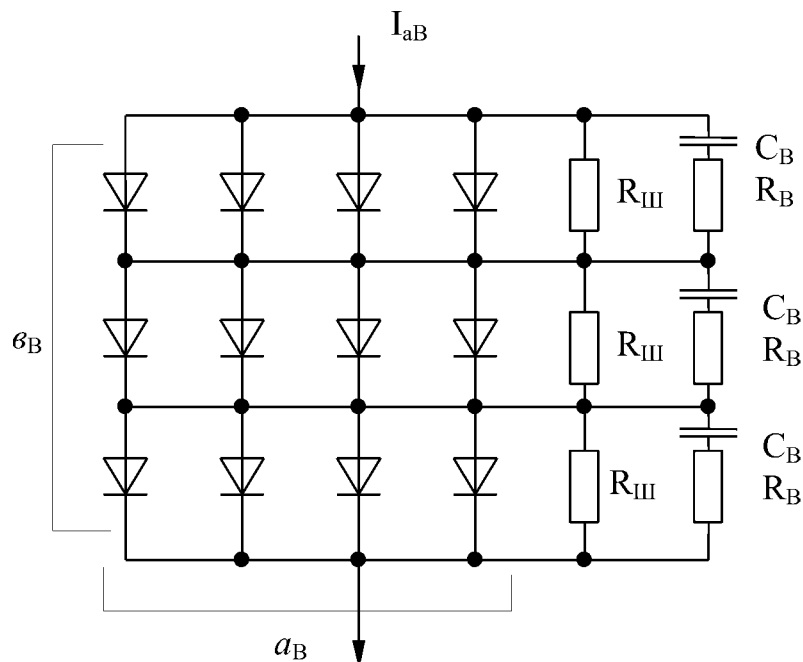


Рис. 6.1. Пример схемы вентильного плеча 6-ти пульсового и 12-ти пульсового выпрямителей

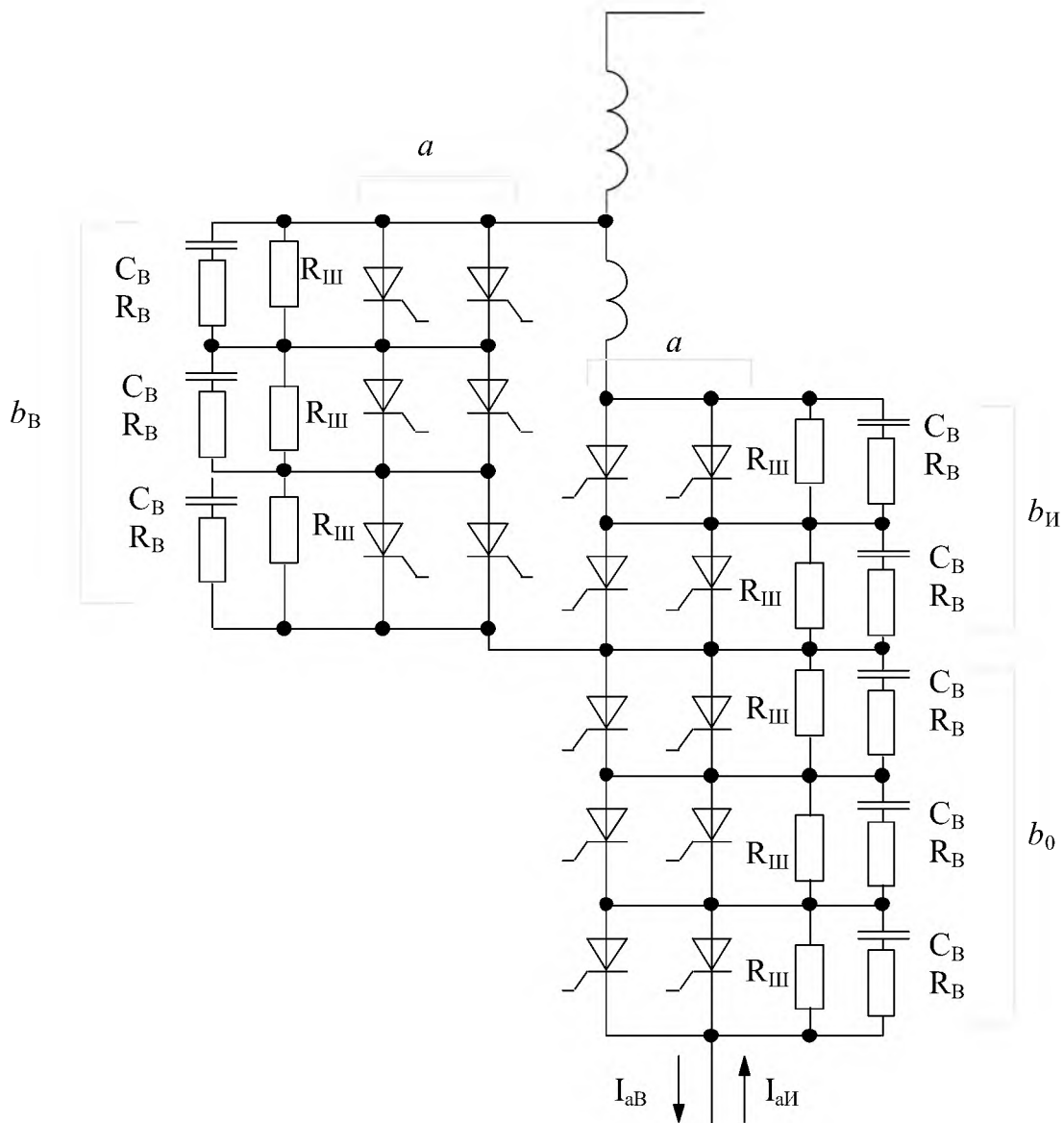


Рис. 6.2. Пример схемы вентильного плеча агрегата «две обратные звезды с уравнительным реактором и общей тиристорной группой»

Рекомендуемая литература

1. Чебовский, О.Г. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. / О.Г. Чебовский. – М.: Энергия, 1985. – 400 с.
2. Белоус, А.И. Полупроводниковая силовая электроника / А.И. Белоус, С.А. Ефименко, А.С. Турцевич. – М.: Техносфера, 2013. – 229 с. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.litres.ru>.
3. Замятин В.Я. и др. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник / В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, В.М. Петухов. – М.: Радио и связь, 1987. – 576 с.
4. Диоды: Справочник / О.П. Григорьев, В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, С.Л. Пожидаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 336 с.
5. Radio Library. Справочник. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radiolibrary.ru>.

ЗАНЯТИЕ 7. Расчет внешних характеристик, угла коммутации вентильных токов γ_b и построение временной диаграммы работы выпрямителя

Цель занятия. Расчет и построение графиков внешних характеристик и временной диаграммы работы выпрямителя.

Краткие теоретические сведения

Внешняя характеристика выпрямителя является прямолинейно падающей из-за потери напряжения при коммутации вентильных токов. Угол наклона внешней характеристики зависит от индуктивного сопротивления X_a . $X_a = X_C + X_{TP}$ рассчитывалось на занятии 4. При вычислении среднего значения выпрямленного напряжения с учётом потерь от коммутации для любой схемы трёхфазного выпрямителя можно воспользоваться формулой

$$U_d = U_{d0} \left(1 - \sin \frac{\pi}{m} \cdot u_\kappa \frac{I_d}{I_{dH}} \right), \quad (7.1)$$

где U_{d0} – напряжение холостого хода выпрямителя;

m – число пульсов выпрямленного напряжения;

u_κ – напряжение короткого замыкания преобразовательного трансформатора и питающей сети, $u_\kappa = \frac{u_{\kappa T} [\%] + u_{\kappa C} [\%]}{100}$;

$\frac{I_d}{I_{dH}}$ – коэффициент загрузки выпрямителя.

Выражение $\sin \frac{\pi}{m} = A$ называется коэффициентом наклона внешней характеристики выпрямителя. Зависимость коэффициента A от числа пульсов выпрямленного напряжения представлена в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Зависимость коэффициента наклона внешней характеристики от числа пульсов выпрямленного напряжения

Число пульсов выпрямленного напряжения	3	6	12
Коэффициент наклона внешней характеристики A	0,866	0,5	0,26

Как следует из выражения (7.1), чем больше пульсов в выпрямителе, тем более стабильной становится его внешняя характеристика. В технической литературе [1, 7, 8] формулу для расчёта выпрямленного напряжения (уравнение внешней характеристики) записывают в виде:

$$U_d = U_{d0} \left(1 - A \frac{u_\kappa}{100} \cdot \frac{I_d}{I_{dH}} \right) - b_B \cdot e \cdot \Delta U_B, \quad (7.2)$$

где b_B – число последовательно включенных вентилях в вентильном плече выпрямителя;

e – число последовательно включенных вентильных плеч выпрямителя; $e = 1$ для схемы «две обратные звезды с уравнительным реактором», $e = 2$ для 6-ти пульсовой мостовой схемы, $e = 4$ для 12-ти пульсовой двух мостовой схемы;

ΔU_B – прямое падение напряжения на открытом вентиле выпрямителя, В.

Следует отметить, что выражение (7.2) справедливо для режима работы выпрямителя без перегрузки, когда $\gamma_B \leq \frac{\pi}{3}$.

Угол коммутации вентильных токов неуправляемого выпрямителя:

для 6-ти пульсовой мостовой схемы
$$\gamma_B = \arccos \left(1 - \frac{2I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}} \right);$$

для 12-ти пульсовой двух мостовой схемы
$$\gamma_B = \arccos \left(1 - \frac{2I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2\lambda B}} \right);$$

Для управляемого выпрямителя угол коммутации вентильных токов находится из уравнения:

для схемы «две обратные звезды с уравнительным реактором»

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma_B) = \frac{I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}},$$

для 6-ти пульсовой мостовой схемы

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma_B) = \frac{2I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}}.$$

для 12-ти пульсовой двух мостовой схемы

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma_B) = \frac{2I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2\lambda B}}.$$

Ход выполнения занятия

7.1. Расчет внешней характеристики выпрямителя

Для расчета внешней характеристики выпрямителя сначала определяют напряжение короткого замыкания

$$u_K = u_{KT} + u_{КС};$$

где $u_{КС} = u_{КТ} \frac{X_C}{X_{TP}}$. X_C и X_{TP} рассчитывались на занятии 4.

Для неуправляемого выпрямителя внешняя характеристика рассчитывается один раз по формуле (7.2)

$$U_{dH} = U_{d0} \left(1 - A \frac{u_K}{100} \cdot \frac{I_{dH}}{I_{dH}} \right) - b_B \cdot e \cdot \Delta U_B.$$

Коэффициент загрузки выпрямителя $\frac{I_d}{I_{dH}} = 1$.

Для управляемого выпрямителя внешняя характеристика рассчитывается два раза: по формуле (7.2) при $\alpha = 0$ и по формуле

$$U_{dH\alpha} = U_{d0} \left(\cos \alpha - A \frac{u_K}{100} \cdot \frac{I_{dH}}{I_{dH}} \right) - b_B \cdot e \cdot \Delta U_B,$$

при $\alpha > 0$.

Внешняя характеристика выпрямителя может быть построена по двум точкам: точке холостого хода (U_{d0} , $I_d = 0$) и точке номинальной нагрузки (U_{dH} , I_{dH}). Для неуправляемого выпрямителя рисуется одна линия графика $U_{dH} = f(I_d)$. Для управляемого выпрямителя дополнительно рисуется линия $U_{dH\alpha} = f(I_d)$, начальной точкой которой при $I_d = 0$ будет $U_{d0\alpha} = U_{d0} \cdot \cos \alpha$. (см. рис. 8.1).

7.2. Расчет угла коммутации вентильных токов выпрямителя

Угол коммутации вентильных токов рассчитывается для токов нагрузки $I_d = 0,5I_{dH}$ и $I_d = I_{dH}$, поскольку при $I_d = 0$ $\gamma_B = 0$.

Для неуправляемого 6-ти пульсового мостового выпрямителя ($\alpha = 0$):

$$\text{при } I_d = 0,5I_{dH} \quad \gamma_B = \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot 0,5 \cdot I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}} \right);$$

$$\text{при } I_d = I_{dH} \quad \gamma_B = \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}} \right).$$

Для неуправляемого 12-ти пульсового двух мостового выпрямителя ($\alpha = 0$):

$$\text{при } I_d = 0,5I_{dH} \quad \gamma_B = \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot 0,5 \cdot I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2\lambda B}} \right);$$

$$\text{при } I_d = I_{dH} \quad \gamma_B = \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2\lambda B}} \right).$$

Для управляемого выпрямителя выражение для γ_B получают решением уравнения

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma_B) = \frac{I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}};$$

$$\gamma_B = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}} \right) - \alpha.$$

Для управляемого 6-ти пульсового мостового выпрямителя:

$$\text{при } I_d = 0,5I_{dH} \quad \gamma_B = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2 \cdot 0,5 \cdot I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}} \right) - \alpha;$$

$$\text{при } I_d = I_{dH} \quad \gamma_B = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2 \cdot I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}} \right) - \alpha.$$

Для управляемого 12-ти пульсового двух мостового выпрямителя:

$$\text{при } I_d = 0,5I_{dH} \quad \gamma_B = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2 \cdot 0,5 \cdot I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}} \right) - \alpha;$$

$$\text{при } I_d = I_{dH} \quad \gamma_B = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2 \cdot I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}} \right) - \alpha.$$

Для управляемого выпрямителя по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором:

$$\text{при } I_d = 0,5I_{d.H} \quad \gamma_B = \arccos\left(\cos\alpha - \frac{0,5 \cdot I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}}\right) - \alpha;$$

$$\text{при } I_d = I_{d.H} \quad \gamma_B = \arccos\left(\cos\alpha - \frac{I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2B}}\right) - \alpha.$$

7.3. Построение временной диаграммы работы выпрямителя

Временная диаграмма работы включает следующие графики:

- напряжение вентильной обмотки трансформатора u_2 (трехфазная синусоида);
- выпрямленное напряжение u_d ;
- тока управления i_y (для управляемого выпрямителя);
- тока вентильной обмотки i_2 ;
- тока сетевой обмотки i_1 ;
- напряжения на вентильном плече с учетом угла γ_B и угла α .

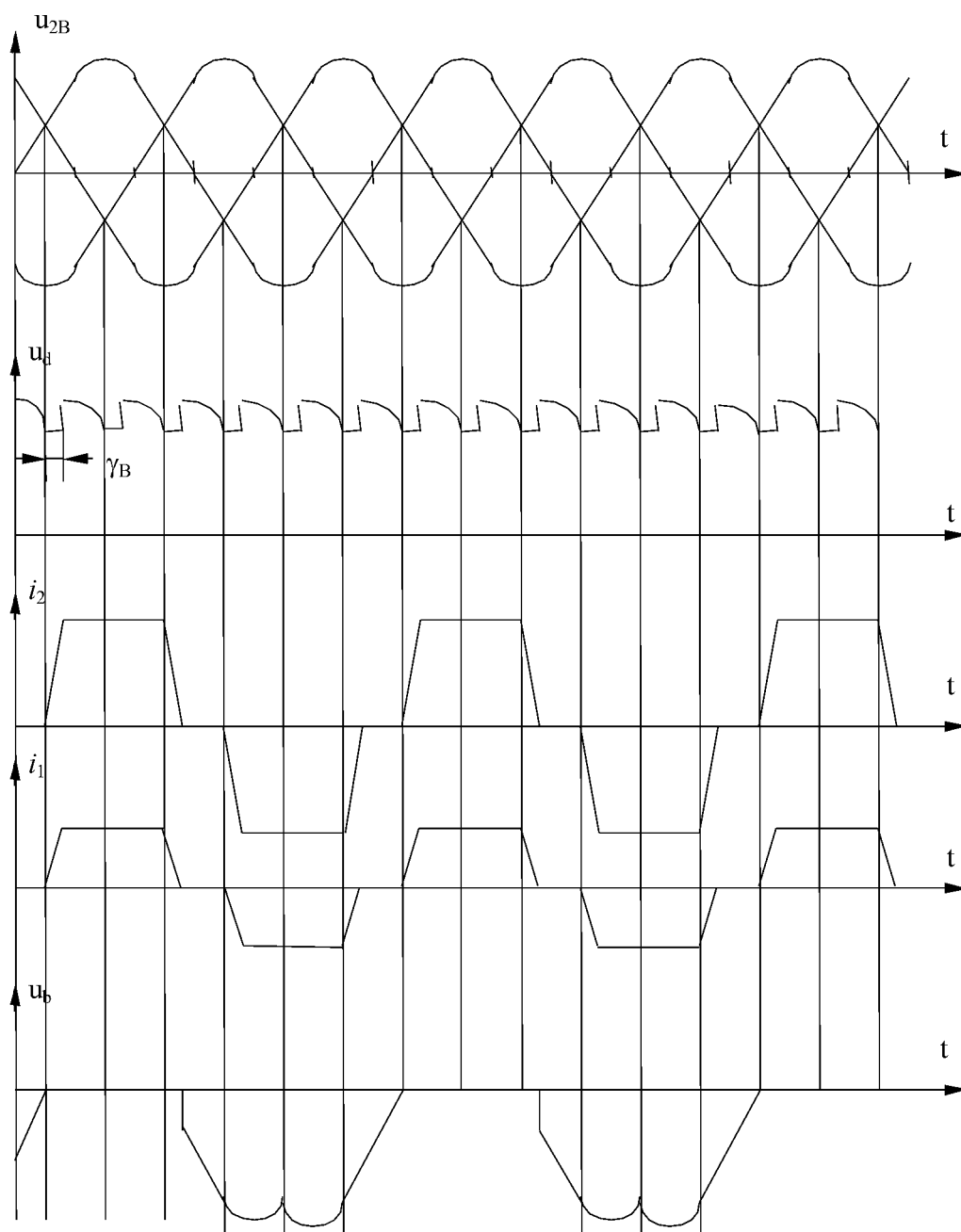


Рис. 7.1. Пример временных диаграмм работы нерегулируемого 6-ти пульсового мостового выпрямителя

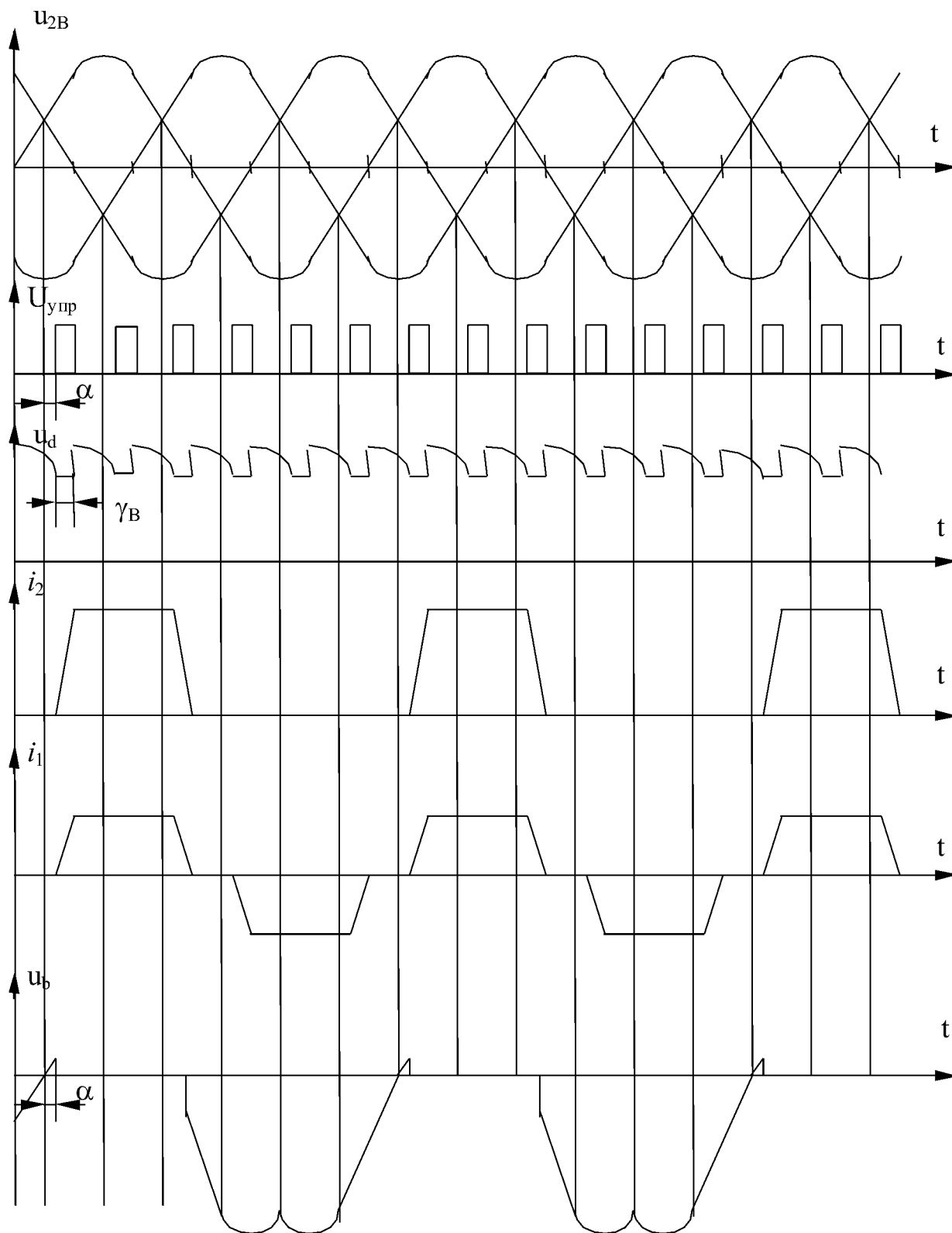


Рис. 7.2. Пример временных диаграмм работы регулируемого выпрямителя по схеме «две обратные звезды с уравнильным реактором»

Рекомендуемая литература

1. Бурков, А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А.Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
2. Белоус, А.И. Полупроводниковая силовая электроника / А.И. Белоус, С.А. Ефименко, А.С. Турцевич. – М.: Техносфера, 2013. – 229 с. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.litres.ru>.

ЗАНЯТИЕ 8. Расчет входной и ограничительной характеристик инвертора и угла коммутации вентильных токов γ_n

Цель занятия. Расчет и построение графиков входной и ограничительной характеристик инвертора

Краткие теоретические сведения

Основными характеристиками инвертора являются: входная – зависимость входного напряжения от тока инвертора при неизменном угле опережения ($\beta = \text{const}$) и ограничительная – зависимость допустимого входного напряжения от тока.

Естественная (при $\beta = \text{const}$) входная характеристика инвертора строится по двум точкам: холостого хода ($I_{II} = 0$; $U_{II} = U_{II.0.(\beta=0)} \cdot \cos \beta$) и номинальной нагрузки ($I_{II} = I_{IIH}$; $U_{II} = U_{IIH}$). Определить входное напряжение инвертора при работе под нагрузкой можно по формуле:

$$U_{II} = U_{II.0.(\beta=0)} \left(\cos \beta + A \frac{u_K}{100} \cdot \frac{I_{II}}{I_{IIH}} \right) + b_{II} \cdot e \cdot \Delta U_B, \quad (8.1)$$

где: $U_{II.0.(\beta=0)}$ – начальная точка ограничительной характеристики инвертора;

β - угол опережения инвертора;

$\frac{I_{II}}{I_{IIH}}$ - коэффициент загрузки инвертора;

b_{II} – число последовательно включенных вентилях в вентильном плече инвертора.

e – число последовательно включенных вентильных плеч инвертора; $e = 1$ для схемы «две обратные звезды с уравнительным реактором», $e = 2$ для 6-ти пульсовой мостовой схемы, $e = 4$ для 12-ти пульсовой двух мостовой схемы;

ΔU_B – прямое падение напряжения на открытом вентиле инвертора, В.

Для схемы «две обратные звезды с уравнительным реактором» $U_{II.0.(\beta=0)} = 1,17 U_{2II}$;

для 6-ти пульсовой мостовой схемы $U_{II.0.(\beta=0)} = 2,34 U_{2II}$;

для 12-ти пульсовой двух мостовой схемы $U_{II.0.(\beta=0)} = 4,68 U_{2II}$.

Ограничительная характеристика инвертора строится по двум точкам: начальной точке ($I_{II} = 0$; $U_{II} = U_{II.0.(\beta=0)}$) и точке номинальной нагрузки ($I_{II} = I_{IIH}$; U_{OG}). Напряжение U_{OG} можно определить по формуле:

$$U_{OG} = U_{II.0.(\beta=0)} \left(\cos \delta - A \frac{u_K}{100} \cdot \frac{I_{II}}{I_{IIH}} \right) - b_{II} \cdot e \cdot \Delta U_B, \quad (8.2)$$

где: $\delta = \delta_0 + \tau \approx 10^\circ$, δ_0 – угол выключения тиристора $\delta_0 \approx 4,5^\circ$; τ - угол запаса $5 \dots 10^\circ$ при частоте сети 50 Гц.

Ограничительная характеристика инвертора показывает, до какого тока I_{II} возможна нормальная работа без опрокидывания.

Нормальная работа обеспечивается при выполнении условия

$$\beta \geq \gamma_{\max. II} + \delta.$$

Точки пересечения ограничительной характеристики с входными (естественной и искусственной) характеристиками показывают, до какого максимального значения тока инвертора можно работать по той или иной входной характеристике. Величины

максимальных токов $I_{И1\max}$ при работе по естественной и $I_{И2\max}$ при работе по искусственной характеристике можно определить по формулам:

$$I_{И1\max} = \frac{100}{u_K \cdot 2A} \cdot I_{ИИ} \left[(\cos \delta - \cos \beta) - \frac{2b_{И} \cdot e \cdot \Delta U_B}{U_{И.0.(\beta=0)}} \right]; \quad (8.3)$$

$$I_{И2\max} = \frac{100}{u_K \cdot A} \cdot I_{ИИ} \left[\cos \delta - \frac{U_{d0} + b_{И} \cdot e \cdot \Delta U_B}{U_{И.0.(\beta=0)}} \right]. \quad (8.4)$$

Угол коммутации вентильных токов в инверторе следует определить из уравнения:

для схемы «две обратные звезды с уравнительным реактором»

$$\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta = \frac{I_{И} \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2И}};$$

для 6-ти пульсовой мостовой схемы

$$\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta = \frac{2I_{И} \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2И}};$$

для 12-ти пульсовой двух мостовой схемы

$$\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta = \frac{2I_{И} \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2И}}.$$

Ход выполнения занятия

8.1. Расчет входной характеристики инвертора

По формуле (8.1) рассчитываем входное напряжение инвертора при номинальном токе:

$$U_{И} = U_{И.0.(\beta=0)} \left(\cos \beta + A \frac{u_K}{100} \cdot \frac{I_{И}}{I_{ИИ}} \right) + b_{И} \cdot e \cdot \Delta U_B.$$

Величины A и u_K принимаем такими же, как в расчетах занятия 7; коэффициент загрузки инвертора $\frac{I_{И}}{I_{ИИ}} = 1$.

По формуле (8.2) рассчитываем ограничительное напряжение инвертора при номинальном токе:

$$U_{ог} = U_{И.0.(\beta=0)} \left(\cos \delta - A \frac{u_K}{100} \cdot \frac{I_{И}}{I_{И.И}} \right) - b_{И} \cdot e \cdot \Delta U_B.$$

По формуле (8.3) рассчитываем величину максимального тока $I_{И1\max}$ при работе по естественной входной характеристике

$$I_{И1\max} = \frac{100}{u_K \cdot 2A} \cdot I_{ИИ} \left[(\cos \delta - \cos \beta) - \frac{2b_{И} \cdot e \cdot \Delta U_B}{U_{И.0.(\beta=0)}} \right].$$

По формуле (8.4) рассчитываем величину максимального тока $I_{И2\max}$ при работе по искусственной входной характеристике

$$I_{И2\max} = \frac{100}{u_K \cdot A} \cdot I_{ИИ} \left[\cos \delta - \frac{U_{d0} + b_{И} \cdot e \cdot \Delta U_B}{U_{И.0.(\beta=0)}} \right].$$

8.2. Расчет угла коммутации вентильных токов инвертора

Угол коммутации вентильных токов рассчитывается для токов нагрузки $I_{II} = 0,5I_{IIH}$ и $I_{II} = I_{IIH}$, поскольку при $I_{II} = 0$ $\gamma_{II} = 0$.

Для инвертора γ_{II} получают из уравнения:

$$\cos(\beta - \gamma_{II}) - \cos \beta = \frac{I_{II} \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2II}}.$$

$$\gamma_{II} = \beta - \arccos\left(\cos \beta + \frac{I_{II} \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2II}}\right).$$

Тогда для схемы «две обратные звезды с уравнительным реактором»:
при $I_{II} = 0,5I_{IIH}$

$$\gamma_{II} = \beta - \arccos\left(\cos \beta + \frac{0,5 \cdot I_{II} \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2II}}\right);$$

при $I_{II} = I_{IIH}$

$$\gamma_{II} = \beta - \arccos\left(\cos \beta + \frac{I_{II} \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2II}}\right)$$

для 6-ти пульсовой мостовой схемы

при $I_{II} = 0,5I_{IIH}$

$$\gamma_{II} = \beta - \arccos\left(\cos \beta + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot I_{II} \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2II}}\right);$$

при $I_{II} = I_{IIH}$

$$\gamma_{II} = \beta - \arccos\left(\cos \beta + \frac{2 \cdot I_{II} \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2II}}\right);$$

для 12-ти пульсовой двух мостовой схемы

при $I_{II} = 0,5I_{IIH}$

$$\gamma_{II} = \beta - \arccos\left(\cos \beta + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot I_{II} \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2\lambda II}}\right);$$

при $I_{II} = I_{IIH}$

$$\gamma_{II} = \beta - \arccos\left(\cos \beta + \frac{2 \cdot I_{II} \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2\lambda II}}\right).$$

8.3. Построение графиков характеристик инвертора

По рассчитанным по формулам (8.1÷8.4) значениям напряжений и токов инвертора строим входную естественную характеристику, ограничительную характеристику и на уровне U_{d0} – входную искусственную характеристику (см. рис. 8.1).

Рекомендуемая литература

1. Бурков, А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А.Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.

2. Белоус, А.И. Полупроводниковая силовая электроника / А.И. Белоус, С.А. Ефименко, А.С. Турцевич. – М.: Техносфера, 2013. – 229 с. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.litres.ru>.

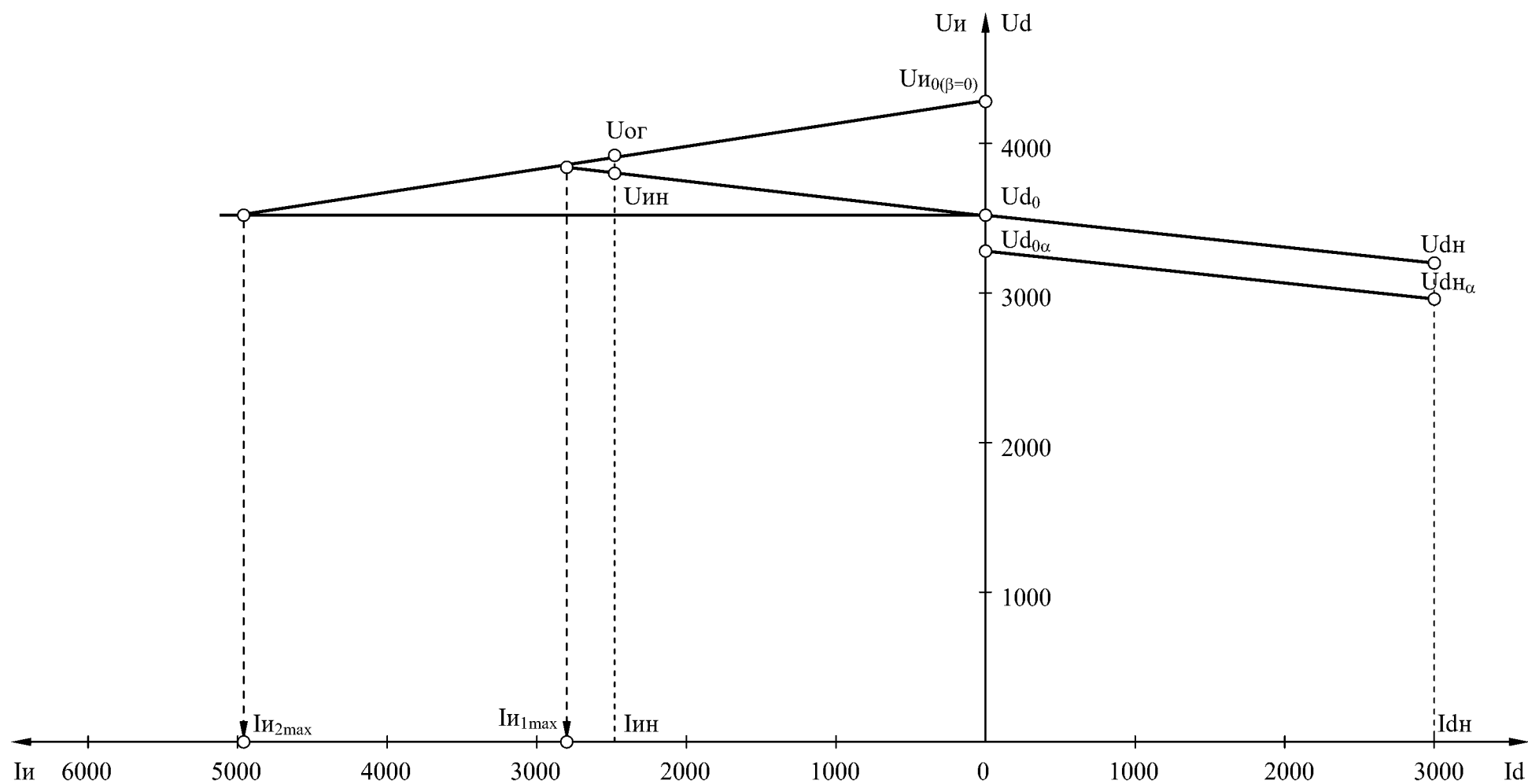


Рис. 8.1. Пример графиков характеристик выпрямительно-инверторного преобразователя

ЗАНЯТИЕ 9. Расчет коэффициентов мощности преобразовательного агрегата в режимах выпрямителя и инвертора

Цель занятия. Расчет коэффициентов мощности преобразовательного агрегата.

Краткие теоретические сведения

Полупроводниковые преобразователи относятся к категории приёмников электрической энергии, потребляющих от сети несинусоидальный ток. При выпрямлении токи вторичной и первичной обмоток трансформатора, включённого по схеме «звезда-звезда», представляют собой импульсы длительностью $\frac{2\pi}{3} + \gamma$ Эл. Такие импульсы содержат гармоники основной частоты сети 50 Гц, а активная мощность, потребляемая выпрямителем из трёхфазной сети, будет определяться только током первой гармоники

$$P_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1(1)} \cdot \cos \varphi, \quad (9.1)$$

где $U_{1\phi}$ – действующее значение фазного напряжения первичной обмотки;

$I_{1(1)} = \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot I_1$ – действующее значение тока первой гармоники в фазе первичной обмотки;

φ – угол сдвига фаз между фазным напряжением первичной обмотки и током первой гармоники.

Коэффициент мощности выпрямителя определяется отношением активной мощности, потребляемой из трёхфазной сети, к полной мощности выпрямительного агрегата

$$\chi = \frac{P_1}{S_1} = \nu \cdot \cos \varphi. \quad (9.2)$$

Коэффициент искажения формы тока ν для режима холостого хода выпрямителя определяется отношением: $\nu = \frac{I_{1(1)}}{I_1}$, и может быть рассчитан по формуле

$$\nu = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}, \quad (9.3)$$

где m – число пульсов выпрямленного напряжения.

Зависимость коэффициента искажения формы тока от числа пульсов выпрямленного напряжения представлена в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Зависимость коэффициента искажения формы тока
от числа пульсов выпрямленного напряжения

Число пульсов выпрямленного напряжения	3	6	12
Коэффициент искажения формы тока ν	0,827	0,955	0,988

С учётом коммутации вентильных токов и угла управления тиристорами формула для определения коэффициента мощности управляемого выпрямителя примет вид

$$\chi = \nu \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\gamma_B}{2}\right). \quad (9.4)$$

Следовательно, коэффициент мощности выпрямителя уменьшается с ростом тока нагрузки. В управляемом выпрямителе коэффициент мощности всегда будет ниже, чем в неуправляемом выпрямителе.

При инвертировании токи вторичной и первичной обмоток трансформатора представляют собой трапецеидальные импульсы. Такие импульсы содержат большое количество гармоник, а активная мощность, отдаваемая инвертором в трёхфазную сеть, будет определяться только током первой гармоники

$$P_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1(1)} \cdot \cos \varphi, \quad (9.5)$$

где $U_{1\phi}$ – действующее значение фазного напряжения первичной обмотки;

$I_{1(1)} = \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot I_1$ – действующее значение тока первой гармоники в фазе первичной обмотки;

φ – угол сдвига фаз между фазным напряжением первичной обмотки и током первой гармоники.

Коэффициент мощности инвертора определяется отношением активной мощности, отдаваемой в трёхфазную сеть, к полной мощности инверторного агрегата

$$\chi = \frac{P_1}{S_1} = \nu \cdot \cos \varphi. \quad (9.6)$$

Коэффициент искажения формы тока ν определяется так же, как и для выпрямителя: $\nu = \frac{I_{1(1)}}{I_1}$ (см. табл. 9.1).

Угол φ определяется соотношением

$$\varphi = 180^\circ - \left(\beta - \frac{\gamma_H}{2} \right). \quad (9.7)$$

С учётом выражения (9.7) коэффициент мощности инвертора будет:

$$\chi = \nu \cdot \cos\left(\beta - \frac{\gamma_H}{2}\right). \quad (9.8)$$

Очевидно, что увеличение угла β снижает активную мощность, отдаваемую инвертором в трёхфазную сеть, и уменьшает коэффициент мощности инвертора. Поэтому режим компаундирования инвертора (работа на искусственной входной характеристике), при котором система управления обеспечивает минимально возможное значение угла опережения на границе устойчивой работы $\beta_{\min} \geq \gamma_H + \delta$ предпочтительнее, чем работа с постоянным углом опережения, рассчитанным на номинальный ток $I_{\text{ин}}$.

Ход выполнения занятия

9.1. Расчет коэффициента мощности выпрямителя

Коэффициент мощности выпрямителя рассчитывают по формуле (9.4) для трех значений тока нагрузки: $I_d = 0$; $I_d = 0,5I_{\text{дн}}$ и $I_d = I_{\text{дн}}$.

Для неуправляемого выпрямителя:

при $I_d = 0$ $\chi_B = \nu$; при $I_d = 0,5 I_{dH}$ $\chi_B = \nu \cdot \cos\left(\frac{\gamma_{B_{0,5IdH}}}{2}\right)$; при $I_d = I_{dH}$ $\chi_B = \nu \cdot \cos\left(\frac{\gamma_{B_{IdH}}}{2}\right)$.

Для управляемого выпрямителя:

при $I_d = 0$ $\chi_B = \nu \cdot \cos \alpha$; при $I_d = 0,5 I_{dH}$ $\chi_B = \nu \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\gamma_{B_{0,5IdH}}}{2}\right)$;

при $I_d = I_{dH}$ $\chi_B = \nu \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\gamma_{B_{IdH}}}{2}\right)$.

9.2. Расчет коэффициента мощности инвертора

Коэффициент мощности инвертора рассчитывают по формуле (9.8) для трех значений тока нагрузки: $I_H = 0$; $I_H = 0,5 I_{IH}$ и $I_H = I_{IH}$.

При $I_H = 0$ $\chi_H = \nu \cdot \cos \beta$; при $I_H = 0,5 I_{IH}$ $\chi_H = \nu \cdot \cos\left(\beta - \frac{\gamma_{H_{0,5I_{IH}}}}{2}\right)$;

при $I_H = I_{IH}$ $\chi_H = \nu \cdot \cos\left(\beta - \frac{\gamma_{H_{I_{IH}}}}{2}\right)$.

9.3. Построение графика зависимости коэффициента мощности выпрямительно-инверторного преобразователя от токов нагрузки

По результатам расчетов коэффициентов мощности строится график (рис. 9.1).

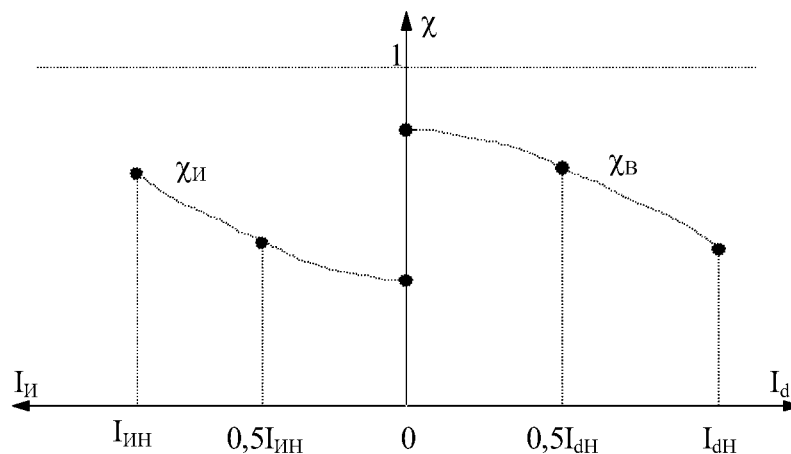


Рис. 9.1. Пример графика зависимости коэффициентов мощности от токов преобразователя

Рекомендуемая литература

1. Бурков, А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А.Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
2. Электроснабжение и электрификация железных дорог. Инновационный дайджест. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.rzd-expo.ru>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П.1.1

Параметры силовых диодов по ГОСТ 10662-69

Тип вентиля	U_0 , В	R_d , МОм	R_T , °C/Вт			$I_{уд}$, А	U_P , В	Q_B , мкКл	ΔU_B , В	$I_{обр.мах}$, мА
			V=0	V=6 м/с	V=12 м/с					
В200	1,12	0,7	1,04	0,54	0,43	5500	100- 1000	500	0,7	3
ВЛ200	1,12	0,7	1,04	0,54	0,43	5500	600- 1200	-	0,7	3
В320	1,09	0,426	0,77	0,28	0,22	6600	100- 1000	500	0,7	5
ВЛ320	1,09	0,426	0,77	0,28	0,22	6600	600- 1200	-	0,7	5

Таблица П.1.2

Параметры силовых тиристоров по ГОСТ 14069-72

Тип вентиля	U_0 , В	R_d , МОм	$R_{п-к}$, °C/Вт	$I_{уд}$, А	U_P , В	Q_B , мкКл	ΔU_B , В	$I_{обр.мах}$, мА
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ТЛ2- 200	0,9	0,9	0,18	4000	600- 900	-	1,6	20
Т15-250	1,18	0,68	0,1	4500	400- 1600	170	1,7	25
Т15-200	1,25	1,32	0,1	4000	400- 1800	170	2,05	25
ТЛ4- 250	1,35	0,38	0,13	4500	400- 1000	-	1,8	40
Т2-320	1,36	0,9	0,05	8500	100- 1400	300	2,1	20
Т-500	1,3	0,64	0,038	9500	100- 1600	450	2,1	20
Т4-500	1,5	0,45	0,026	12000	1000- 1400	600	2,3	50
Т-630	1,6	0,35	0,026	13000	1600- 2400	600	2,3	50
Т-800	1,22	0,35	0,026	14000	1000- 1800	650	2,1	50

Параметры силовых вентилях по ГОСТ 20859-79

Тип вентиля	U_0 , В	R_d , мОм	$R_{п-к}$, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	$I_{уд}$, А	$U_{п}$, В	Q_v , мкКл	ΔU_v , В	$I_{обр.мах}$, мА
ДЛ 123-320	1,7	0,83	0,08	5500	400-1400	-	0,9	25
Д 133-500	1,7	0,57	0,045	9000	1000-4000	1000	1,0	50
ДЛ 133-500	1,8	0,5	0,045	7500	400-1400	600	1,05	25
Д 143-630	2,1	0,65	0,034	10000	1000-4000	1500	1,0	50
Д 143-800	1,7	0,32	0,034	15000	1000-2800	1200	1,0	50
Д 143-1000	1,55	0,26	0,034	18000	400-1600	700	0,9	50
Д 253-1600	1,5	0,12	0,022	28000	400-2000	1200	1,0	100
Д 253-2000	1,65	0,11	0,02	35000	1000-2500	1200	1,05	100
Т 133-320	2,0	1,1	0,045	6000	900-2000	700	1,2	35
Т 143-400	2,15	0,95	0,034	6000	800-2400	1200	1,2	50
Т 143-500	1,8	0,57	0,034	10000	400-1600	800	1,1	30
Т 253-800	2,1	0,44	0,022	16000	2000-2400	1200	1,2	70
Т 253-1000	1,8	0,25	0,022	20000	1000-1800	1200	1,1	70
Т 253-1250	1,6	0,14	0,022	26000	400-1200	1100	1,0	70