

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.ДВ.04.02 Преобразовательная техника

Направление подготовки (специальность) 35.04.06 Агроинженерия

**Профиль образовательной программы Электротехнологии и
электрооборудование в сельском хозяйстве**

Форма обучения очная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Конспект лекций.....	3
1.1 Лекция № 1 Схемы выпрямителей переменного напряжения.....	3
1.2 Лекция № 2 Трёхфазные схемы выпрямления.....	9
1.3 Лекция № 3 Сглаживающие фильтры.....	18
1.4 Лекция № 4 Транзисторные преобразователи постоянного напряжения.....	29
1.5 Лекция № 5 Бестрансформаторные преобразователи постоянного напряжения.....	36
1.6 Лекция № 6 Преобразователи переменного напряжения с регулируемой частотой	42
1.7 Лекция № 7 Трёхфазные преобразователи постоянного напряжения	50
1.8 Лекция № 8 Параллельный тиристорный инвертор напряжения	57
2. Методические указания по проведению практических занятий.....	65
2.1 Практическое занятие № ПЗ-1 Выпрямители переменного напряжения.....	65
2.2 Практическое занятие № ПЗ-2 Транзисторные преобразователи постоянного напряжения.....	69
2.3 Практическое занятие № ПЗ-3 Тиристорные преобразователи напряжения.....	75
2.4 Практическое занятие № ПЗ-4 Стабилизаторы постоянного напряжения.....	79

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1. 1 Лекция №1(2 часа).

Тема: « Схемы выпрямителей переменного напряжения.»

1.1.1 Вопросы лекции:

1. Назначение, классификация и основные характеристики выпрямителей
2. Вращающиеся преобразователи: двигатели-генераторы.
3. Ионные (ртутные) преобразователи.
4. Полупроводниковые выпрямители.
5. Однофазная однополупериодная схема выпрямления.

1.1.2 Краткое содержание вопросов:

Назначение, классификация и основные характеристики выпрямителей
Вращающиеся преобразователи: двигатели-генераторы.

Устройство, предназначенное для преобразования переменного тока в постоянный ток, называется выпрямителем.

Необходимость выпрямления тока на практике возникает: в электроприводе постоянного тока, системах возбуждения машин, химической промышленности, системах управления и регулирования, электротяге, при передаче электроэнергии постоянным током на дальние расстояния и т.д.

Для преобразования переменного тока в постоянный ток применяются вентильные установки, состоящие из компонент:

- электрических вентилей (диоды, тиристоры);
- силового согласующего трансформатора, с помощью которого получают необходимое число фаз и величину выпрямленного напряжения;
- сглаживающих фильтров, уменьшающих амплитуды высших гармоник выпрямленного тока.

Работа преобразовательных установок сопровождается сложными электромагнитными процессами, характер которых зависит от многих параметров системы, содержащей нелинейные элементы (вентили) и магнитные связи.

Каждый установившийся режим работы по существу представляет собой непрерывно повторяющиеся переходные процессы, возникающие при включении (зажигании) и выключении (гашении) вентилей, осуществляющих коммутацию тока в преобразовательной установке.

Простейшая схема выпрямителя приведена на рис.1,а. На рис.1,б изображена синусоида напряжения $u(t)$ на вторичной обмотке трансформатора, а также кривые выпрямленного тока i_d и напряжения u_d на активном сопротивлении нагрузки R . Предполагается, что вентиль VD идеальный.

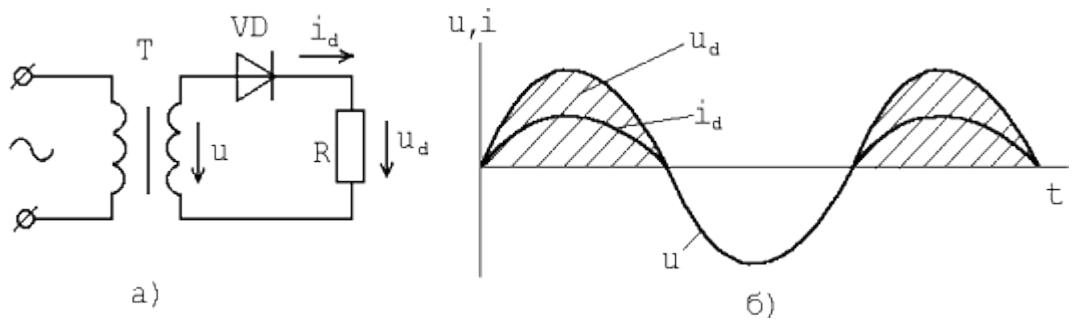


Рис.1. Однополупериодная схема выпрямителя (а) и графики переменных при активной нагрузке (б)

Так как в цепи нагрузки имеется вентиль, то ток появляется только во время положительной полуволны напряжения. Во время отрицательной полуволны вентиль закрыт.

Процессы в однополупериодной схеме выпрямителя протекают сложнее, если нагрузка носит не активный, а индуктивный характер ($\omega L \gg R$).

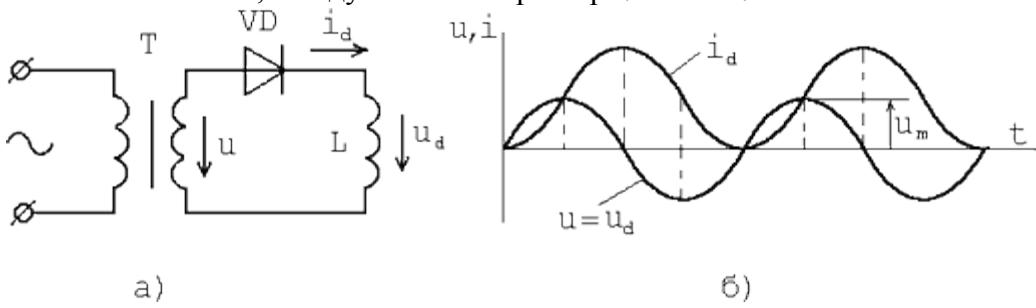


Рис.2. Однополупериодная схема выпрямителя(а) и графики переменных при индуктивной нагрузке(б)

В момент

$$t = 0$$

вентиль открывается и процесс описывается уравнением

$$U_m \sin \omega t = L \frac{di}{dt},$$

откуда

$$i = -\frac{U_m}{L\omega} \cos \omega t \Big|_0^t = \frac{U_m}{L\omega} (1 - \cos \omega t) \quad (1)$$

Из этого уравнения следует, что ток, хотя и будет синусоидальным, но, благодаря постоянной составляющей, равной амплитуде синусоиды, никогда не будет принимать отрицательных значений (рис. 2,б). Вентиль же все время будет открыт. Получается, что вентиль в процессе как бы не играет никакой роли. На самом деле его роль здесь чрезвычайно велика.

Если бы вентиль, катушка индуктивности и трансформатор были идеальными (не имели потерь), то процесс имел бы точно такой характер, как описан выше, и вентиль не играл бы никакой роли. В действительности же всякая реальная электрическая цепь имеет потери. Поэтому при отсутствии в цепи вентиля процесс протекает так, как показано на рис.3.

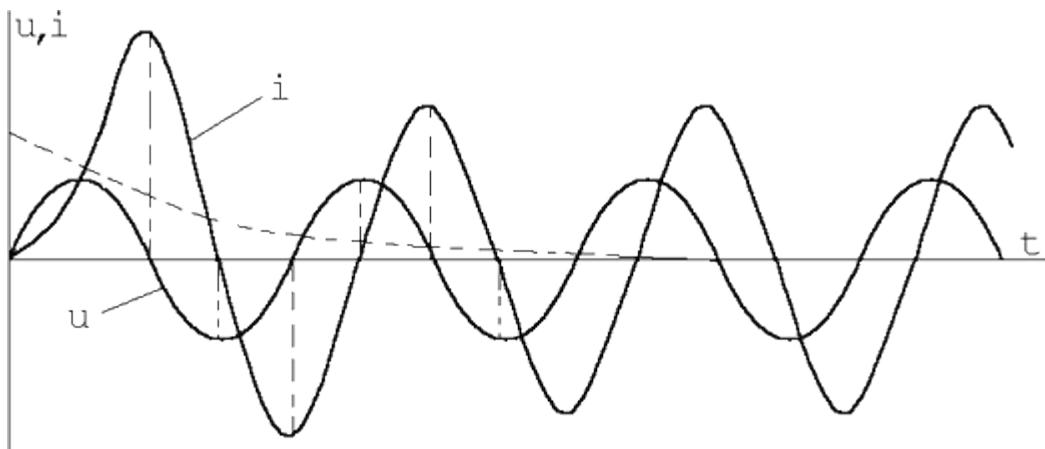


Рис.3. Процессы без вентиля в цепи индуктивной нагрузки

Вначале появляется некоторая постоянная составляющая тока, которая, как бы ни было мало активное сопротивление, в конце концов затухает, и в установившемся режиме при малом сопротивлении R ток изменяется по закону

$$i = -\frac{U_m}{L\omega} \cos \omega t = \frac{U_m}{L\omega} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

При наличии в цепи вентиля процесс протекает так, как показано на рис.1.4.

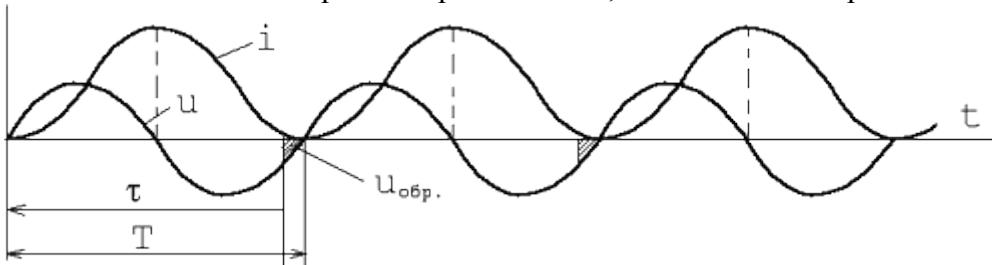


Рис.4. Процессы с вентилем и малым активным сопротивлением

Процесс начинается также, как и в цепи без вентиля. Однако в момент

$$t = \tau$$

ток i становится равным нулю. В момент

$$t = T$$

происходит как бы новое включение индуктивности под синусоидальное напряжение, и процесс повторяется. Таким образом, при наличии вентиля и малом сопротивлении R ток i будет близок по форме к изображенному на рис.4, а не 3.

Следует обратить внимание на две особенности протекания процесса в цепи, которые вносятся нелинейным элементом – вентилем:

- вентиль позволяет получить процесс, близкий к процессу в идеальной цепи (как бы компенсируя потери);

- постоянная времени процесса равна нулю.

В интервалах, когда вентиль не пропускает тока, все напряжение и прикладывается к вентилю. Напряжение на вентиле показано на рис.4 заштрихованными участками кривой u . Это напряжение называется обратным напряжением вентиля $u_{обр.}$, так как при этом анод вентиля имеет отрицательную полярность по отношению к катоду.

Рассмотрим другую схему однополупериодного выпрямителя – с так называемым буферным (обратным) вентилем (рис.5).

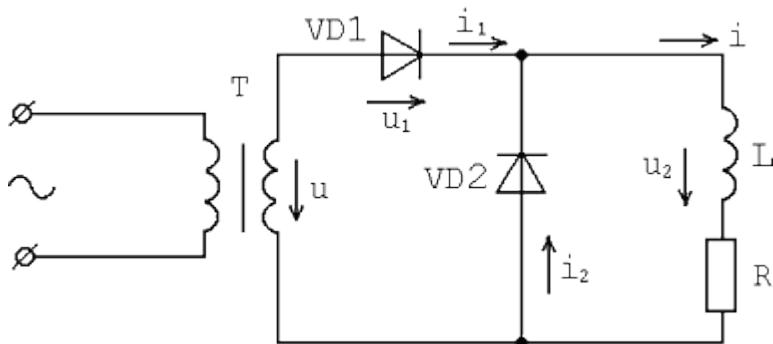


Рис.5. Схема с буферным вентилем

Она позволяет значительно снизить пульсации тока в индуктивной нагрузке, которые, как видно из предыдущего рассмотрения, достигают почти двойной амплитуды переменной составляющей.

На этой схеме иллюстрируется применение метода кусочно-линейной аппроксимации с припасовыванием начальных условий.

Метод кусочно-линейной аппроксимации заключается в замене заданной нелинейной характеристики ломаной прямой с одной или несколькими точками излома. Такая замена нелинейной характеристики позволяет вести расчет аналитически с помощью линейных уравнений [1].

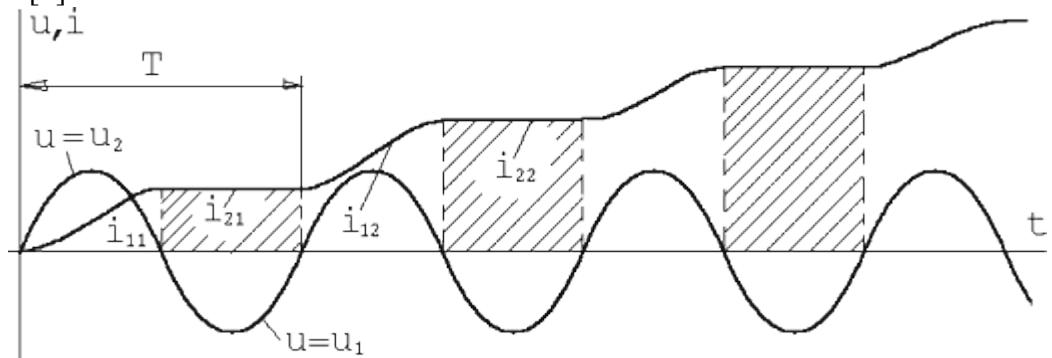


Рис.6. Кривые токов и напряжений в схеме на рис.5 с $R = 0$

Сначала рассмотрим работу схемы рис.5 при
 $R = 0$,

т.е. при чисто индуктивной нагрузке. Кривые токов и напряжений в схеме изображены на рис.6.

Схема работает следующим образом. В момент включения схемы
 $(t = 0)$

напряжение на нагрузке изменяется по синусоидальному закону. Так как напряжение приложено к чисто индуктивной нагрузке, то ток i в соответствии с выражением (1) можно выразить как

$$i = i_{11} = \frac{U_*}{L\omega} (1 - \cos \omega t),$$

где второй индекс указывает номер периода ($n = 1, 2, \dots$).

Вентиль 2 ($VD2$) в течение первого полупериода закрыт, так как он включен встречно по отношению к вентилю 1 ($VD1$) и, следовательно, его анод будет иметь отрицательный относительно катода потенциал.

В момент

$$t = \frac{T}{2}$$

анод вентиля 2 становится положительным и, следовательно, вентиль 2 открывается, закорачивая индуктивность L . Вентиль 1 закрывается, так как из-за отпирания вентиля 2 катод вентиля 1 становится положительным. Поскольку вентиль 1 закрыт, ток i_{11} в этот момент прерывается. Ввиду отсутствия потерь в вентиле 2 и закороченной им индуктивности ток i , достигший к концу первого полупериода значения

$$\frac{2U}{L\omega},$$

в следующий полупериод будет проходить через вентиль 2, оставаясь постоянным, т.е.

$$i = i_{21} = \frac{2U_m}{L\omega}.$$

В момент

$$t_2 = T$$

вентиль 1 открывается, а вентиль 2 закрывается. Ток индуктивности снова начнет изменяться по синусоидальному закону, но не с нулевого значения, а со значения

$$\frac{2U_m}{L\omega},$$

т.е. в третьем полупериоде

$$i = \frac{2U_m}{L\omega}(3 - \cos \omega t) \quad (3)$$

Далее процесс развивается тем же путем.

Таким образом, от периода к периоду ток в индуктивности будет нарастать ступенями до бесконечности. В любом n -м периоде от начала до конца первого полупериода ток меняется по закону

$$i_n = \frac{U_m}{L\omega}[(2n-1) - \cos \omega t] \quad (4)$$

Во втором полупериоде n -го периода ток в индуктивности остается постоянным и равным

$$i_{2n} = \frac{U_m}{L\omega} 2n \quad (5)$$

Рассмотренный случай идеализированный и на практике не встречается.

Процесс будет протекать иначе, если учесть активное сопротивление нагрузки R . В этом случае в первом положительном полупериоде, когда к нагрузке через вентиль 1 подключено напряжение

$$u = U_m \sin \omega t,$$

ток через нагрузку определяется дифференциальным уравнением

$$U_m \sin \omega t = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (6)$$

Общий интеграл этого уравнения

$$i = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

где

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2},$$

$$\varphi = \arctg \frac{L\omega}{R};$$

$$\tau = \frac{L}{R},$$

а величина A зависит от начальных условий.

Во втором полупериоде, когда индуктивность замкнута через вентиль 2, ток определяется уравнением

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 0 \quad (8)$$

общий интеграл которого

$$i = B e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

где величина B также зависит от начальных условий.

Для определения тока в любом интервале времени удобно воспользоваться разностными уравнениями. Обозначим ток в начале n -го периода через $i[n]$, а в конце первого (в начале второго) полупериода n -го периода через

$$i\left[n + \frac{1}{2}\right],$$

наконец, ток в конце n -го и в начале $(n+1)$ -го периода обозначим через $i[n+1]$.

Тогда, отсчитывая время от начала n -го периода, можно, используя уравнение (7), написать (для $t = 0$)

$$i[n] = -\frac{U_m}{Z} \sin \varphi + A \quad (10)$$

откуда

$$A = i[n] + \frac{U_m}{Z} \sin \varphi. \quad (11)$$

Следовательно, в течение первого полупериода n -го периода ток меняется по закону

$$i = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + \left\{ i[n] + \frac{U_m}{Z} \sin \varphi \right\} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (12)$$

В конце этого полупериода, когда

$$t = \frac{T}{2},$$

ток станет равным

$$i\left[n + \frac{1}{2}\right] = \frac{U_m}{Z} \sin \varphi + \left\{ i[n] + \frac{U_m}{Z} \sin \varphi \right\} e^{-\frac{T}{2\tau}} \quad (13)$$

Воспользовавшись уравнением (9) для второго полупериода, найдем

$$i\left[n + \frac{1}{2}\right] = B \quad (14)$$

Таким образом, ток во втором полупериоде будет меняться по закону

$$i = i\left[n + \frac{1}{2}\right] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (15)$$

В конце этого полупериода, когда ток будет равен

$$t = \frac{T}{2},$$

$$i[n+1] = i\left[n + \frac{1}{2}\right] e^{-\frac{T}{2\tau}} \quad (16)$$

Обозначив

$$\frac{T}{2\tau} = \beta,$$

получим

$$i\left[n + \frac{1}{2}\right] = i[n+1]e^{\beta} \quad (17)$$

Подставляя это значение

$$i\left[n + \frac{1}{2}\right]$$

в соотношение (13), получим разностное уравнение

$$i[n+1]e^{\beta} = \frac{U_m}{Z} \sin \varphi + \left\{ i[n] + \frac{U_m}{Z} \sin \varphi \right\} e^{-\beta} \quad (18)$$

которое можно решать с помощью преобразования Лорана [1]

$$i[n] = \left[\frac{1+e^{-\beta}}{e^{\beta}-e^{-\beta}} + \frac{(1+e^{-\beta})e^{-n2\beta}}{e^{-\beta}-e^{\beta}} \right] \frac{U_m}{Z} \sin \varphi.$$

После некоторых преобразований окончательно получим

$$i[n] = \frac{1+e^{-\beta}}{e^{\beta}-e^{-\beta}} (1-e^{-n2\beta}) \frac{U_m}{Z} \sin \varphi \quad (19)$$

откуда нетрудно найти значение тока в установившемся режиме (при $n \rightarrow \infty$):

$$i_{\text{уст}}[n] = \frac{1+e^{-\beta}}{e^{\beta}-e^{-\beta}} \frac{U_m}{Z} \sin \varphi \quad (20)$$

Согласно (17) имеем

$$i_{\text{уст}}\left[n + \frac{1}{2}\right] = \frac{1+e^{\beta}}{e^{\beta}-e^{-\beta}} \frac{U_m}{Z} \sin \varphi \quad (21)$$

Амплитуда пульсаций в установившемся режиме может быть найдена как

$$i_{\text{уст}}\left[n + \frac{1}{2}\right] - i_{\text{уст}}[n] = \frac{U_m}{Z} \sin \varphi \quad (22)$$

Таким образом, применение буферного (обратного) вентиля уменьшает пульсации тока: величина пульсаций в этом случае составляет долю, равную

$$\frac{1}{2} \sin \varphi$$

от величины пульсаций

$$\frac{2U_m}{Z}$$

без буферного вентиля ($VD2$).

1. 2 Лекция №2(2 часа).

Тема: Трёхфазные схемы выпрямления.

1.2.1 Вопросы лекции:

1. Мостовые схемы выпрямителей.
2. Коммутация токов в трёхфазных выпрямителях.
3. Коммутация токов в выпрямителях.
4. Выпрямители с нулевым выводом.
5. Трехфазные (многофазные)

»

1.2.2 Краткое содержание вопросов:

Мостовые схемы выпрямителей. Коммутация токов в трёхфазных выпрямителях.

Преобразователи, относящиеся к этой группе, могут быть **управляемыми** и **неуправляемыми**. Наиболее распространенными управляемыми вентилями являются **тиристоры**, а неуправляемыми – полупроводниковые **диоды**.

В зависимости от типа источника переменного тока различают однофазные и трехфазные преобразователи (при параллельном соединении – многофазные).

Основными параметрами преобразовательной схемы являются число возможных направлений тока и число пульсаций.

В зависимости от того, проходит ли ток в вентильной обмотке преобразовательного трансформатора только в одном направлении или в том и другом направлении, различают **однонаправленные и двунаправленные** схемы.

Число пульсаций – это отношение частоты низшей гармоники напряжения в пульсирующем напряжении на стороне постоянного тока преобразователя к частоте напряжения на стороне переменного тока.

Схемное выполнение преобразователей с естественной коммутацией характеризуется так называемыми **коммутационными группами**. Коммутационная группа содержит все вентили, которые в нормальных рабочих условиях коммутируют между собой независимо от вентилей других групп. Данный преобразователь может иметь несколько коммутационных групп, которые могут соединяться параллельно или последовательно.

1. Однофазные преобразователи

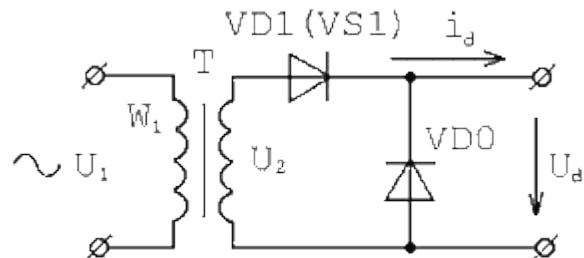


Рис.1. Однофазная, однонаправленная, однопульсная схема (1Ф1Н1П)

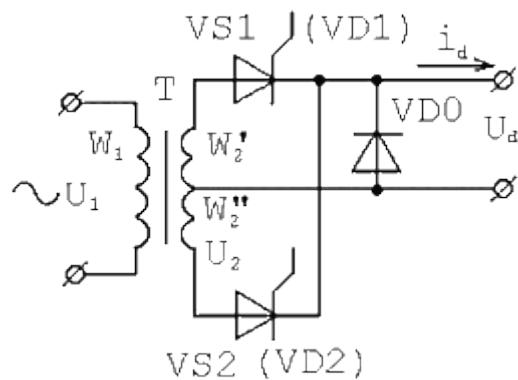


Рис.2. Однофазная, однонаправленная, двухпульсная схема (1Ф1Н2П)

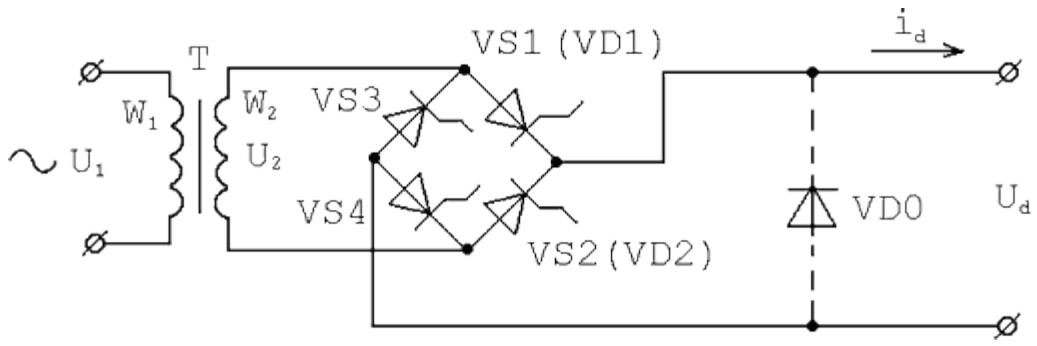


Рис.3. Однофазная, двунаправленная, двухпульсная схема (1Ф2Н2П)

В схемах рис.1–3 могут использоваться либо неуправляемые полупроводниковые диоды (VD), либо управляемые – тиристоры (VS). Управляемые преобразователи, выполненные по схемам рис.2–3, при отсутствии шунтирующих диодов $VD0$ могут работать и в инверторном режиме [1].

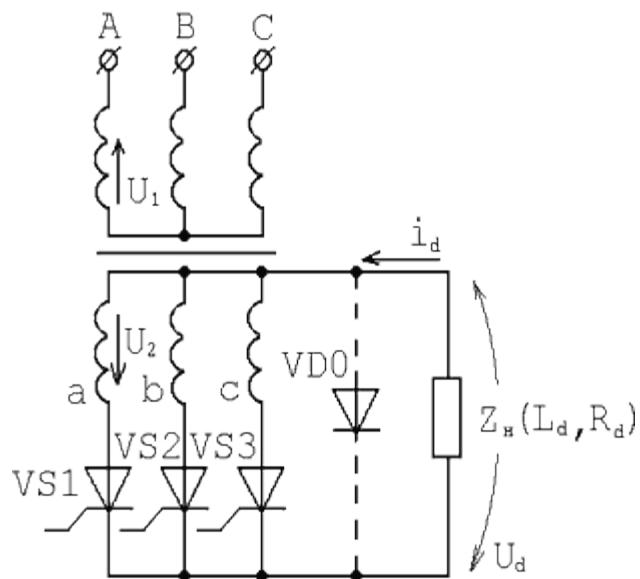


Рис.4. Схема типа 3Ф1Н3П

Вентили в схеме рис.4 (3Ф1Н3П) $VS1$ – $VS3$ (или $VD1$ – $VD3$) образуют единую коммутационную группу. Изменяя число сетевых и вентильных обмоток преобразовательного трансформатора T , можно получить несколько вариантов схемы. Например, увеличивая число вентильных обмоток преобразовательного трансформатора (схема рис. 5) до шести и объединяя нулевые точки, можно увеличить число фаз на стороне вентильных обмоток и, следовательно, путем такого развития схемы, показанной на рис.4, увеличить число пульсаций преобразователя. Получим шестипульсный эквивалент схемы, показанной на рис.4, с двумя коммутационными группами.

2. Коммутация токов в выпрямителях.

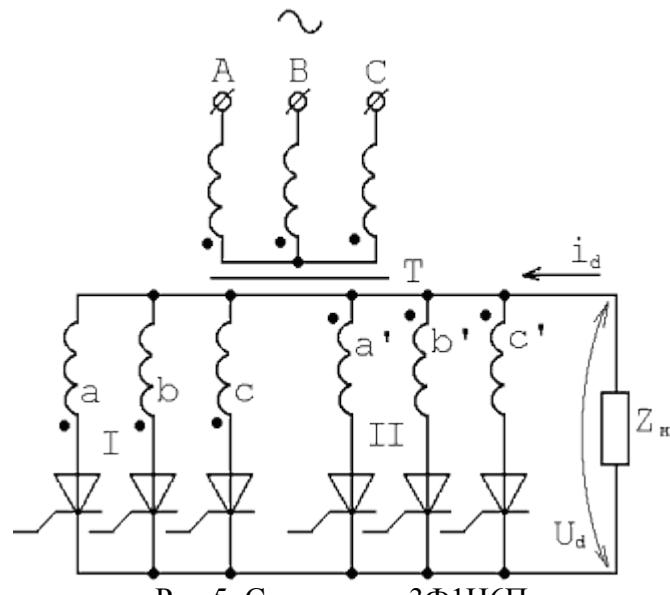


Рис.5. Схема типа 3Ф1Н6П

На рис.5 показано параллельное соединение двух различных коммутационных групп I и II. Это шестипульсный эквивалент схемы, показанной на рис.4.

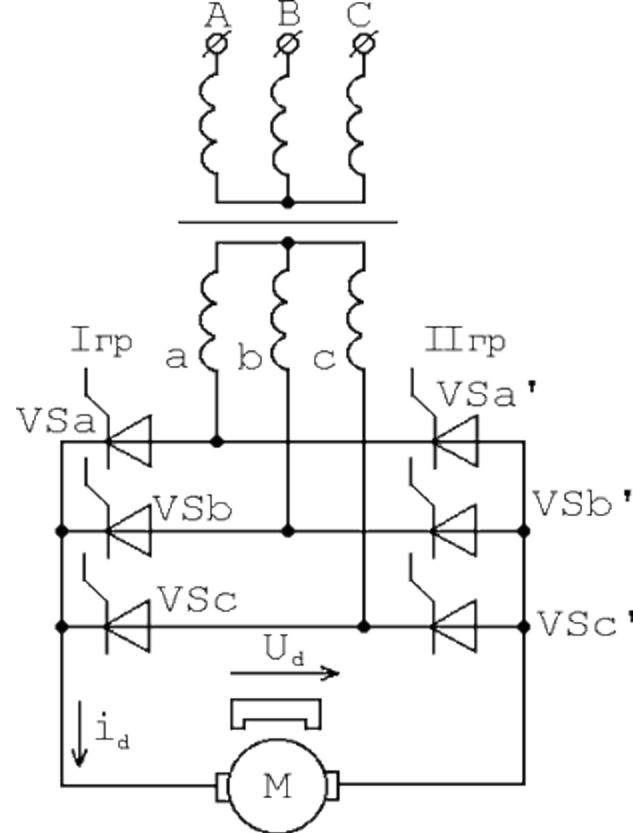


Рис.6. Трехфазная двунаправленная шестипульсная схема – 3Ф2Н6П

На рис.6 показана схема 3Ф2Н6П, известная под названием трехфазной мостовой схемы (схема Ларионова). В этой схеме также имеются две коммутационные группы I и II, соединенные последовательно. Выходное напряжение преобразователя равно сумме выходных напряжений обеих коммутационных групп. Управляемые преобразователи без шунтирующих диодов могут работать и в инверторном режиме.

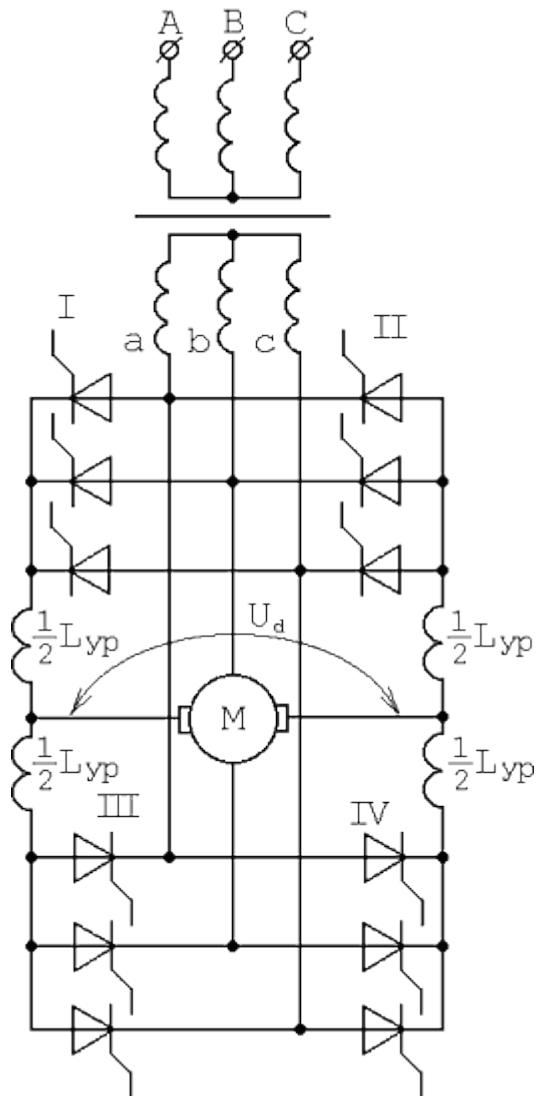


Рис.7. Схема двух встречно-параллельно соединенных преобразователей, обеспечивающая работу двигателя в четырех квадрантах

На рис.7 показана схема, часто применяемая в электроприводе. Две последовательно соединенные коммутационные группы соединяются встречно-параллельно через уравнительные реакторы $\frac{1}{2}L_{up}$. Таким способом на стороне постоянного тока может быть получено напряжение U_d любой полярности и при любом направлении тока. Для правильной работы схемы необходимо, чтобы по контуру, составленному из двух преобразователей, не проходил слишком большой постоянный ток, который мог бы вызвать повреждение оборудования (так называемый уравнительный ток). Уравнительный ток не может быть отрегулирован посредством пофазного управления преобразователями. Схема пригодна также и для получения напряжения переменной частоты посредством периодического изменения углов включения вентиляй преобразователей.

Замечание. Представленный здесь принцип (рис.7) может быть применен также к преобразователям с другими схемами соединений: это ведет к возникновению значительного числа дополнительных вариантов.

3. Трехфазные (многофазные)

Схемы триисторных реверсивных двухполупериодных преобразователей с питанием от однофазной сети (1Ф2Н2П)

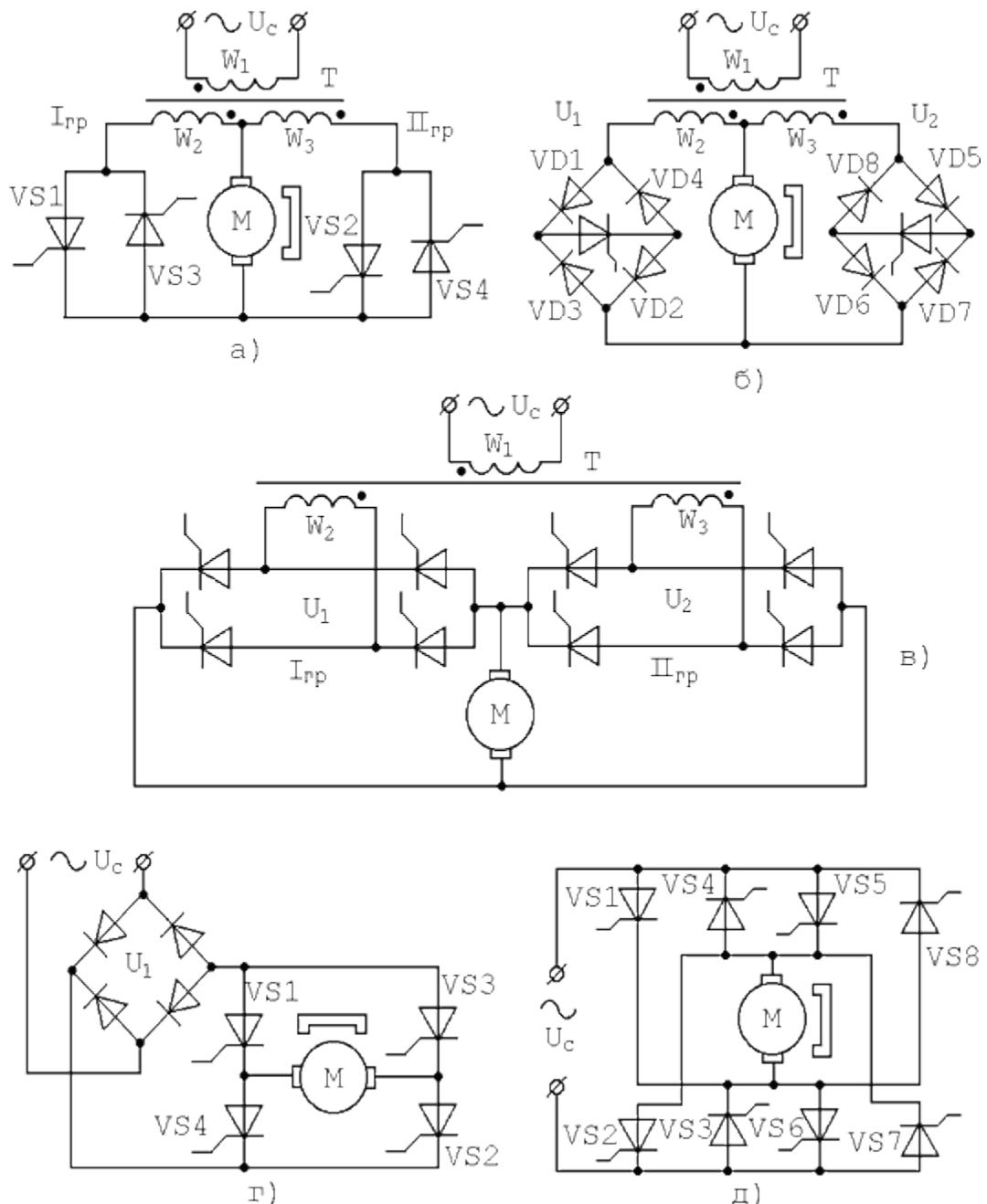


Рис.8. Реверсивные однофазные системы электропривода: а, б, в – преобразователи с трехобмоточным согласующим трансформатором; г, д – преобразователи прямого включения в сеть

На рис.8,а показана схема, построенная по дифференциальному принципу и содержащая четыре тиристора $VS1 - VS4$. При одном направлении тока в нагрузке в один полупериод напряжения питания открыт тиристор $VS1$, а в другой полупериод – тиристор $VS2$, тиристоры $VS3$ и $VS4$ закрыты. При реверсе состояние тиристоров меняется на противоположное. В данной схеме напряжение, наводимое во вторичной обмотке трансформатора, полностью прикладывается к закрытым тиристорам.

Отличительной особенностью схемы на рис.8,б является наличие лишь двух тиристоров, что значительно упрощает схему управления тиристорами. Оба тиристора в этой схеме включены в диагональ мостов U_1 и U_2 , составленных из диодов. В этой схеме тиристоры защищены от воздействия обратного напряжения диодами выпрямителя. При одном направлении тока в нагрузке в первый полупериод напряжения открыт тиристор $VS1$, и ток замыкается по цепи $W_2 - VD1 - VS1 - VD2 - M - W_2$. Во второй полупериод

напряжения питания открыт тиристор VS_2 и ток замыкается по цепи $W_3 - VD_5 - VS_2 - VD_6 - M - W_3$. При другом направлении тока в нагрузке цепь состоит из $W_3 - M - VD_7 - VS_2 - VD_8 - W_3$ и $W_2 - M - VD_3 - VS_1 - VD_4 - W_2$ соответственно.

В схеме на рис.8,в направление тока в нагрузке обеспечивается своим индивидуальным мостовым выпрямителем U_1 и U_2 . В данной схеме не требуются дополнительные меры по закрытию тиристоров, поэтому она является **универсальной**.

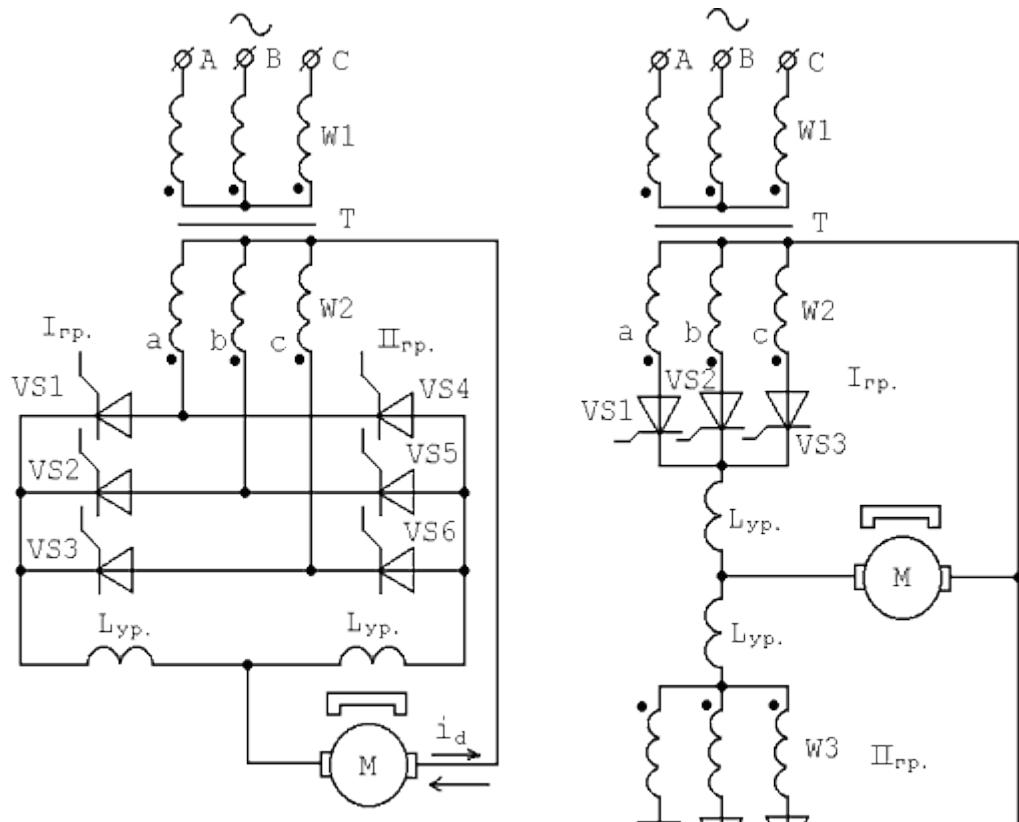
Для схемы рис.8,г одному направлению тока в нагрузке соответствует открытое состояние тиристоров VS_1 и VS_2 , образующих одно плечо. Для смены направления тока в нагрузке состояние плеч необходимо изменить на обратное.

Тиристорный преобразователь, показанный на рис.8,д, имеет восемь тиристоров и по системе управления эквивалентен тиристорному преобразователю на рис.8,в. При одном направлении тока в нагрузке открыты тиристоры VS_1 и VS_2 в один полупериод сетевого напряжения, и VS_3 , VS_4 – в другой полупериод, при реверсе соответственно VS_5 и VS_6 , VS_7 и VS_8 .

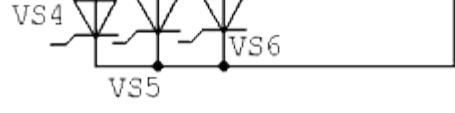
Во всех схемах реверсивных тиристорных электроприводов при работе одной группы тиристоров в выпрямительном режиме другая группа находится в готовности к инверторному режиму. Применяются два основных метода управления вентильными группами: метод совместного и метод раздельного управления. Совместное управление целесообразно применять для высокоточных приводов. Раздельное управление целесообразно применять в тех случаях, когда допустимо «мертвое» время порядка 5×10^{-3} с.

4. Схемы тиристорных реверсивных трехфазных нулевых преобразователей

Для реверсивных быстродействующих регулируемых электроприводов постоянного тока используются **двухкомплектные** вентильные преобразователи, варианты которых приведены на рис.9, 10 [1,2].



а) 3Ф2Н3П



б) 3Ф2Н3П

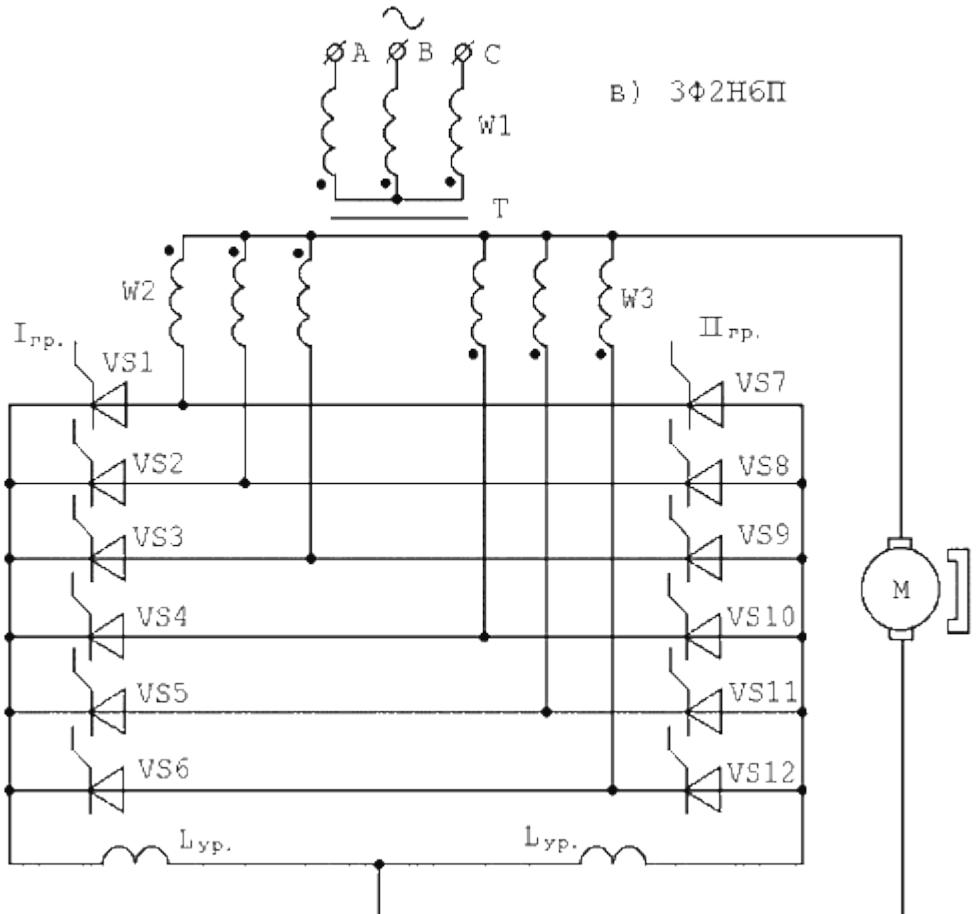


Рис.9. Реверсивные системы электропривода: а - нулевая схема преобразователя с одной вторичной обмоткой трансформатора; б, в – нулевые схемы преобразователей с двумя комплектами вторичных обмоток, б – трехпульсная, в – шестипульсная

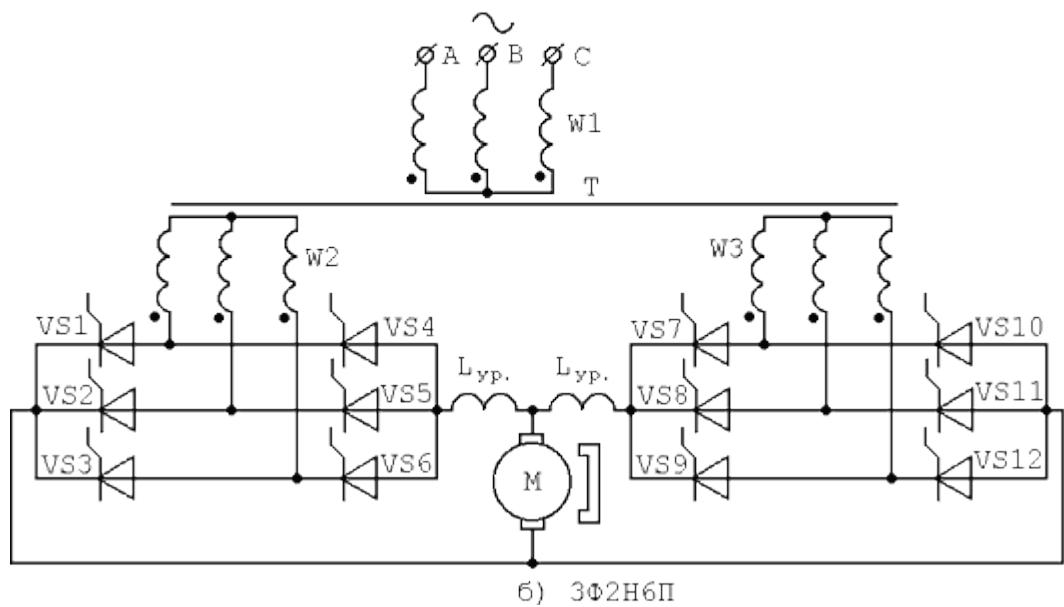
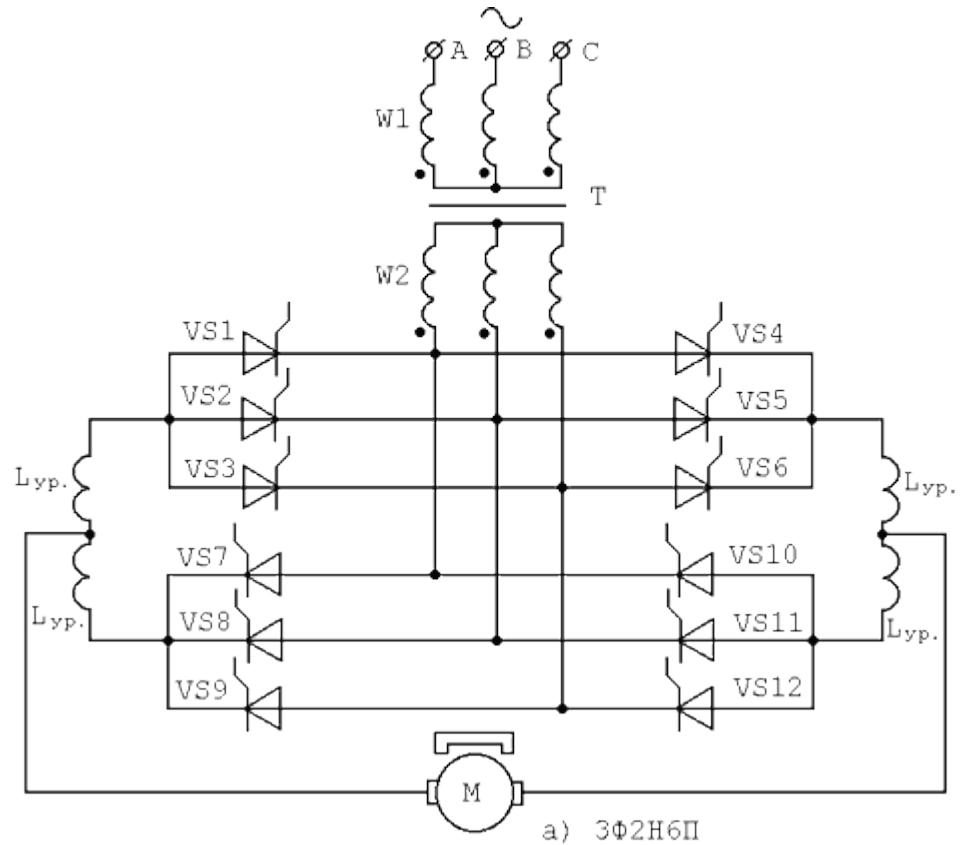


Рис.10. Схемы тиристорных реверсивных трехфазных мостовых преобразователей: а - встречно-параллельная схема мостового преобразователя (вместо трансформатора могут быть реакторы); б - схема преобразователя с двумя одинаковыми комплектами вторичных обмоток трансформатора

В схеме рис.9,а вторичные обмотки трансформатора T питают две группы тиристоров. При одном направлении тока в нагрузке группа тиристоров, например тиристоры $VS1 - VS3$, работает в выпрямительном режиме, а другая группа - тиристоры $VS4 - VS6$ – в

инверторном режиме. При необходимости изменения направления тока в нагрузке нужно изменить режим работы каждой группы.

Отличительной чертой реверсивного преобразователя, показанного на рис.9,б, является наличие двух групп вторичных обмоток вентильного трансформатора T . В этом преобразователе так же, как и в предыдущем, одна группа тиристоров работает в выпрямительном режиме, а другая – в инверторном.

Отличительной чертой реверсивного преобразователя на рис.9,в является увеличение числа пульсаций за счет специального включения вторичных обмоток трансформатора T .

На рис.10,а представлена встречно-параллельная схема трехфазного преобразователя, обеспечивающего работу привода постоянного тока в четырех квадрантах. Часто эту схему применяют без трансформатора на входе или с одним трансформатором на несколько преобразователей.

Отличительной чертой реверсивного преобразователя на рис.10,б является наличие двух групп вторичных обмоток W_2 и W_3 вентильного трансформатора T .

Между двумя группами тиристоров в рассмотренных реверсивных схемах под действием разности мгновенных значений напряжения может протекать ток, минуя цепь нагрузки, который называют **уравнительным током**. Уравнительный ток создает дополнительные потери в тиристорах и обмотках трансформатора и, в некоторых случаях при переходных режимах может вывести преобразователь из строя. Для ограничения уравнительного тока включаются дополнительные уравнительные дроссели L_{up} .

Для уменьшения пульсаций выпрямленного тока, улучшения динамических и энергетических характеристик находят большое распространение многофазные преобразователи. Увеличение фазности выпрямления достигается посредством последовательного включения двух и более трехфазных мостовых преобразователей со сдвинутыми по фазе анодными характеристиками.

1. 3 Лекция №3(2 часа).

Тема: «Сглаживающие фильтры»

1.3.1 Вопросы лекции:

1. Порядок гармоник напряжения на выходе выпрямителей.
2. Пути снижения гармоник в выпрямленном напряжении.
3. Коэффициент сглаживания и оптимальное соотношение элементов в Г- образном фильтре.
4. Многозвенные сглаживающие фильтры.

1.3.2 Краткое содержание вопросов:

1.Порядок гармоник напряжения на выходе выпрямителей. Однополупериодная схема выпрямления

Рассмотрим простейшую схему выпрямления тока.

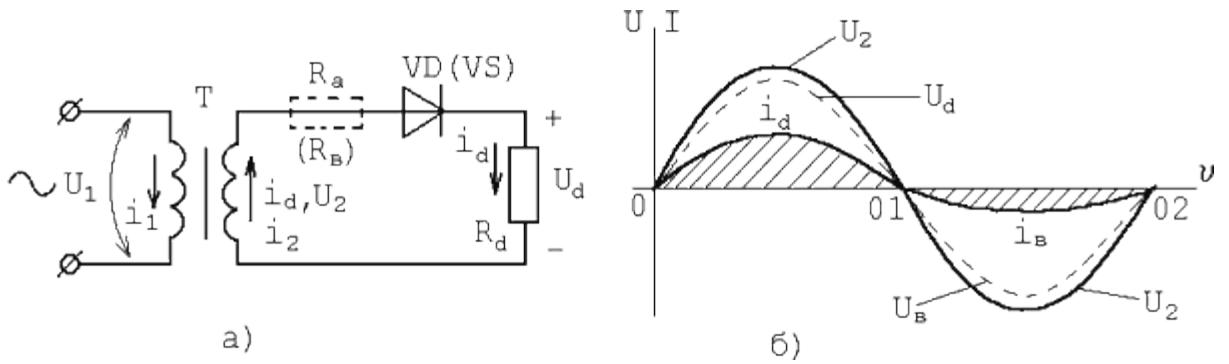


Рис.1. Однополупериодная схема выпрямления (а) и кривые токов и напряжений (б)

В промежутке времени (0-01) к вентилю VD подводится положительное напряжение и через вентиль протекает ток прямого направления. Этот промежуток называется проводящим полупериодом, а ток i_d - прямым током (рис.1).

В промежутке (01-02) разность потенциалов между анодом и катодом вентиля отрицательна, и через вентиль протекает незначительный ток i_e . Промежуток (01-02) называется непроводящим полупериодом, а ток i_e – обратным током.

Обозначим через R_a сопротивление вентиля в проводящем полупериоде, а через R_e – сопротивление вентиля в непроводящем полупериоде. В промежутке (0-01) напряжение вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = i_d R_a + i_d R_d ,$$

где

$$i_d R_a = \Delta U_a$$

- падение напряжения в вентиле;

$$i_d R_d = U_d$$

- выпрямленное напряжение на зажимах приемника энергии.

В промежутке (01-02) напряжение вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = i_e R_e + i_e R_d = U_e + i_e R_d ,$$

где U_e - обратное напряжение на вентиле.

Для большинства типов вентиляй обратный ток i_e и падение напряжения ΔU_a незначительны и ими пренебрегают, тогда в проводящем полупериоде

$$U_2 = i_d R_d = U_d ,$$

а в непроводящем полупериоде

$$U_2 = U_e .$$

В любой вентильной схеме выпрямленный ток i_d имеет пульсирующий характер и наряду с постоянной составляющей I_d содержит переменную составляющую \tilde{i}_d . Переменная составляющая \tilde{i}_d представляет сумму высших гармоник выпрямленного тока. Аналогично, выпрямленное напряжение U_d содержит постоянную E_d и переменную \tilde{U}_d составляющие.

Для схемы рис.1 примем следующие обозначения:

$$U_1, U_2, i_1, i_2$$

– мгновенные значения напряжений и токов первичных и вторичных обмоток трансформатора.

Мгновенное значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = \sqrt{2} E_2 \sin \omega t = \sqrt{2} E_2 \sin \psi \quad (1)$$

где E_1 и E_2 – действующие значения напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора, I_1 и I_2 – действующие значения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Кривые выпрямленного тока и напряжения представляют собой полусинусоиды (рис.2), поэтому схема называется однополупериодной.

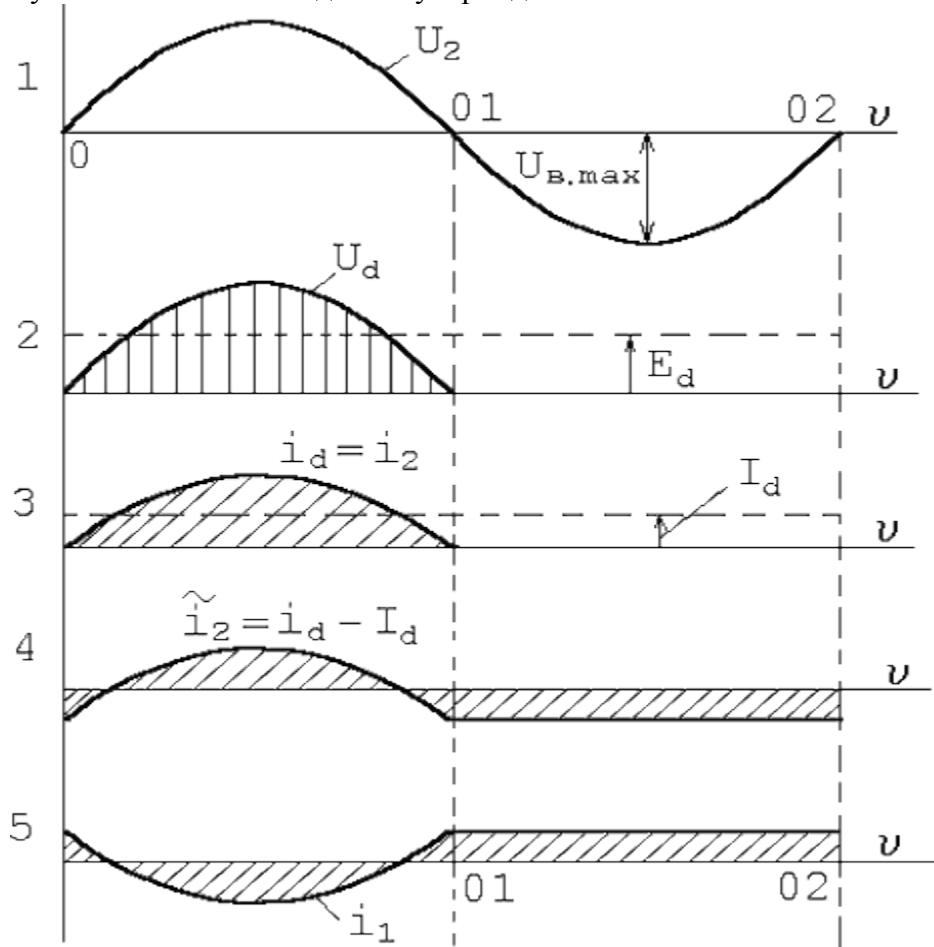


Рис.2. Кривые токов и напряжений в схеме рис.1

Мгновенное значение выпрямленного тока

$$i_d = i_2 = \frac{U_d}{R_d} = \frac{\sqrt{2}E_2}{R_d} \sin \psi \quad (2)$$

В первом полупериоде

$$\begin{aligned} U_d &= U_2 = \sqrt{2}E_2 \sin \psi \\ I_2 &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_2^2(\psi) d\psi} = \frac{\pi}{2} I_d; \\ i_1 &= -\frac{\tilde{i}_2}{K_{12}} = \frac{1}{K_{12}} (I_d - i_2); \\ i_2 &= I_d + \sum_K B_K \cos K\psi; \\ S_1 &= S_2 = E_1 I_1 = 2.69 E_d I_d. \end{aligned} \quad (3)$$

Замечание. При работе выпрямителя на нагрузку $R - L$ и в режиме непрерывного тока при работе на якорную цепь двигателя действительно предложенное выражение для средневыпрямленного напряжения: Средневыпрямленное напряжение преобразователя

E_d или постоянная составляющая выпрямленного напряжения – это отношение интеграла по кривой выпрямленного напряжения к периоду повторяемости.

$$E_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}E_2 \sin u du = \frac{\sqrt{2}E_2}{2\pi} [-\cos \pi - (-\cos 0)] = \frac{\sqrt{2}E_2}{\pi} \quad (4)$$

откуда

$$E_2 = 2.22 E_d = \frac{\pi}{\sqrt{2}} E_d \quad (5)$$

Так как обычно напряжение сетевое E_1 задано, коэффициент трансформации

$$K_{12} = K_T = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{W_1}{W_2}$$

Постоянная составляющая выпрямленного, или анодного, тока

$$I_d = \frac{E_d}{R_d} \quad (6)$$

Амплитуда тока через вентиль

$$I_{d\max} = \frac{\sqrt{2}E_2}{R_d} = \pi I_d \quad (7)$$

Амплитуда обратного напряжения

$$U_{e\max} = \sqrt{2}E_2 = \pi E_d \quad (8)$$

По полученным значениям

$$I_d, I_{d\max}, U_{e\max}$$

из каталога выбираем соответствующий вентиль с его эксплуатационными параметрами, заданными заводом-изготовителем (фирмой).

Сумма первичных и вторичных рабочих намагничивающих сил трансформатора в рассматриваемой схеме отличается от нуля, т.е. имеем магнитно-неуравновешенную систему. Постоянные намагничивающие силы создают постоянный магнитный поток, который может вызвать значительное насыщение магнитной системы, т.е. увеличение тока холостого хода, действующего значения первичного тока и, соответственно, расчетной мощности. Во избежание этого нежелательного явления магнитную систему трансформатора рассчитывают с учетом постоянной составляющей потока.

Увеличенная расчетная мощность трансформатора и наличие значительных высших гармоник в выпрямленном токе ограничивают широкое распространение рассматриваемой вентильной схемы [1,2,3,4].

Пути снижения гармоник в выпрямленном напряжении.

Двухполупериодные схемы выпрямления однофазного тока

Вентильные схемы с нулевым выводом характеризуются тем, что токи во вторичных обмотках имеют одно направление и поэтому содержат постоянную и переменную составляющие. В зависимости от наличия броневой или стержневой магнитной системы для полной компенсации намагничивающих сил трансформатора обмотки следует располагать по-разному.

В дальнейшем будем рассматривать однофазную двухполупериодную однотактную схему, представленную на рис.3,а, при этом подразумевается, что в схемах рис.3,а и рис.3,б электромагнитные процессы протекают одинаково, т.е. обе схемы магнитно уравновешены.

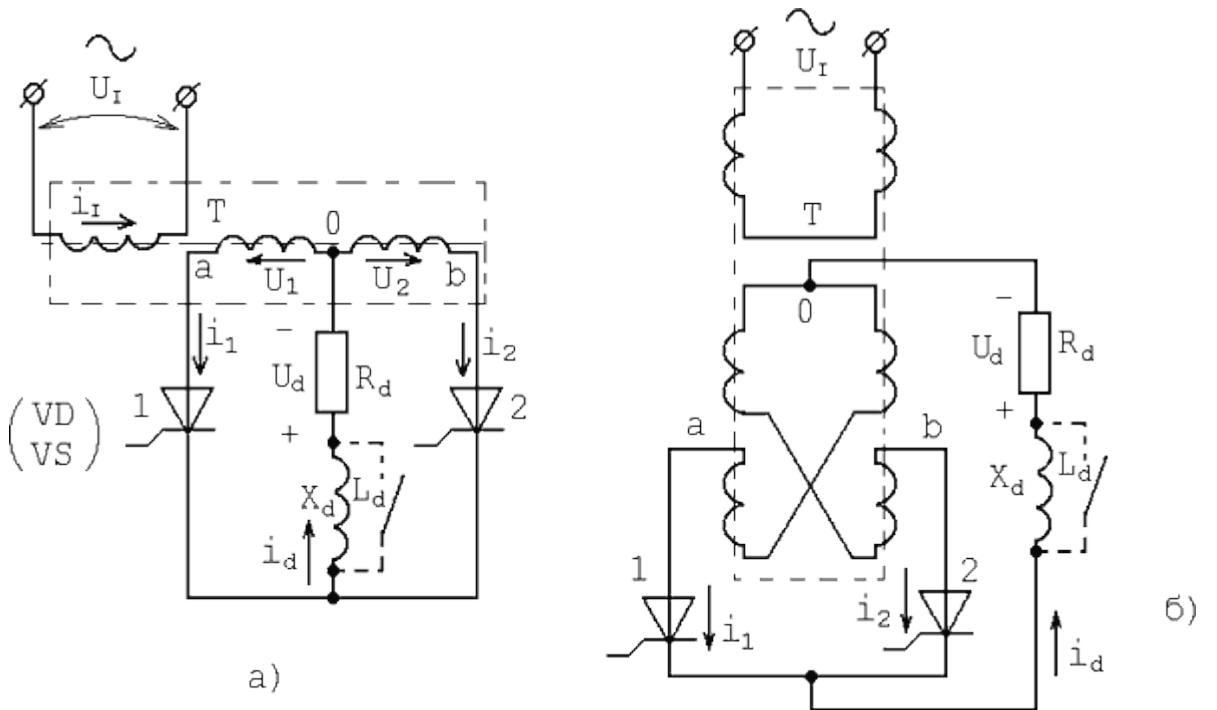


Рис.3. Двухполупериодная однотактная вентильная схема: а – с броневой магнитной системой; б – со стержневой магнитной системой

Вторичная обмотка трансформатора имеет секции 0 a и 0 b с напряжениями U_1 и U_2 , сдвинутыми по фазе на 180° .

Для напряжений секций 0 a и 0 b трансформатора имеем

$$U_1 = -U_2 = \sqrt{2}E_2 \sin \psi,$$

где E_2 – действующее значение напряжения одной секции вторичной обмотки трансформатора.

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения

$$E_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}E_2 \sin \psi d\psi = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_2 (-\cos \pi - (-\cos 0)) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 = 0.9E_2 \quad (9)$$

Действующие значения напряжения через коэффициент схемы

$$E_2 = 1.11E_{d1}; \quad E_I = K_{12} \times 1.11E_d; \quad K_{12} = \frac{E_I}{E_2} \quad (10)$$

Постоянная составляющая выпрямленного тока

$$I_d = \frac{E_d}{R_d},$$

а постоянная составляющая тока через один вентиль

$$I_a = 0.5I_d \quad (11)$$

Амплитуда тока вентиля

$$I_{a\max} = I_{d\max} = \frac{\sqrt{2}E_2}{R_d} = \frac{\pi}{2} I_d = \pi I_a \quad (12)$$

Когда вентиль 1 закрыт, на его катод с помощью токопроводящего вентиля 2 подается напряжение U_2 .

Поэтому обратное напряжение на вентиле

$$U_e = U_1 - (U_2) = 2U_1,$$

$$U_2 = -U_1,$$

а его амплитуда

$$U_{\text{эмк}} = 2\sqrt{2}E_2 \quad (13)$$

Мгновенное значение первичного тока

$$i_I = \frac{1}{K_{12}}(i_1 - i_2) .$$

Так как ток i_1 меняется синусоидально, его действующее значение

$$I_I = \frac{1.11}{K_{12}} I_d \quad (14)$$

Мощность трансформатора

$$S_1 = E_I I_1 = 1.23 E_d I_d = S_2 \quad (15)$$

Параметры трансформатора и вентиляй несколько изменяются при работе выпрямителя на нагрузку $R_d - L_d$, когда $X_d \rightarrow \infty$.

Действующее значение тока вторичной обмотки

$$I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{2}} .$$

Действующее значение напряжения вторичной обмотки

$$U_2 = \frac{\pi}{4} U_d \quad (16)$$

тогда мощность трансформатора

$$S_2 = S_1 = 2U_2 I_2 = 1.11 U_d I_d \quad (17)$$

Амплитуда анодного тока вентиля $I_{\text{эмк}} = I_d$.

Остальные параметры вентиляй такие же, как и при $X_d = 0$.

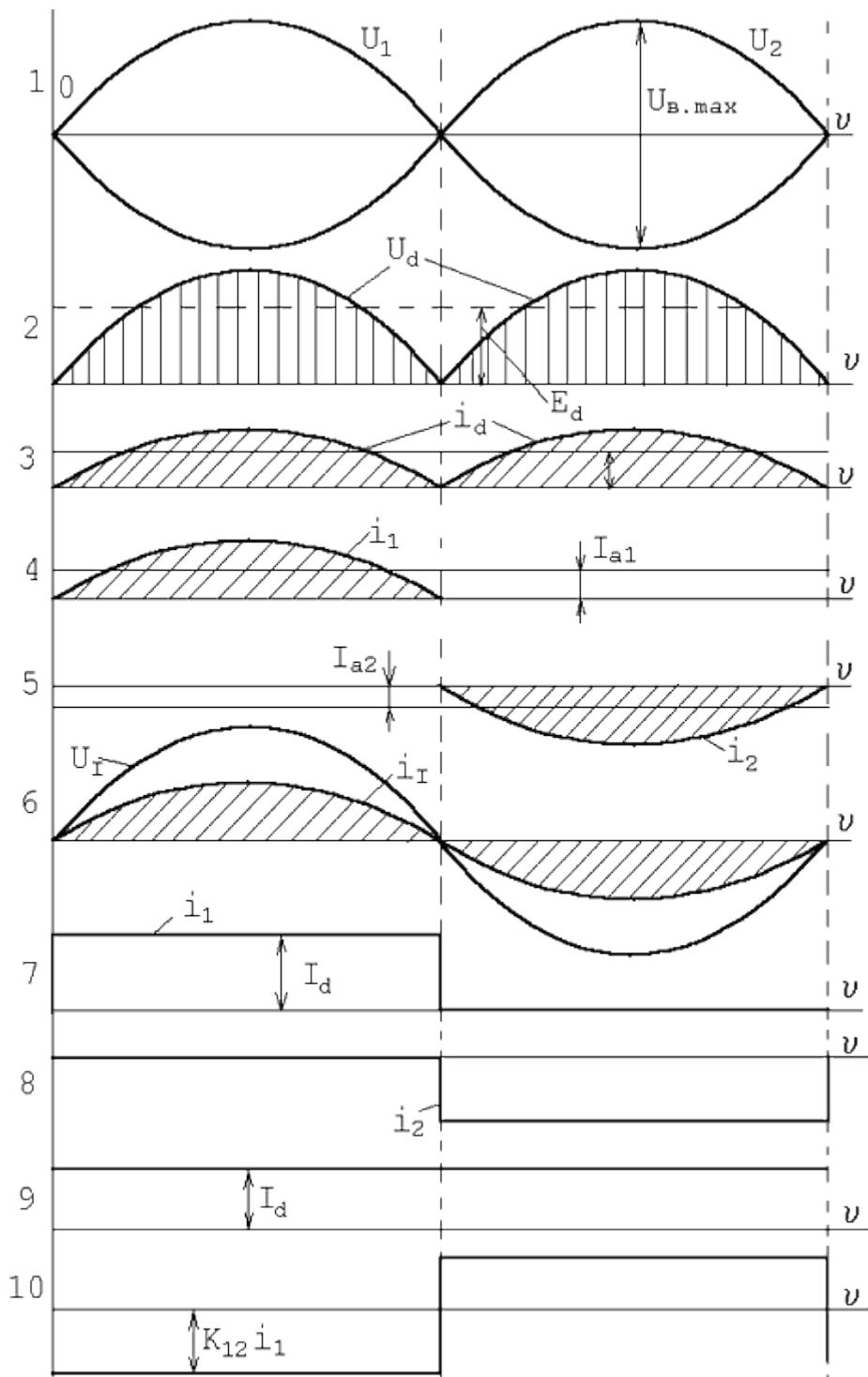


Рис.4. Кривые токов и напряжений двухполупериодной однотактной вентильной схемы: $X_d = 0$ – кривые токов и напряжений приведены на осах 2,3,4,5,6; $X_d \rightarrow \infty$ – 7,8,9,10

Коэффициент сглаживания и оптимальное соотношение элементов в Г-образном фильтре Работа схемы рис.3 на активную нагрузку при углах управления $\alpha > 0$

Пусть в момент времени $v = \alpha$, т.е. с задержкой на угол α относительно перехода напряжения U_1 через нуль (точка естественного включения вентиля 1), на управляющий электрод вентиля $VS1$ подается управляющий импульс (рис.5). Тогда вентиль $VS1$ включится и в нагрузке R_d начнет протекать ток i_1 под воздействием напряжения U_1 .

Начиная с этого же момента, к вентилю VS_2 будет приложено обратное напряжение U_{e_2} , равное разности напряжений

$$U_{12} = U_2 - U_1$$

двух вторичных полуобмоток.

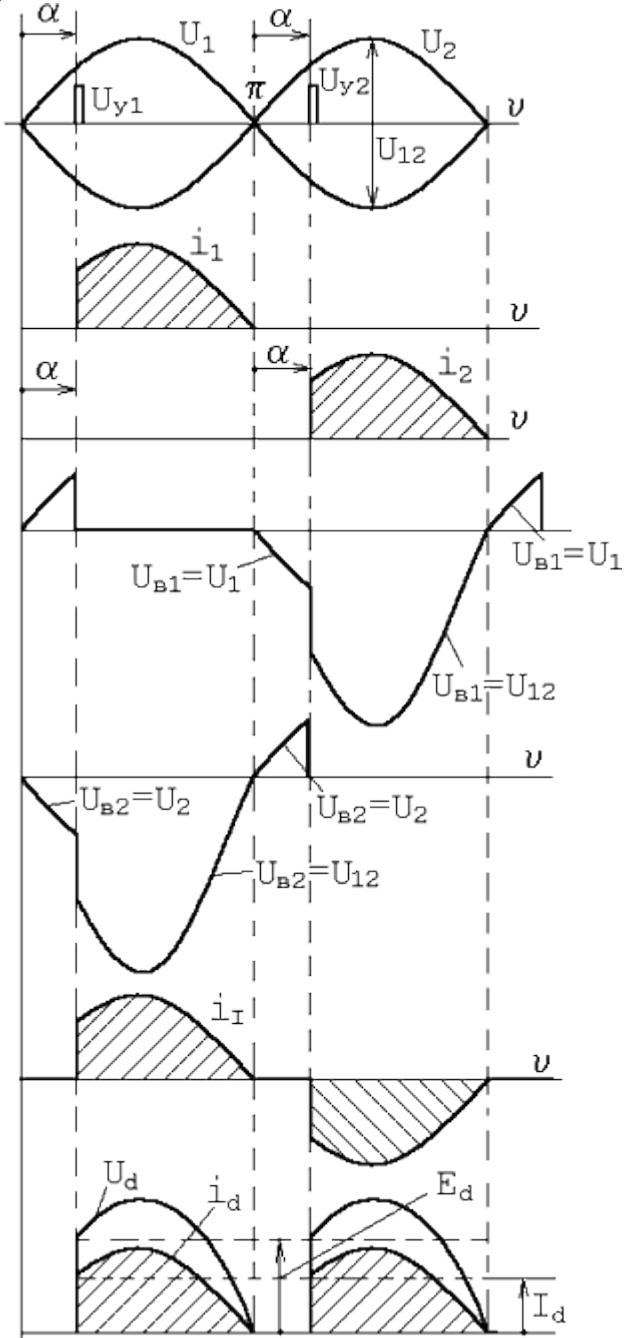


Рис.5. Диаграммы токов и напряжений однофазного выпрямителя при активной нагрузке и угле $\alpha > 0$

Вентиль VS_1 будет находиться в проводящем состоянии до тех пор, пока ток, протекающий через него, не спадет до нуля. Так как нагрузка активная и форма тока, проходящего через нагрузку, повторяет форму напряжения U_1 , то вентиль VS_1 включится в момент

$$v = \pi.$$

Поскольку через половину периода полярность напряжения на вторичной обмотке изменяется на противоположную, то при подаче управляющего импульса на вентиль VS_2 в момент

$$\nu = \pi + \alpha$$

он включится. Затем указанные процессы повторяются в каждом периоде.

Угол α , называемый углом управления или регулирования, отсчитывают относительно моментов естественного включения вентиляй ($\nu = 0, \pi, 2\pi, \dots$), соответствующих моментам включения неуправляемых вентиляй в схеме.

Из рис.5 видно, что с увеличением угла α среднее значение выходного напряжения E_d будет уменьшаться.

Аналитически эта зависимость будет выражаться следующей формулой:

$$E_d = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} E_2 \sin \nu d\nu = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_2 (1 + \cos \alpha) \quad (18)$$

Обозначив через E_{d0} найденное по выражению (9) среднее значение выпрямленного напряжения для неуправляемого выпрямителя ($\alpha = 0, E_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2$), получим среднее выпрямленное напряжение для активной нагрузки:

$$E_d = E_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (19)$$

Кривая 1 на рис.6 находится по выражению (19).

Среднее значение выпрямленного тока

$$I_d = \frac{E_d}{R_d} = \frac{\sqrt{2}(1 + \cos \alpha)}{\pi} \frac{E_2}{R_d} \quad (20)$$

В соответствии с (19) изменение угла α от 0 до π приводит к изменению среднего значения выходного напряжения от E_{d0} до нуля.

Зависимость среднего значения выходного напряжения от угла управления α называется регулировочной характеристикой вентильного преобразователя.

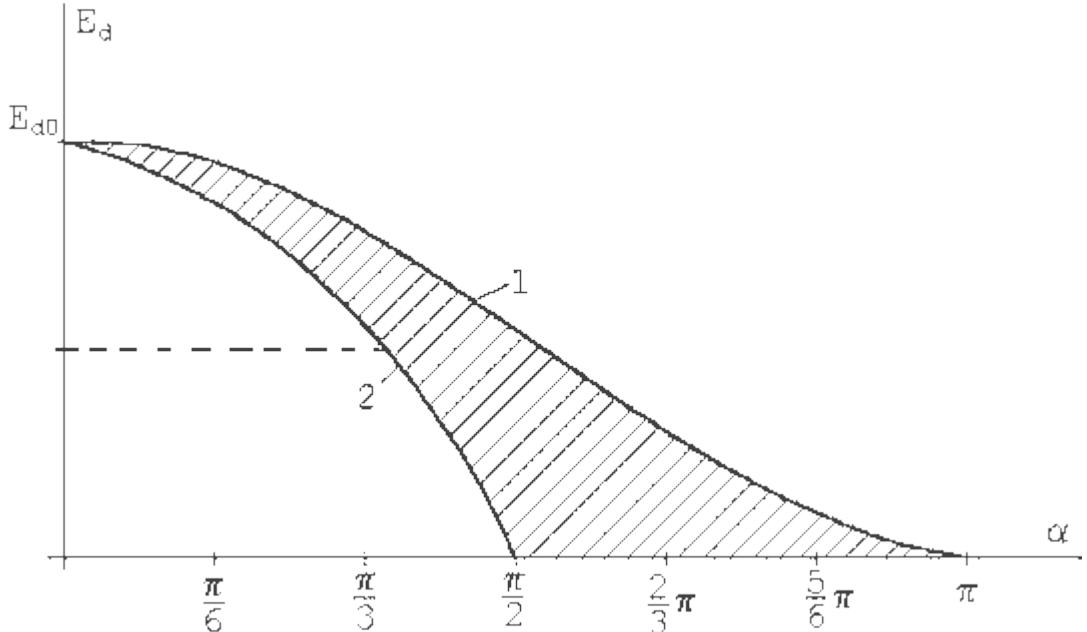


Рис.6. Регулировочные характеристики однофазного двухполупериодного выпрямителя: 1 – при активной нагрузке; 2 – при активно-индуктивной нагрузке

Заштрихованная область на рис.6 соответствует семейству регулировочных характеристик при различных значениях отношения

$$\omega L_d / R_d .$$

Если накопленной в индуктивности L_d энергии окажется достаточно, чтобы обеспечить протекание тока до очередной коммутации вентилем, то будет иметь место режим работы с непрерывным током i_d . При

$$\omega L_d = \infty$$

режим непрерывного тока будет существовать при любых углах α в диапазоне от 0 до $\pi/2$ (кривая 2 на рис.6).

1 Основные понятия математического моделирования;

Для создания автоматических СУ необходимо располагать математическим описанием процессов, происходящих как в самой системе, так и в ее элементах.

Под математическим описанием (математической моделью) подразумевается совокупность уравнений и граничных условий, описывающих зависимость выходных величин от входных в установившемся и переходном режимах. В связи с этим различают две группы математических моделей:

установившегося режима (модель статики);

переходного режима (модель динамики).

Математическая модель может быть получена аналитическим или экспериментальным методами. В последнем случае она может быть *детерминированной*, когда выходная величина однозначно определяется входной, или *статистической*, когда входные воздействия — случайные величины.

2 Математические модели установившегося и переходного режимов и методы их линеаризации;

Напомним, что математическая модель установившегося режима (иначе — статическая характеристика элемента или системы) отражает функциональную связь между входными и выходными величинами в установившемся состоянии, а математическая модель переходного режима (динамическая характеристика элемента или системы) описывает изменение выходной величины во времени в зависимости от изменения входной величины.

Как уравнения статики, так и уравнения динамики могут быть линейными или нелинейными, в последнем случае они подлежат линеаризации.

Линеаризация уравнений динамики. Итак, в общем случае при наличии одной выходной (y) и нескольких входных величин (x) динамика элемента (системы) описывается дифференциальным уравнением (для двух x_1 и x_2)

Линеаризация уравнений статики. Уравнения статики элементов (систем) автоматического управления, как правило, нелинейные и могут быть представлены в виде кривой или ломаной линии.

Линеаризация нелинейных статических характеристик осуществляется несколькими

способами.

Метод малых отклонений.
Метод касательной
Метод секущей.

3 Аналитический метод построения математической модели;

Дифференциальные уравнения простых элементов можно составить, используя закономерности протекающих в них физических явлений. Такими закономерностями могут быть: закон сохранения вещества (объект регулирования уровня, давления), закон сохранения энергии (объект регулирования температуры), законы электротехники и т. д. Уравнения статических и переходных режимов составляют на базе уравнений балансов вещества или энергии.

При составлении дифференциальных уравнений сложного объекта (или системы) он должен быть расченен на простейшие элементы, соединенные последовательно, для каждого из которых составляют математические модели статики и динамики. Дифференциальное уравнение объекта или системы в целом получают путем исключения промежуточных величин.

Чтобы получить такое простое уравнение, был сделан ряд допущений: процесс дросселирования газа считали изотермическим и не учитывали зависимость α от Δp .

4 Экспериментальные методы построения математической модели;

В практике синтеза автоматических СУ технологическими процессами сельскохозяйственного производства используют два метода экспериментального определения (идентификации) статических и динамических характеристик объектов автоматизации — активный и пассивный.

В первом случае испытательное воздействие стандартной формы задают искусственно, во втором — объект исследуют путем сопоставления выходных и входных величин в условиях нормальной эксплуатации объекта.

Выбор метода идентификации объекта определяется поставленной задачей, условиями опытов, эксплуатационными возмущениями и допустимыми по технологическим требованиям отклонениями исследуемых величин. Логика выбора метода будет рассмотрена далее.

Определение статических характеристик (активный метод).

Определение статических характеристик (пассивный метод).

Определение динамических характеристик.

1. 4 Лекция №4(2 часа).

Тема: «Транзисторные преобразователи постоянного напряжения.»

1.4.1 Вопросы лекции:

1. Процессы в магнитно-транзисторном преобразователе постоянного напряжения. Переменное напряжение и анализ их работы.
 2. Самовозбуждающиеся генераторы- инверторы.
 3. Условия самовозбуждения, наличие положительной обратной связи.
Условия повышающие самовозбуждение генераторов при отрицательной

температура окружающей среды

1.4.2 Краткое содержание вопросов:

1. Процессы в магнитно-транзисторном преобразователе постоянного напряжения. Переменное напряжение и анализ их работы. Неуправляемая схема выпрямления

Пусть имеем неуправляемую мостовую двухтактную схему рис.1.

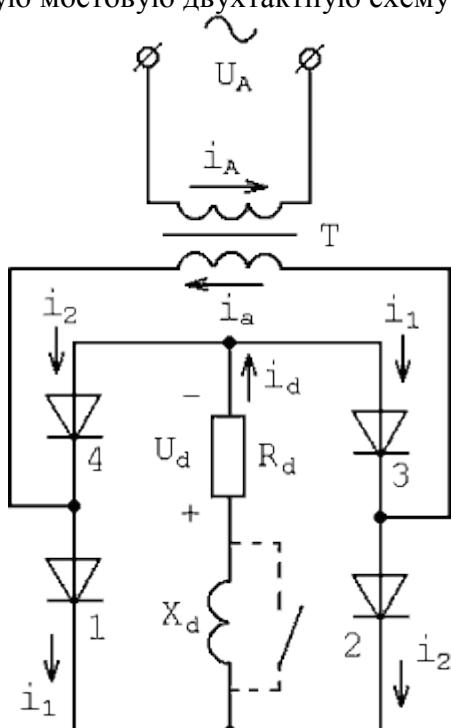


Рис.1. Двухполупериодная мостовая схема

Как видно из рис.1 вентили включаются так, что в первом полупериоде ток i_1 протекает через вентили 1 и 3, а во втором полупериоде ток i_2 протекает через вентили 2 и 4.

Форма кривых выпрямленного, фазных и анодных токов зависит от индуктивного сопротивления X_d . Кривые токов и напряжений при $X_d = 0$ приведены на осях 2,3,4,5 и 6 рис.2.

Аналогично рассмотренной ранее однотактной схеме имеем

$$E_d = 0.9 E_2, I_d = \frac{E_d}{R_d}.$$

Амплитуда обратного напряжения

$$U_e = \sqrt{2} E_2.$$

Ток вторичной обмотки трансформатора равен

$$i_a = i_1 - i_2.$$

Поэтому действующие значения токов обеих обмоток равны:

$$I_2 = 1.11 I_d, \quad I_1 = \frac{1.11}{K_{12}} I_d.$$

Мощность первичной и вторичной обмоток, а также типовая мощность трансформатора

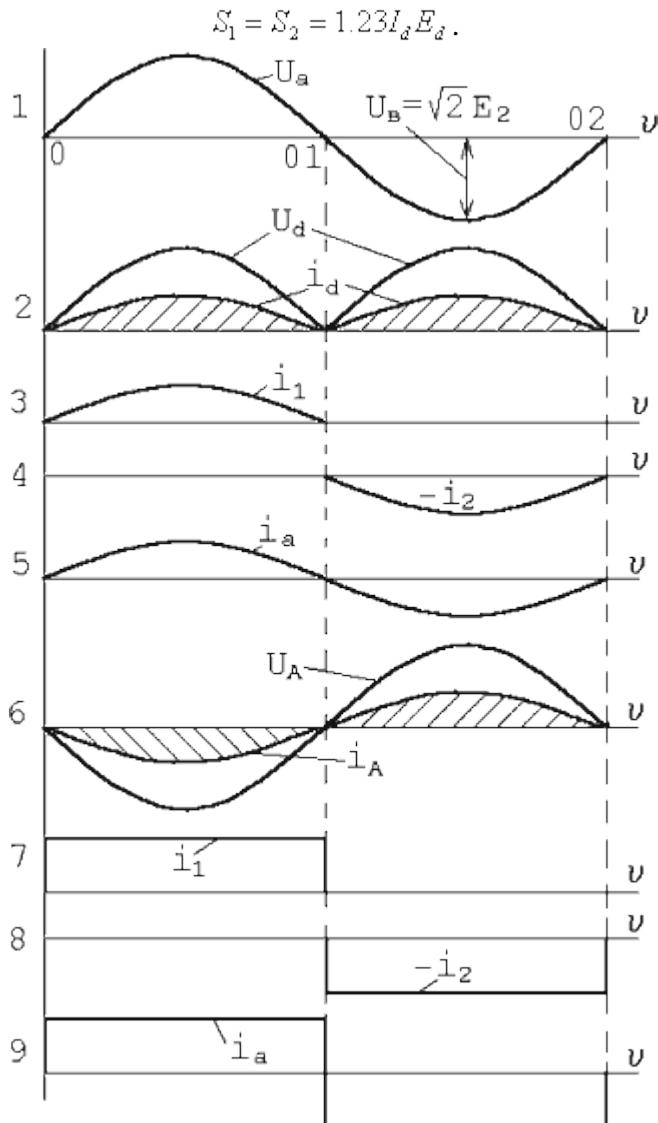


Рис.2. Кривые токов и напряжений двухтактной схемы

Так как кривые анодных токов представляют полусинусоиды, они содержат постоянные составляющие, первые гармоники и гармоники с четными порядковыми номерами

$$i_1 = I_{a1} + i_1' + i_2' + i_4' + i_6' + \dots$$

Кривые токов при

$$X_d \rightarrow \infty$$

приведены на осях 7, 8 и 9 рис.2.

Действующие значения токов первичной и вторичной обмоток при

$$X_d \rightarrow \infty$$

$$I_2 = K_{12} I_1 = I_d .$$

Мощность трансформатора

$$S_1 = S_2 = S = 1.11 P_d = 1.11 E_d I_d .$$

Амплитуда анодного тока вентиля

$$I_{a,\max} = I_d .$$

2. Самовозбуждающиеся генераторы- инверторы. Работа однофазной мостовой схемы с углом регулирования $\alpha \neq 0$

Диаграммы токов и напряжений на элементах будут такими же, как и для однофазного двухполупериодного выпрямителя со средней точкой.

Отличие заключается только в том, что амплитуда обратного напряжения на вентилях в мостовом выпрямителе будет в 2 раза меньше, чем в двухполупериодном нулевом выпрямителе.

При активной нагрузке работа схемы будет характеризоваться следующими основными соотношениями:

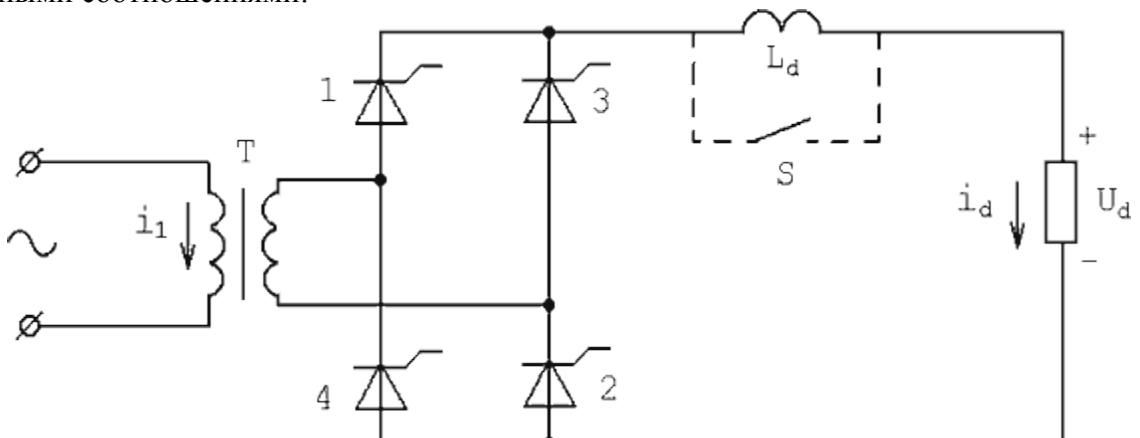


Рис.3. Однофазный мостовой выпрямитель

При активной нагрузке работа схемы будет характеризоваться следующими основными соотношениями:

- среднее значение выпрямленного напряжения

$$E_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 ;$$

- максимальное значение обратного напряжения на вентилях

$$U_{e,\max} = \sqrt{2} E_2 ;$$

- максимальное значение тока вентиля

$$I_{e,\max} = \frac{\sqrt{2} E_2}{R_d} ;$$

- среднее значение тока вентиля

$$I_{e,\bar{x}} = \frac{I_d}{2} ;$$

- действующие значения токов, проходящих через вентили и обмотки трансформатора

$$I_e = \frac{\pi}{4} I_d; \quad I_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d; \quad I_1 = \frac{\pi}{K_{12} 2\sqrt{2}} I_d.$$

Однофазная мостовая схема, работающая с углом $\alpha > 0$, имеет такие же формы токов и напряжений на ее элементах, как и в однофазном двухполупериодном выпрямителе со средней точкой.

Среднее значение выходного напряжения:

- при активной нагрузке (рис.2, кривая 1)

$$E_d = E_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

где E_{d0} – среднее значение выпрямленного напряжения на выходе схемы при угле $\alpha = 0$;

- при активно-индуктивной нагрузке, когда $\omega L_d \rightarrow \infty$ или имеет такое значение, что выпрямленный ток i_d непрерывен (рис.2, кривая 2),

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha.$$

Максимальные значения напряжений на вентилях:

- при активной нагрузке

$$U_{e,\max} = \sqrt{2} E_2, \quad U_{np} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_2 \sin \alpha;$$

- при активно-индуктивной нагрузке

$$U_{e,\max} = \sqrt{2} E_2, \quad U_{np} = \sqrt{2} E_2 \sin \alpha.$$

Максимальное значение токов вентиляй при активной нагрузке

$$I_{e,\max} = \sqrt{2} \frac{E_2}{R_d}.$$

3. Условия самовозбуждения, наличие положительной обратной связи.

Условия, повышающие самовозбуждение генераторов при отрицательной температуре окружающей среды

Активно-индуктивная нагрузка с углом открытия больше нуля, $\alpha > 0$

Наличие в цепи нагрузки индуктивности L_d существенно изменяет характер электромагнитных процессов в схеме. Так, после начала работы выпрямителя нарастание тока i_d в нагрузке будет происходить постепенно и тем медленнее, чем больше постоянная времени $T_d = L_d/R_d$.

При наличии индуктивности выпрямленный ток становится более сглаженным и не успевает доходить до нуля в моменты, когда выпрямленное напряжение становится равным нулю.

При увеличении индуктивности или частоты переменной составляющей выпрямленного напряжения пульсации выпрямленного тока уменьшаются, а при значениях ωT_d , равных 5-10 и более, расчетные соотношения в схеме будут незначительно отличаться от случая, когда $\omega T_d \rightarrow \infty$ или $\omega L_d \rightarrow \infty$ ($X_d \rightarrow \infty$). В этом случае можно считать, что вся переменная составляющая выпрямленного напряжения выделяется на индуктивности L_d , а постоянная – на сопротивлении R_d .

Несмотря на то, что управляющие импульсы поступают на вентили с задержкой на угол α относительно моментов их естественного включения ($v = 0, \pi, \dots$), длительность протекания тока через каждый вентиль остается равной половине периода напряжения питающей сети.

При $\omega L_d \rightarrow \infty$ ток в цепи нагрузки идеально слажен, а токи вентилей имеют прямоугольную форму, но в отличие от схемы, работающей с углом $\alpha = 0$, прямоугольники токов будут сдвинуты относительно выпрямленного напряжения на угол α . Сдвиг тока относительно напряжения на угол α приводит к появлению в выпрямленном напряжении U_d отрицательных участков, что вызывает снижение его среднего значения E_d (рис.4).

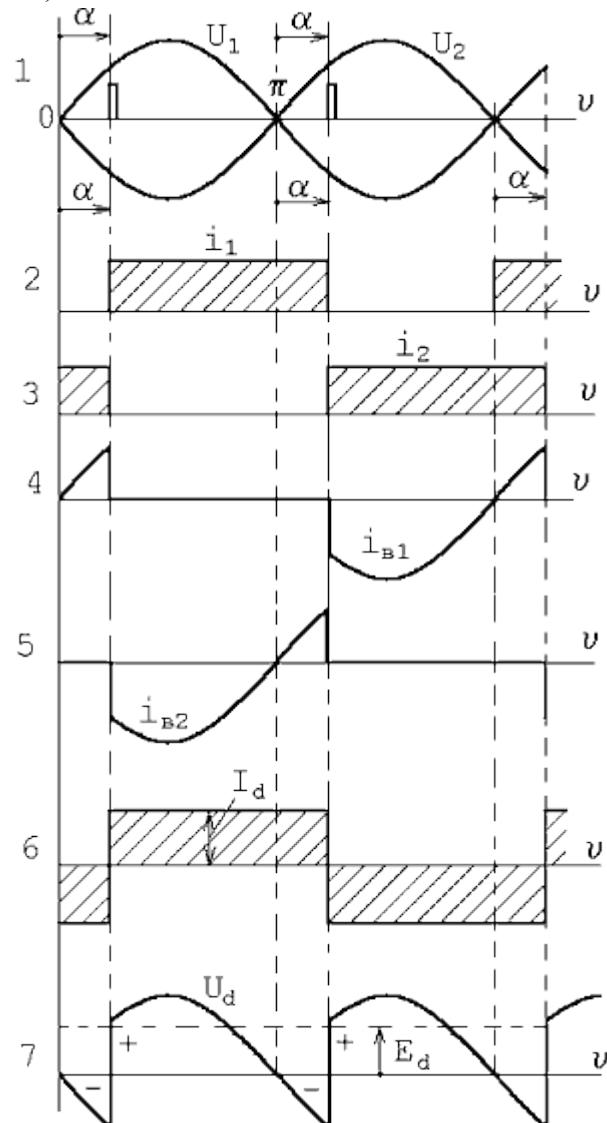


Рис.4. Диаграммы токов и напряжений двухполупериодного выпрямителя при активно-индуктивной нагрузке и $\alpha > 0$ ($\omega L_d \rightarrow \infty$)

Учитывая, что форма выпрямленного напряжения повторяется в интервале углов от α до $\pi + \alpha$, среднее значение выпрямленного напряжения можно найти по формуле

$$E_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} E_2 \sin \omega v dv = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_2 2 \cos \alpha = E_{d0} \cos \alpha \quad (1)$$

Согласно (1) среднее значение выпрямленного напряжения становится равным нулю при $\alpha = \pi/2$. В этом случае в выпрямленном напряжении площади положительного и

отрицательного участков равны между собой и постоянная составляющая отсутствует [1, 2].

Регулировочная характеристика для активно-индуктивной нагрузки показана на рис.5 кривая 2.

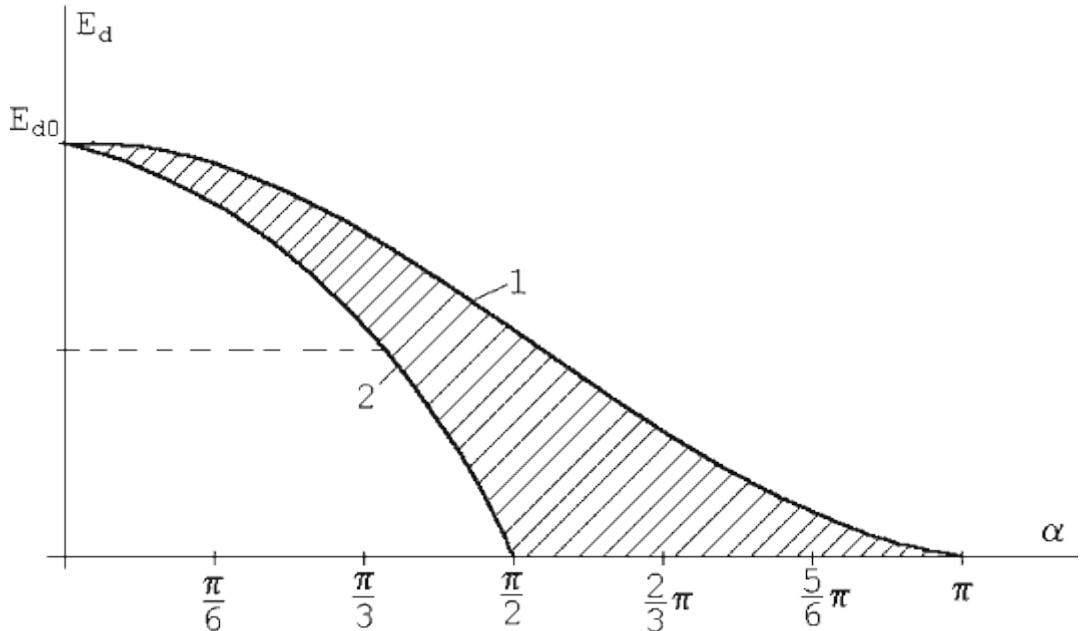


Рис.5. Регулировочные характеристики однофазного двухполупериодного выпрямителя: 1 – при активной нагрузке; 2 – при активно-индуктивной нагрузке

Если величина ωT_d невелика и такова, что энергии, запасенной в индуктивности L_d на интервале, когда $U_d > 0$, оказывается недостаточно для обеспечения протекания тока i_d в течение половины периода, то вентиль, проводящий этот ток, выключится раньше, чем будет подан отпирающий импульс на другой вентиль, т.е. раньше момента, определяемого углом α . Такой режим работы схемы при активно-индуктивной нагрузке называется **режимом с прерывистым выпрямленным током** (рис.6).

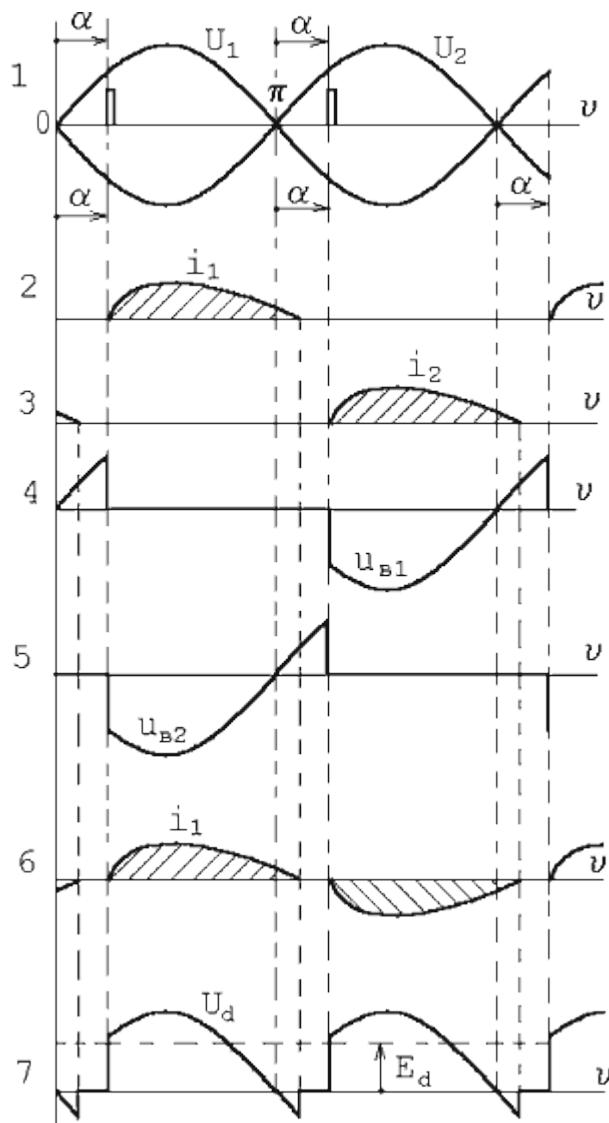


Рис.6. Диаграммы токов и напряжений двухполупериодного выпрямителя при режиме прерывистых токов

При одинаковых значениях угла α среднее значение выпрямленного напряжения в режиме с прерывистым током будет больше, чем в режиме с непрерывным током, благодаря уменьшению отрицательного участка в кривой выпрямленного напряжения, но меньше, чем при работе выпрямителя на активную нагрузку.

Поэтому в режимах с прерывистым током регулировочные характеристики будут находиться между кривыми 1 и 2 в заштрихованной области, указанной на рис.5.

Режим работы схемы, когда ток в вентилях спадает до нуля точно в момент включения очередного вентиля, называется **границным**.

Очевидно, что чем больше угол α , тем больше должна быть индуктивность L_d , чтобы обеспечить режим работы схемы с непрерывным током i_d . Индуктивность, обеспечивающая при заданных параметрах схемы граничный режим работы, называют **критической**.

При прерывистом токе и постоянной нагрузке трансформатор, вентили, коллектор работают в более тяжелом режиме, так как при одном и том же значении выпрямленного тока действующее значение токов в элементах схемы увеличивается. Поэтому в мощных выпрямителях, работающих с широким диапазоном изменения угла α , индуктивность L_d обычно выбирают из условия обеспечения непрерывности выпрямленного тока.

Граница перехода к непрерывному выпрямленному току зависит от соотношения

$$X_d/R_d,$$

характеризующегося углом

$$\psi = \arctg \frac{X_d}{R_d}.$$

Пока

$$\alpha \leq \psi,$$

режим непрерывен, а при

$$\alpha > \psi$$

ток i_d имеет прерывистый характер.

В режиме непрерывного тока постоянная составляющая выпрямленного напряжения

$$E_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} E_2 \sin \omega d\psi = E_{d0} \cos \alpha.$$

Ток вентиля в прерывистом режиме

$$i_1 = \sqrt{2} \frac{E_2}{\sqrt{R_d^2 + X_d^2}} [\sin(\psi - \psi) - \sin(\alpha - \psi) e^{-(\psi - \alpha) \operatorname{tg} \psi}].$$

Из последнего выражения видно, что когда $\alpha = \psi$, ток $i_1 = 0$, т.е. на границе перехода от прерывистого к непрерывному режиму угол $\alpha = \psi$ [1, 2].

Обозначив угол протекания тока через вентиль равным λ и подставляя в выражение

$$\nu = \alpha + \lambda,$$

получим уравнение

$$\sin(\alpha + \lambda - \psi) - \sin(\alpha - \psi) e^{-\lambda \operatorname{tg} \psi} = 0,$$

дающее зависимость между углами λ и α .

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения

$$E_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} E_2 \sin \omega d\psi = \frac{E_{d0}}{2} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \lambda)].$$

Постоянная составляющая выпрямленного тока в обоих случаях

$$I_d = \frac{E_d}{R_d}.$$

1. 5 Лекция №5(2 часа).

Тема: «Бестрансформаторные преобразователи постоянного напряжения.»

1.5.1 Вопросы лекции:

- Основные принципы построения бестрансформаторных преобразователей постоянного напряжения.
- Пути повышения частоты преобразования и снижения потерь энергии в трансформаторах. Снижение тока базы насыщения транзисторов и применение корректирующих элементов. Время восстановления управляющих свойств выпрямительных диодов, его влияние на ограничение частоты инвертирования.

1.5.2 Краткое содержание вопросов:

- Основные принципы построения бестрансформаторных преобразователей постоянного напряжения. Выпрямители с активно-индуктивной нагрузкой

1. Процессы в схемах с углом $\alpha > 0$

В однофазной мостовой схеме расчетная мощность трансформатора имеет те же параметры, что и мощность в однофазной двухполупериодной со средней точкой

$$S_1 = S_2 = E_1 I_1 = 1.23 E_d I_d.$$

На рис.1 изображено синусоидальное напряжение источника и напряжение на нагрузке U_d для случая отпирания управляемых вентилей в момент $\alpha \neq 0$.

Примем индуктивность настолько большой, что ток нагрузки i до момента отпирания следующей пары вентилей не успевает пройти через нуль. Когда ток через нуль не проходит, он нарастает от интервала к интервалу и устанавливается в течение ряда периодов.

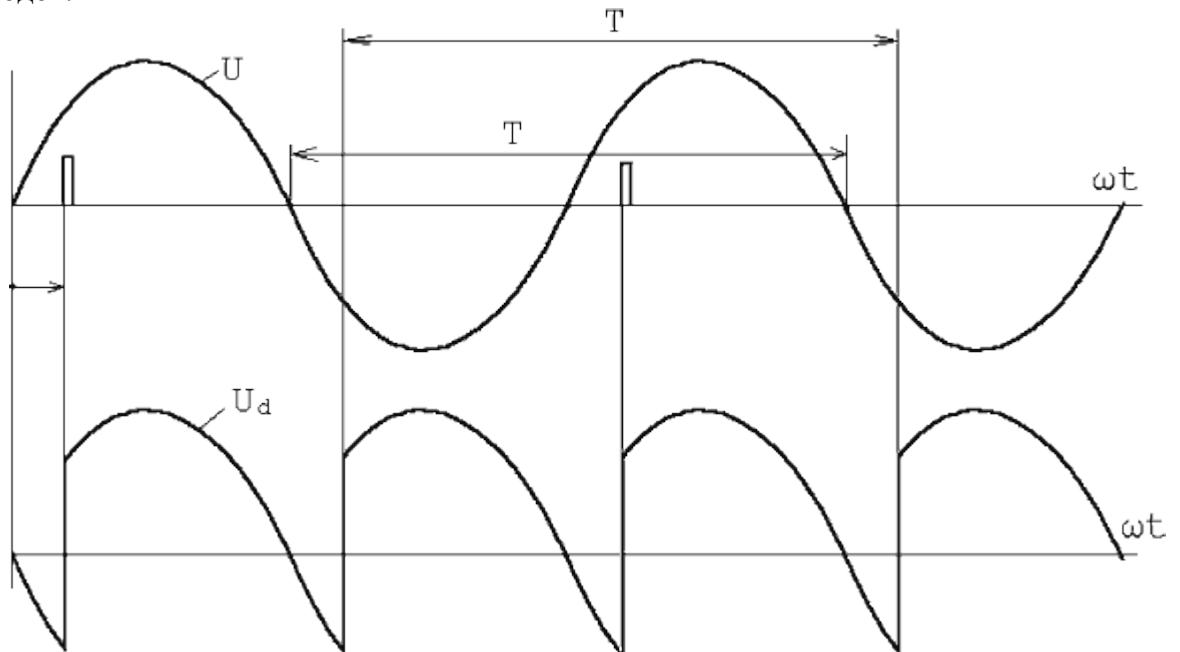


Рис.1. Кривые напряжений

Управляемые вентили в выпрямителе действуют как периодические ключи, которые от полупериода к полупериоду переключают напряжение источника. С учетом их действия напряжение на нагрузке в течение n -го полупериода будет равно [1, 2]

$$u_n = (-1)^n U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

Произвольный момент времени может быть определен по соотношению

$$t = n \frac{T}{2} + t_1 \quad (2)$$

где величина t_1 изменяется от нуля до $\frac{T}{2} = \frac{\pi}{10}$.

Очевидно также, что

$$u_n = L \frac{di}{dt_1} + Ri \quad (3)$$

Из сопоставления выражений (2) и (3) вытекает соотношение

$$(-1)^n U_m \sin\left[\omega\left(n \frac{\pi}{10} + t_1\right) + \alpha\right] = L \frac{di}{dt_1} + Ri$$

или

$$(-1)^n U_m \sin(n\pi + \alpha + \omega t_1) = L \frac{di}{dt_1} + Ri.$$

Нетрудно видеть, что для любого целого числа n выполняется условие

$$(-1)^n U_m \sin(\pi n + \alpha + \omega t_1) = U_m \sin(\alpha + \omega t_1),$$

следовательно,

$$U_m \sin(\omega t_1 + \alpha) = L \frac{di}{dt_1} + Ri \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение (4) позволяет найти ток нагрузки внутри любого интервала.

Общий интеграл уравнения имеет вид

$$i = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t_1 + \alpha - \varphi) + A_n e^{-\beta t} \quad (5)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, $\beta = \frac{T}{2\tau}$, $\tau = \frac{L}{R}$; φ - угол сдвига фаз между током и напряжением нагрузки; $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$; A_n - постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий.

Предположим, что в начале n -го интервала ($t_1 = 0$) ток был равен $i[n]$. Из (5) следует, что

$$i[n] = \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) + A_n,$$

откуда

$$A_n = i[n] - \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi).$$

В конце этого интервала

$$\left(t_1 = \frac{\pi}{\omega} \right)$$

ток будет равен

$$i[n+1] = \frac{U_m}{Z} \sin(\pi + \alpha - \varphi) + A_n e^{-\beta \frac{\pi}{\omega}},$$

т.е.

$$i[n+1] = -\frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) + \left\{ i[n] - \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) \right\} e^{-\beta \frac{\pi}{\omega}} \quad (6)$$

или

$$i[n+1] = \frac{U_m}{Z} \sin(\varphi - \alpha) \left(1 + e^{-\beta \frac{\pi}{\omega}} \right) + e^{-\beta \frac{\pi}{\omega}} i[n] \quad (7)$$

Это уравнение представляет собой разностное уравнение 1-го порядка.

Рассматривая соотношение (7) как рекуррентную формулу, можно вычислить все значения тока $i[n]$.

Для упрощения введем следующие обозначения

$$\frac{U_m}{Z} \sin(\varphi - \alpha) \left(1 + e^{-\beta \frac{\pi}{\omega}} \right) = B, \quad e^{-\beta \frac{\pi}{\omega}} = q.$$

Тогда соотношение (7) можно переписать в виде

$$i[n+1] = B + q i[n].$$

Откуда при начальном условии $i[0] = 0$ получим

$$\begin{cases} i[1] = B, \\ i[2] = B + qB = B(1+q), \\ i[3] = B + qB(1+q) = B(1+q+q^2), \\ i[4] = B(1+q+q^2+q^3), \\ \dots \\ i[n] = B(1+q+q^2+q^3+\dots+q^{n-1}). \end{cases}$$

Последнее выражение представляет собой геометрическую прогрессию. Следовательно,

$$i[n] = B \frac{1-q^n}{1-q}.$$

Подставляя сюда значения B и q , окончательно получим выражение для тока в начале n -го интервала:

$$i[n] = \frac{U_m}{Z} \sin(\varphi - \alpha) \frac{1+e^{-\beta \frac{n}{\omega}}}{1-e^{-\beta \frac{n}{\omega}}} \left(1 - e^{-\beta \frac{n}{\omega}} \right).$$

Если $\beta \frac{\pi}{\omega} > 0$, то значение тока в начале любого интервала в установившемся режиме (при $n \rightarrow \infty$)

$$i[\infty] = \frac{U_m}{Z} \frac{1+e^{-\beta \frac{\pi}{\omega}}}{1-e^{-\beta \frac{\pi}{\omega}}} \sin(\varphi - \alpha).$$

Представленный разностный метод позволяет получить формулу, определяющую значения тока в любой момент времени для любого интервала в любой схеме выпрямления.

2. Пути повышения частоты преобразования и снижения потерь энергии в трансформаторах. Снижение тока базы насыщения транзисторов и применение Двухполупериодная мостовая вентильная схема с противо-ЭДС

Рассмотрим работу схемы для случая, когда приемник энергии имеет противо-ЭДС, а угол управления $\alpha = 0$.

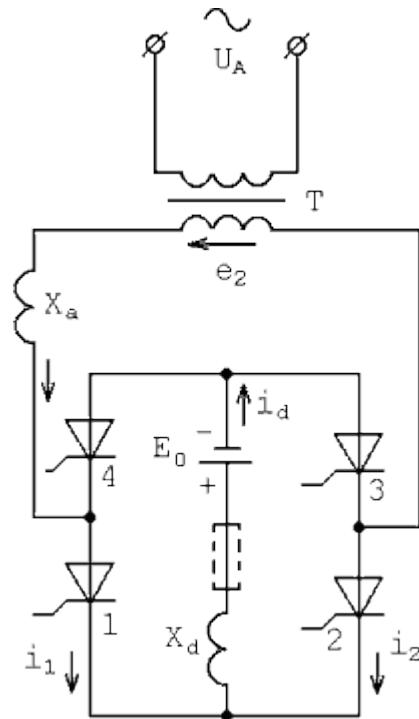


Рис.2. Вентильная мостовая схема с противо-ЭДС

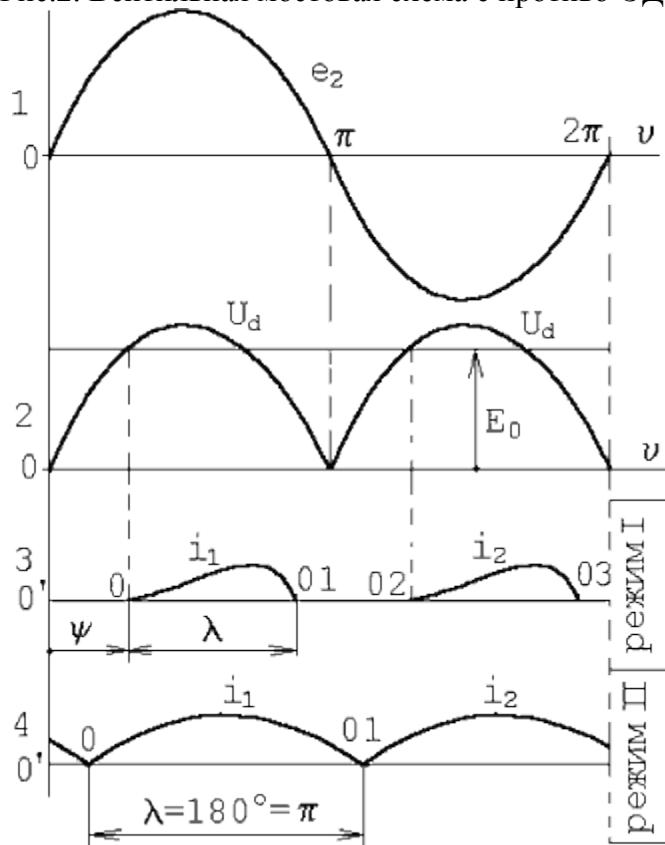


Рис.3. Кривые токов и напряжений двухтактной схемы

При конечном значении X_d моменты включения вентилей зависят от противо-ЭДС E_0 . Если $E_0 \geq \sqrt{2}E_2$, вентили не включаются, ток $i_d = 0$, а продолжительность прохождения тока через вентиль $\lambda = 0$. С уменьшением E_0 угол λ возрастает, и в пределе, при $E_0 = 0$ $\lambda_{\max} = 360^\circ$. В зависимости от угла λ имеем несколько режимов работы схемы. Кривые токов и напряжений приведены на рис.3.

В режиме I угол $0 < \lambda < 180^\circ$ и выпрямленный ток имеет прерывистый характер. В промежутке (0-01) включены вентили 1 и 3, а в промежутке (02-03) – вентили 2 и 4. Началом координатной системы считаем точку (0) – момент включения вентилей 1 и 3 и рассматриваем период (02=?).

Для промежутка (0-01) пишем уравнение

$$u_2 - X_d \frac{di_d}{d\psi} - E_0 = 0 \quad (8)$$

где u_2 – мгновенное значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Уравнение (8) можно представить в виде

$$\sqrt{2}E_2 \sin(\psi + \varphi) - X_a \frac{di_1}{d\psi} - X_d \frac{di_d}{d\psi} - E_0 = 0.$$

Так как в этом промежутке $i_1 = i_d$, получим

$$\sqrt{2}E_2 \sin(\psi + \varphi) - X_a(1+q) \frac{di_d}{d\psi} - E_0 = 0 \quad (9)$$

где $q = \frac{X_d}{X_a}$, X_a – приведенное к вторичной обмотке сопротивление трансформатора.

Из этого уравнения (9) определяем мгновенное значение выпрямленного тока

$$i_d = \frac{\sqrt{2}E_2}{X_a(1+q)} [\cos \varphi - \cos(\psi + \varphi)] - \frac{E_0 \psi}{X_a(1+q)} \quad (10)$$

Постоянная составляющая выпрямленного тока

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\lambda} i_d d\psi = \frac{\sqrt{2}E_2}{\pi X_a(1+q)} [\lambda \cos \varphi - \sin(\lambda + \varphi) + \sin \varphi] - \frac{E_0 \lambda^2}{2\pi X_a(1+q)}$$

В момент включения вентилей 1 и 3 напряжение вторичной обмотки трансформатора равно противо-ЭДС E_0 :

$$\begin{aligned} \sqrt{2}E_2 \sin \varphi &= E_0, \\ \sin \varphi &= \frac{E_0}{\sqrt{2}E_2} \end{aligned} \quad (11)$$

В момент выключения вентилей 1 и 3 угол $\psi = \lambda$, а ток $i_d = 0$, поэтому из (10) получим

$$\frac{\sqrt{2}E_2}{X_a(1+q)} [\cos \varphi - \cos(\lambda + \varphi)] = \frac{E_0 \lambda}{X_a(1+q)}$$

или

$$\cos \varphi - \cos(\lambda + \varphi) = \frac{E_0 \lambda}{X_a(1+q)} \quad (12)$$

Из уравнений (12) и (11) определяем

$$\varphi = \arctg \frac{1 - \cos \lambda}{\lambda - \sin \lambda}.$$

В конце режима I угол $\lambda = \pi$ и при $E_0 = 0$ соотношение $\omega L_\Sigma / R_d$ должно быть таким, чтобы выполнялось условие

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L_\Sigma}{R_d} = 32^\circ 40',$$

где $L_\Sigma = L_a + L_d$, $X_\Sigma = X_a + X_d = \omega L_a + \omega L_d$.

Замечание. Часто при расчетах мгновенных значений токов в схемах принимают за начальную величину $i_1(t_0) = 0$ и из выражений (5-7) находят постоянные интегрирования

A_n Такой подход приводит к неверному решению задачи распределения непрерывного тока в первых полупериодах. В этом случае необходимо выполнить расчеты в 5-6 полупериодах напряжения, каждый раз подставляя новое значение начальных условий. Количество расчетных полупериодов заканчивается тогда, когда мгновенное значение тока в начале полупериода будет равно току в конце полупериода.

Иногда в качестве начального значения тока берется его среднее значение в схеме с заданными параметрами. В этом случае количество расчетных полупериодов уменьшается.

1. 6 Лекция №6(2 часа).

Тема: «Преобразователи переменного напряжения с регулируемой частотой»

1.6.1 Вопросы лекции:

1. Принцип составления схем преобразователей постоянного напряжения с регулируемой частотой.
2. Структурные схемы преобразователей с регулируемой частотой.
3. Стабилизация частоты.
4. Принцип работы магнитно-транзисторных преобразователей постоянного напряжения с регулируемой частотой.
5. Преобразователи переменного напряжения с непосредственным изменением частоты регулирования.

1.6.2 Краткое содержание вопросов:

1. Принцип составления схем преобразователей постоянного напряжения с регулируемой частотой.

Трехфазная однотактная схема выпрямления тока (трехфазная схема со средней точкой, трехфазная нулевая трехпульсная схема)

Схема (рис.1) состоит из трансформатора, трех вентилей и приемника энергии R_d . Для уменьшения высших гармоник выпрямленного тока последовательно с сопротивлением R_d включен реактор с индуктивным сопротивлением X_d (L_d) [1,2].

Обычно первичную обмотку трансформатора соединяют треугольником, а вторичную – звездой или первичную – звездой, а вторичную – зигзагом (Δ/Z , Y/Z).

Пусть трансформатор соединен по схеме Δ/Z .

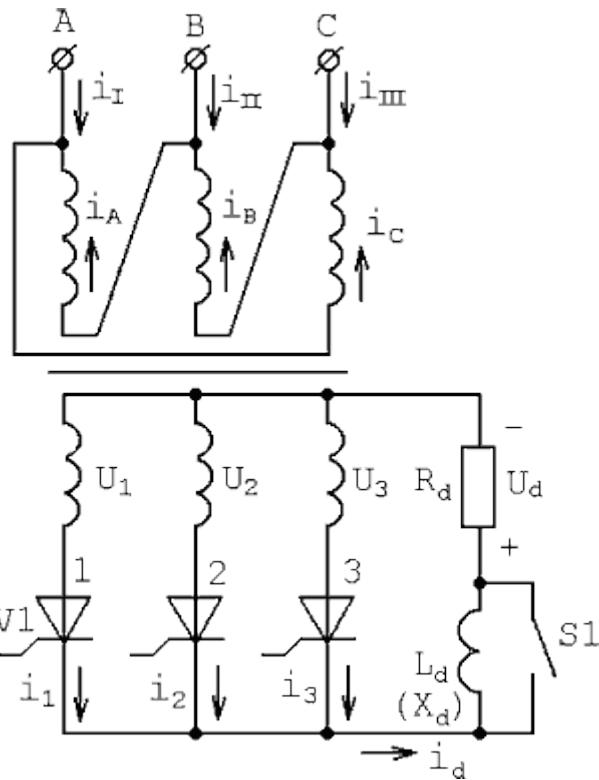


Рис. 1. Трехфазная однотактная вентильная схема

В промежутке (0-01) наибольшее положительное значение, как это показано на рис. 2, имеет напряжение первой фазы u_1 , поэтому ток протекает только через вентиль 1 ($V1$), а остальные вентили заперты. Начиная с момента 01 и правее $u_2 > u_1$, анод вентиля 2 оказывается под положительным напряжением относительно катода. Если в момент 01 на вентиль 2 поступает отпирающий импульс, он включается, а анодное напряжение вентиля 1 ($u_{\text{дл}} = u_1 - u_2 < 0$), и этот вентиль выключается (рис.2).

Замечание. Если по какой-нибудь причине вентиль 2 не включится, то вентиль 1 выключится не в точке 01, а позже. Следовательно, причиной выключения вентиля 1 в точке 01 является включение очередного вентиля 2.

В промежутке (01-02) ток пропускает вентиль 2. В точке 02 включается вентиль 3 и выключается вентиль 2 и т.д. Каждый вентиль пропускает ток в течение периода, равного $120^\circ (2\pi/3)$, поэтому число пульсаций выпрямленного напряжения равно трем.

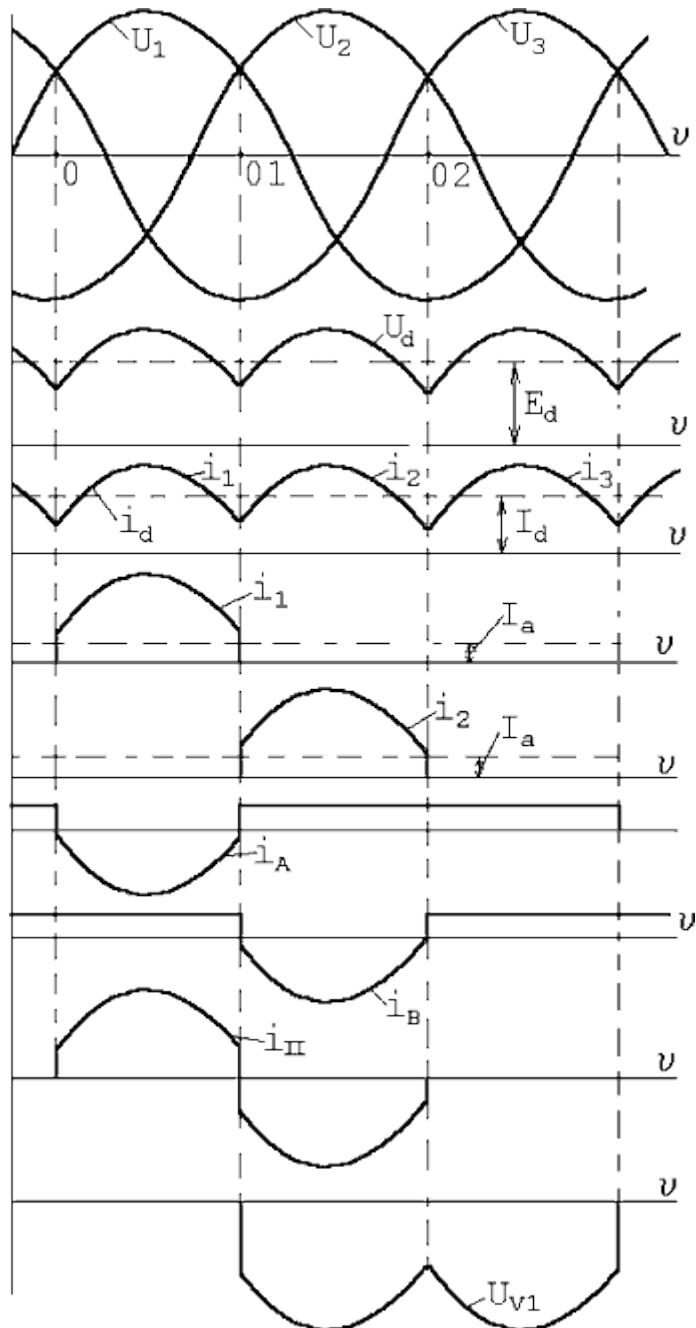


Рис. 2. Кривые токов и напряжений при $X_d = 0$ ($L_d = 0$)

Когда выключен вентиль 1, к нему на интервале проводимости вентиля 2 приложено линейное напряжение u_{21} , а на интервале проводимости вентиля 3 – напряжение u_{31} .

Среднее значение выпрямленного напряжения найдем путем интегрирования напряжения на вторичной обмотке трансформатора в интервале повторяемости формы выпрямленного напряжения:

$$E_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} E_2 \sin \omega d\omega = \frac{3}{2\pi} \int_{-60^\circ}^{+60^\circ} \sqrt{2} \cos \omega d\omega = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} E_2 = 1.17 E_2 \quad (1)$$

где E_2 – действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Зная напряжение первичной сети E_1 , находим коэффициент трансформации:

$$K_{12} = \frac{E_1}{E_2}.$$

Постоянная составляющая выпрямленного тока

$$I_d = \frac{E_d}{R_d},$$

а постоянная составляющая тока одного вентиля

$$I_a = \frac{I_d}{3}.$$

Амплитуда анодного тока вентиля

$$I_{a\max} = I_{d\max} = \frac{\sqrt{2}E_2}{R_d} = 1.21I_d = 3.63I_a \quad (2)$$

Когда вентиль заперт, на его зажимах действует линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора, поэтому амплитуда обратного напряжения

$$U_{e\max} = \sqrt{6}E_2.$$

При $X_d \rightarrow \infty$ выпрямленный ток идеально сглажен и кривые фазных токов имеют прямоугольную форму (рис.3). В этом случае кривые выпрямленного напряжения U_d и обратные напряжения на вентилях остаются такими же, как и при работе на активную нагрузку, а значения токов становятся равными (действующее значение тока вторичной обмотки):

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} I_d^2 \frac{2\pi}{3}} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} = 0.577I_d \quad (3)$$

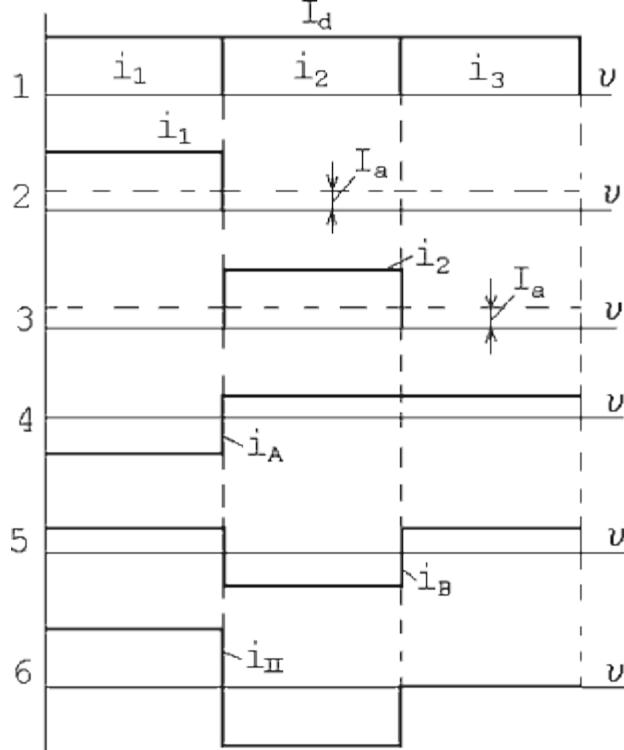


Рис.3. Кривые токов при $X_d \rightarrow \infty$

По кривой первичного фазного тока (ось 4) определяем его среднее значение

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{3K_{12}} I_d \quad (4)$$

По кривой первичного линейного тока (рис.3, ось 6) находим его действующее значение

$$I_I = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{I_d}{K_{12}} \quad (5)$$

Полученные выражения справедливы для любого способа соединения первичной обмотки трансформатора (звездой или треугольником).

На рис.4 приведена трехфазная однотактная вентильная схема, в которой вторичная обмотка трансформатора соединена зигзагом. На каждом стержне магнитной системы, кроме первичной обмотки, расположены две секции вторичной обмотки, в которых протекают токи противоположного направления. Поэтому взаимно компенсируются магнитные силы, соответствующие постоянным составляющим этих токов, а также гармоникам с порядковыми номерами, кратными трем, и схема магнитно уравновешена.

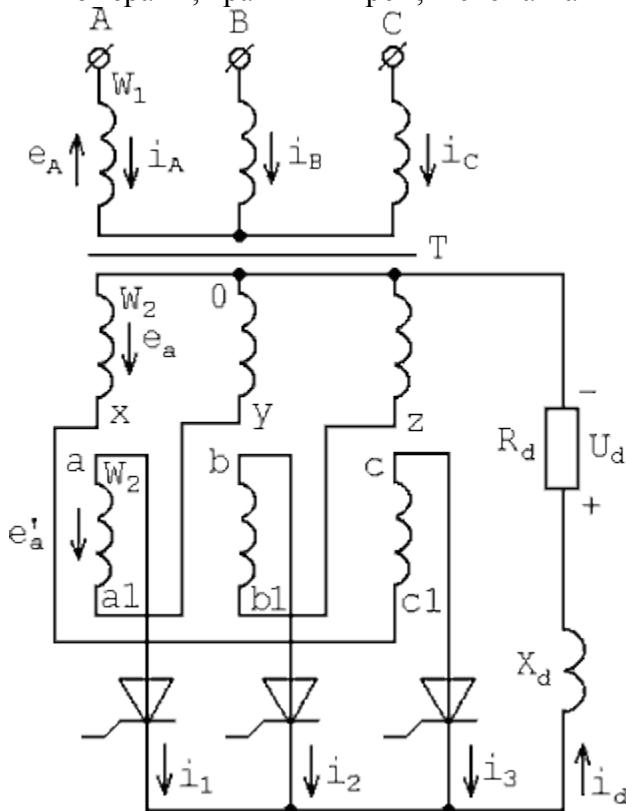


Рис.4. Трехфазная вентильная схема «звезда – зигзаг»

Пусть угол управления $\alpha > 0$. Отпирающие импульсы приходят на вентили поочередно с задержкой на угол управления α относительно момента прохождения через ноль синусоид линейных напряжений вторичных обмоток трансформатора. При угле $\alpha > 0$ в зависимости от характера нагрузки и значения угла α в данной схеме могут иметь место различные режимы работы (рис.5).

Если угол α изменяется в диапазоне от 0 до $\pi/6$, то как при активно-индуктивной, так и при чисто активной нагрузке выпрямленный ток является **непрерывным**. Среднее значение выпрямленного напряжения в этой области углов α при различном характере нагрузки описывается одним аналитическим выражением:

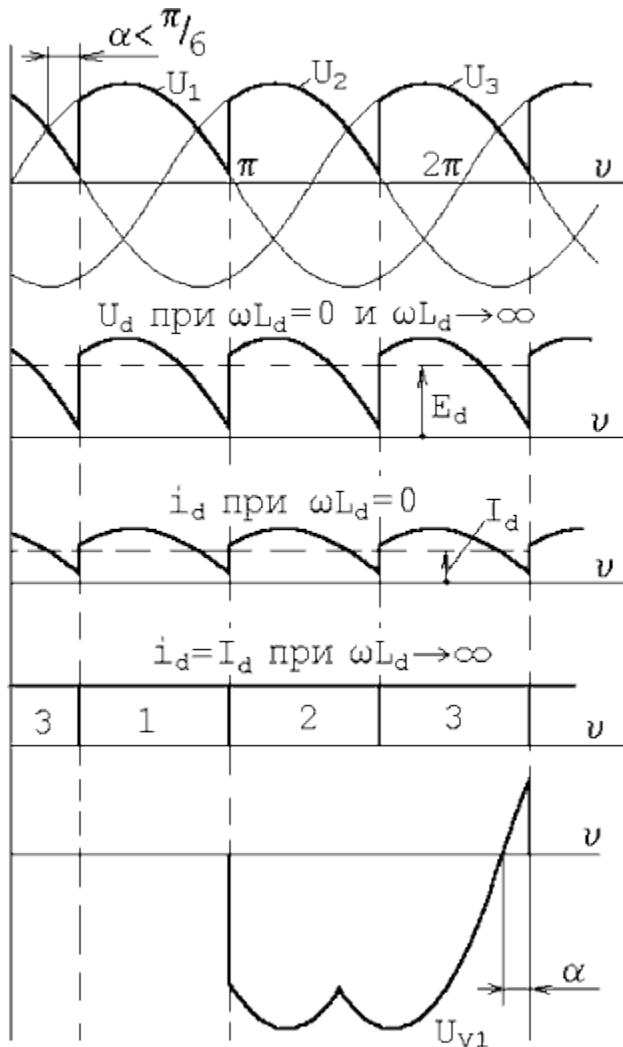


Рис.5. Диаграммы токов и напряжений при $\alpha < \pi/6$

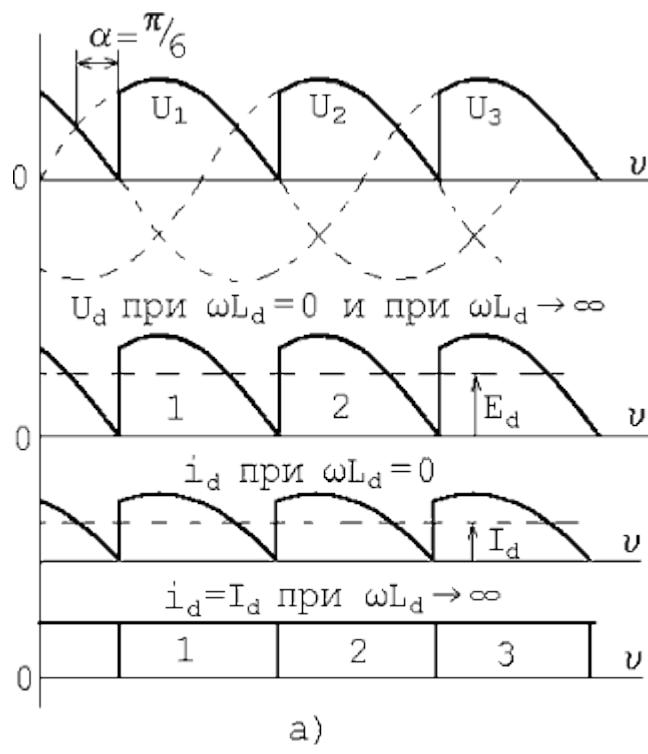
$$E_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2} E_2 \sin \omega d\psi = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} E_2 \cos \alpha = E_{d0} \cos \alpha \quad (6)$$

При угле $\alpha < \pi/6$ кривая мгновенных значений выпрямленного напряжения доходит в моменты переключения вентилей до нуля. Такой режим работы называется **границно-непрерывным**.

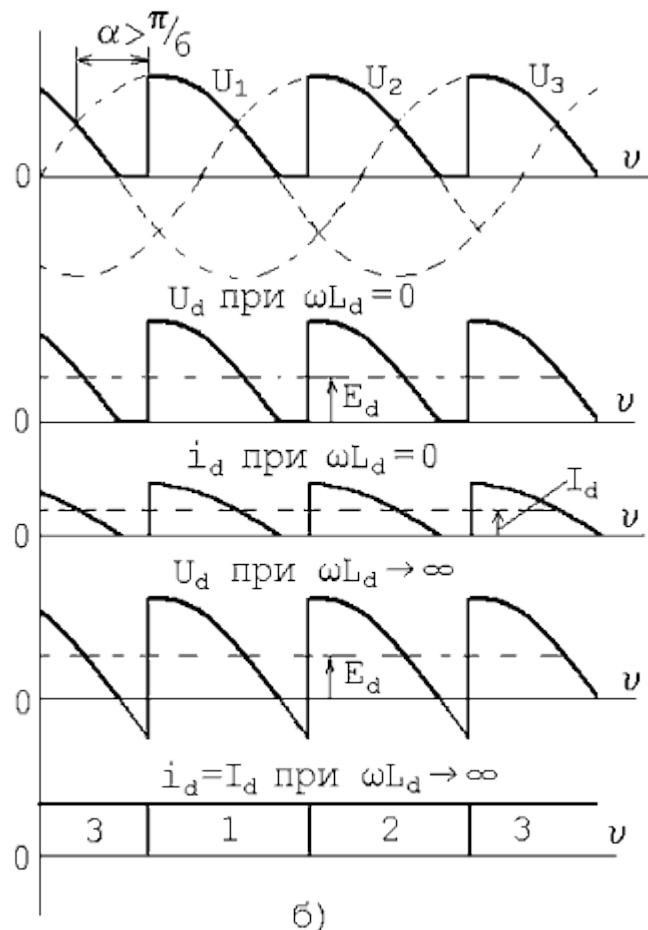
Дальнейшее увеличение угла $\alpha > \pi/6$ при активной нагрузке приводит к прерыванию выпрямленного тока i_d и появлению в выпрямленном напряжении u_d участков с нулевым значением (рис.6,б). Интервал проводимости тока вентиля становится меньше $2\pi/3$.

Среднее значение напряжения в этом случае выражается следующим образом (кривая 1 на рис.7):

$$E_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} \sqrt{2} E_2 \sin \omega d\psi = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} E_2 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right] = E_{d0} \left[\left(1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right) / \sqrt{3} \right]. \quad (7)$$



a)



b)

Рис.6. Диаграммы токов и напряжений при углах $\alpha = \pi$ и $\alpha > \pi/6$

При активно-индуктивной нагрузке за счет энергии, запасаемой в индуктивности L_d , выпрямленный ток i_d продолжает протекать в нагрузке и при переходе выпрямленного напряжения в зону отрицательных значений. Если накопленной в индуктивности L_d

энергии окажется достаточно, чтобы обеспечить протекание тока до очередной коммутации вентилем, то будет наблюдаться режим работы с непрерывным током i_d .

При $\alpha L_d \rightarrow \infty$ режим непрерывного тока будет иметь место при любых углах α в диапазоне от 0 до $\pi/2$. В этом случае среднее значение выходного напряжения E_d можно определить по формуле

$$\frac{E_d}{2\pi} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} E_2 \cos \alpha = E_{d0} \cos \alpha \quad (3.8)$$

Когда угол α становится равным $\pi/2$, площади положительного и отрицательного участков кривой выпрямленного напряжения становятся равными, что свидетельствует об отсутствии постоянной составляющей в выпрямленном напряжении, или, иначе говоря, среднее значение E_d становится равным нулю (кривая 2 на рис.7).

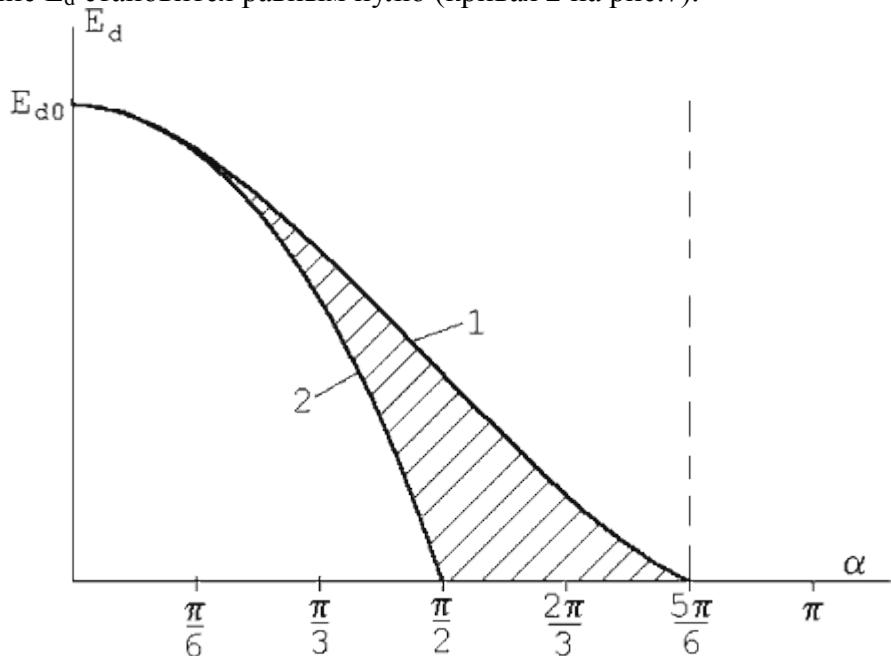


Рис.7. Регулировочные характеристики трехфазного нулевого выпрямителя: 1 – при активной нагрузке; 2 – при активно-индуктивной нагрузке

Заштрихованная область соответствует семейству регулировочных характеристик в режимах прерывистого тока i_d при различных значениях отношения $\alpha L_d / R_d$.

Примем индуктивность L_d настолько большой, ток нагрузки i до момента отпирания следующего вентиля не успевает пройти через нуль. Когда ток через нуль не проходит, он нарастает от интервала к интервалу и устанавливается в течение ряда периодов.

В трехфазной нулевой (однотактной, $m=3$) схеме к нагрузке $R-L$ подключено напряжение

$$u = U_m \sin \left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \omega t \right),$$

где $U_m = \sqrt{2} E_2$, а угол естественного включения вентилей при $\alpha = 0$ составляет $30^\circ = \pi/6$.

Ток через нагрузку определяется дифференциальным уравнением

$$U_m \sin \left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \omega t \right) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (9)$$

Общий интеграл решения уравнения (9)

$$i = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \alpha t - \varphi\right) + A_n e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

где $Z = R + j\omega L = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} e^{j\varphi}$; $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ – угол нагрузки; A_n – постоянная интегрирования, определяемая в каждом конкретном случае из начальных условий.

Для определения тока в любом интервале времени удобно воспользоваться разностными уравнениями.

В общем случае к нагрузке $L - R$ может быть подключено напряжение с противо-ЭДС:

$$u = U_m \sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \alpha t\right) - E_0,$$

где E_0 – противо-ЭДС, например, аккумуляторная батарея или якорь двигателя постоянного тока.

При воздействии противо-ЭДС можно получить режим прерывистых токов, где уравнения (9) и (10) недействительны, т.к. $i_{\text{нач}} = i_{\text{конеч}} = 0$.

При $\alpha \leq \pi/6$ непрерывный режим тока имеет место при любых соотношениях R_d и L_d , и ничем не отличается от случая активной нагрузки при $\alpha \leq \pi/6$. При дальнейшем увеличении угла управления непрерывный режим тока сохраняется только при значительном преобладании индуктивности L_d . Для $\omega L_d / R_d > 10$ без большой погрешности ток нагрузки можно считать идеально сглаженным. Поскольку в простейшей схеме токи вторичных обмоток имеют пульсирующий характер и содержат постоянные составляющие, то в магнитной системе трансформатора возникает ток вынужденного подмагничивания, который может вызвать насыщение трансформатора. Это обстоятельство вызывает необходимость завышать расчетную мощность трансформатора.

1. 7 Лекция №7(2 часа).

Тема: « Трёхфазные преобразователи постоянного напряжения»

1.7.1 Вопросы лекции:

1. Принцип построения схем преобразователей постоянного напряжения в переменное трёхфазное напряжение.
2. Принципиальные схемы самовозбуждающихся трёхфазных преобразователей постоянного напряжения.

1.7.2 Краткое содержание вопросов:

1. Принцип построения схем преобразователей постоянного напряжения в переменное трёхфазное напряжение.

Трехфазная вентильная схема (схема Ларионова)

Вентили 1,3,5 образуют катодную, а вентили 2,4,6 – анодную группы (рис.1). Из катодной группы ток пропускает тот вентиль, к аноду которого подводится большее положительное напряжение.

Замечание. Следует отметить, что нумерация вентилей в данной схеме носит не случайный характер, а соответствует порядку их вступления в работу при условии соблюдения фазировки трансформатора (рис.1).

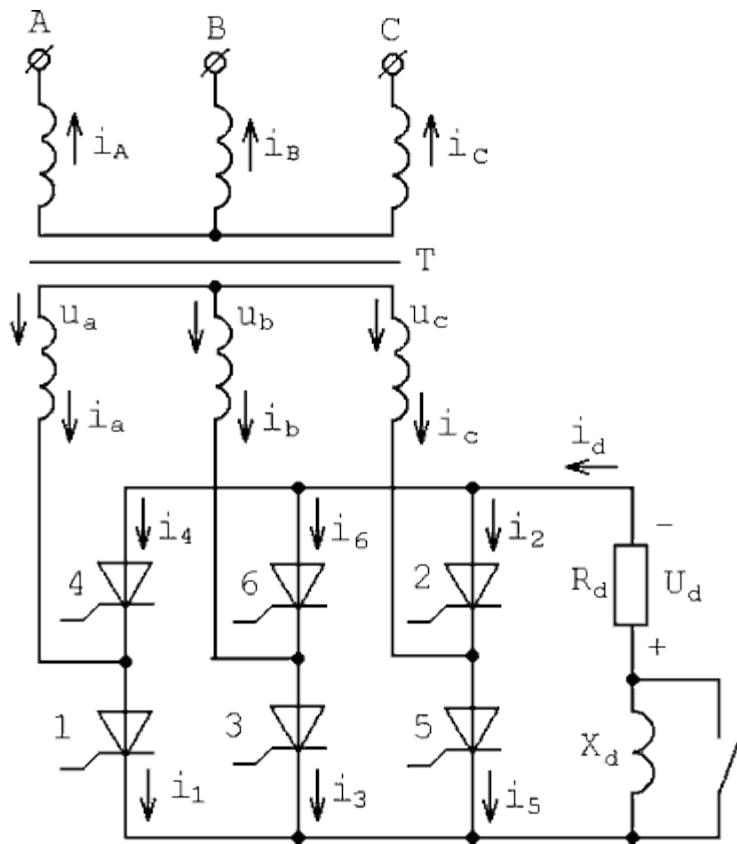


Рис.1. Трехфазная двухтактная вентильная схема

В любом промежутке времени должны быть включены два вентиля – один из катодной, а другой из анодной группы. Поочередная работа различных пар вентилей в схеме приводит к появлению на сопротивлении R_d выпрямленного напряжения, состоящего из частей линейных напряжений вторичных обмоток трансформатора (ось 2 на рис.2) [1, 2].

Из рис.2 (оси 1 и 2) видно, что моменты коммутации совпадают с моментами прохождения через нуль линейных напряжений (когда равны два фазных напряжения).

В промежутке (0-01) наибольшее положительное значение имеет напряжение u_a , подаваемое к аноду вентиля 1, а наибольшее отрицательное значение – напряжение u_b , подводимое к катоду вентиля 6. Следовательно, в этом промежутке одновременно включены вентили 1 и 6. Через вентиль 1 положительное напряжение u_a подводится к нижнему зажиму, а через вентиль 6 отрицательное напряжение u_b подводится к верхнему зажиму сопротивления R_d . Поэтому выпрямленное напряжение

$$u_d = u_a - u_b.$$

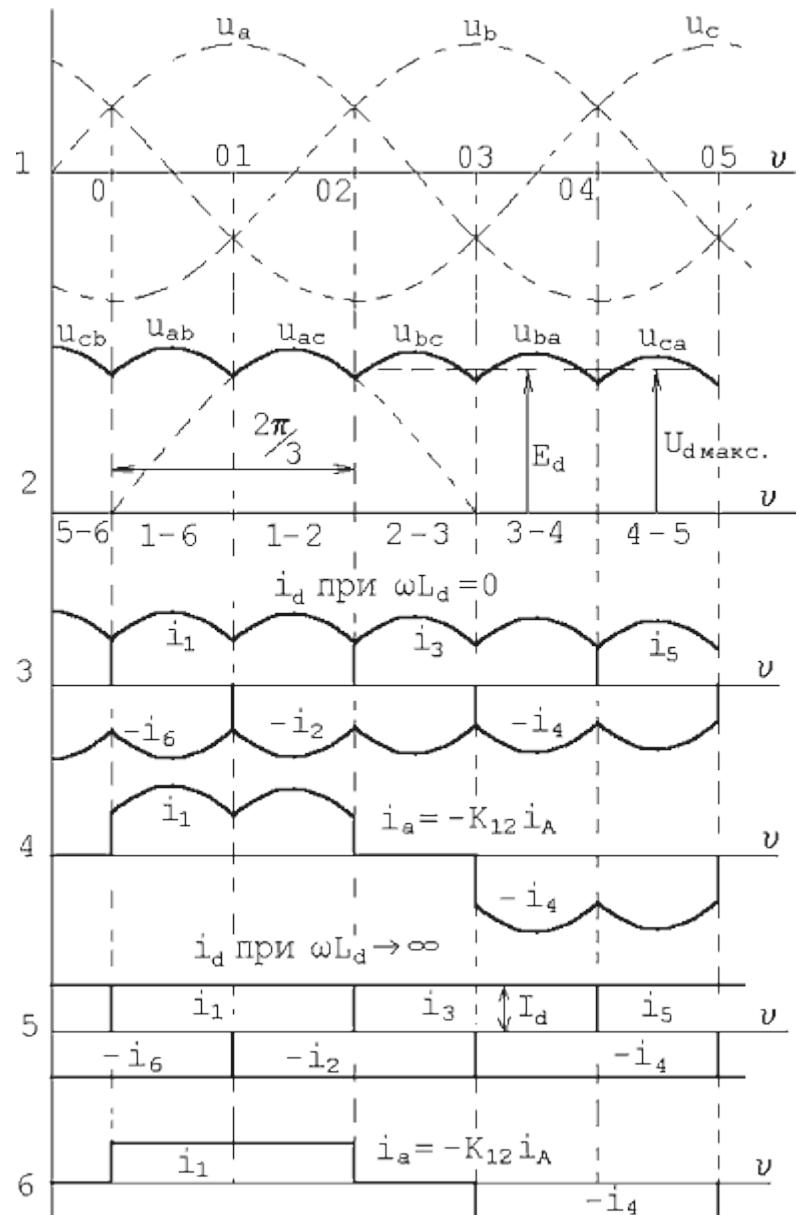


Рис.2. Кривые токов и напряжения при $\alpha = 0$

В точке 01 напряжение $u_\delta = u_c$, поэтому из анодной группы включается вентиль 2. Так как правее точки 01 напряжение u_c имеет наибольшее отрицательное значение, вентиль 6 выключается. В промежутке (01-02) одновременно включены вентили 1 и 2 и выпрямленное напряжение

$$u_d = u_a - u_c.$$

Очевидно, что амплитуда выпрямленного напряжения

$$U_{d\max} = \sqrt{6}E_2.$$

К каждому закрытому вентилю приложено линейное напряжение, поэтому амплитуда обратного напряжения

$$U_{v\max} = \sqrt{6}E_2.$$

Число пульсаций выпрямленного напряжения $m = 6$.

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения (среднее значение) вычисляется для интервала повторяемости выпрямленного напряжения, равного $\pi/3$:

$$E_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{6} E_2 \sin \omega d\omega = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_2 \quad (1)$$

где E_2 – действующее значение фазного напряжения вторичных обмоток трансформатора.

Действующее значение тока вторичной обмотки (ось 6)

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d, \quad I_d = \frac{E_d}{R_d} \quad (2)$$

Действующее значение тока первичной обмотки

$$I_1 = \frac{I_2}{K_{12}} = \frac{I_d}{K_{12}} \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

Максимальное значение тока вентиля

$$I_{V_{max}} = I_d \quad (4)$$

Среднее значение тока вентиля

$$I_{V_{avg}} = \frac{I_d}{3} \quad (5)$$

Действующее значение тока вентиля

$$I_V = \frac{I_d}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Пусть угол управления $\alpha > 0$. В трехфазной мостовой схеме на управляемых вентилях отпирающие импульсы поступают с задержкой на угол α относительно нулей линейных напряжений или моментов пересечения синусоид фазных напряжений (рис.3).

В результате задержки моментов коммутации тиристоров на угол α среднее значение выпрямленного напряжения, образованного из соответствующих частей линейных напряжений, снижается.

До тех пор, пока кривая мгновенных значений выпрямленного напряжения u_d остается выше нуля, что соответствует диапазону изменения угла управления $0 < \alpha < \pi/3$, выпрямленный ток i_d будет непрерывным вне зависимости от характера нагрузки. Поэтому при углах $0 < \alpha < \pi/3$ среднее значение выпрямленного напряжения для активной и активно-индуктивной нагрузки будет равно

$$E_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{6} E_2 \sin \omega d\omega = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_2 \cos \alpha = E_{d0} \cos \alpha \quad (7)$$

При углах $\alpha > \pi/3$ и активной нагрузке в напряжении u_d и токе i_d появляются интервалы с нулевым значением (рис.4), т.е. наступает режим работы с прерывистым выпрямленным током.

Среднее значение выпрямленного напряжения для этого случая может быть выражено следующим образом:

$$E_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\pi} \sqrt{6} E_2 \sin \omega d\omega = E_{d0} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) \right] \quad (8)$$

где

$$E_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_2.$$

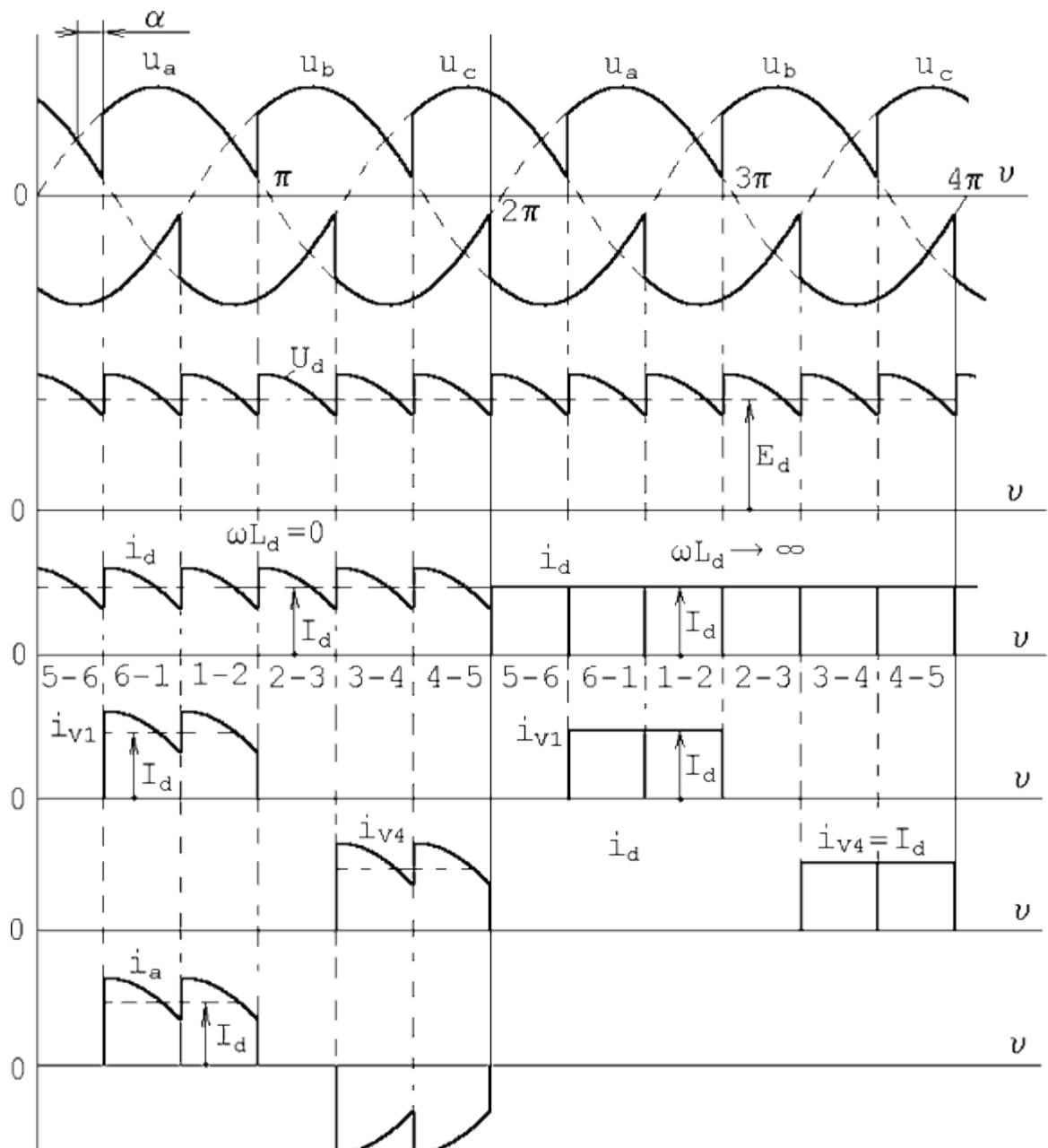


Рис.3. Диаграммы токов и напряжений при углах $0 < \alpha < \pi/3$

Замечание. В режиме с прерывистым током i_d для обеспечения работы данной схемы, а также для ее первоначального запуска на вентили схемы следует подавать **сдвоенные** отпирающие импульсы с интервалом $\pi/3$ или одиночные, но с длительностью, большей, чем $\pi/3$. Это объясняется тем, что для образования замкнутой цепи протекания тока i_d необходимо обеспечить одновременное включение вентиля анодной группы и вентиля катодной группы.

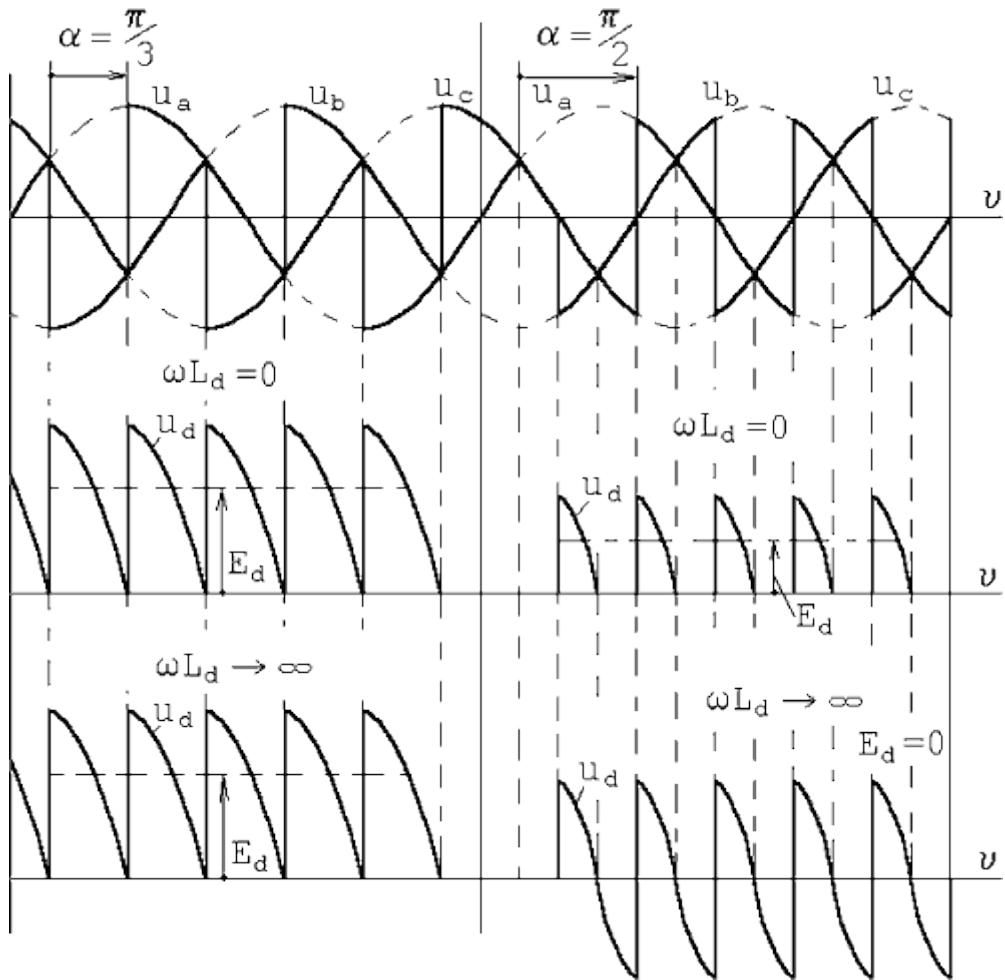


Рис.4. Диаграммы напряжений при углах $\alpha = \pi/3$ и $\alpha > \pi/3$

При изменении угла α от 0 до $\pi/3$ регулировочная характеристика для активной и активно-индуктивной нагрузки описывается формулой

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_2 \cos \alpha.$$

При активно-индуктивной нагрузке и углах $\alpha > \pi/3$, если $\omega L_d \rightarrow \infty$ или отношение $\omega L_d / R_d$ таково, что обеспечивается режим непрерывного тока i_d , среднее значение выпрямленного напряжения также определяется по формуле

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha.$$

При $\alpha = \pi/2$ среднее значение E_d становится равным нулю, значит, это соответствует равенству площадей положительного и отрицательного участков кривой выпрямленного напряжения, что свидетельствует об отсутствии в нем постоянной составляющей (кривая 2 на рис.5).

Начиная с угла $\alpha = \pi/3$ при **активной** нагрузке регулировочная характеристика описывается формулой (кривая 1 на рис.5)

$$E_d = E_{d0} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) \right].$$

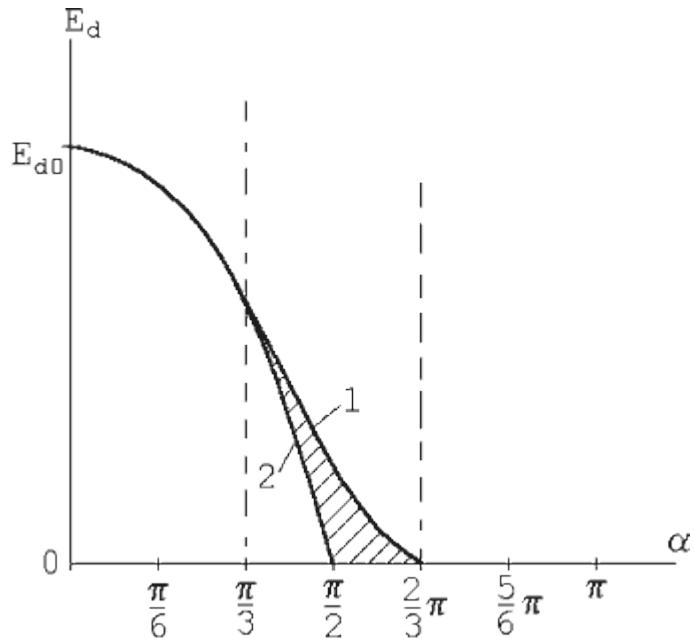


Рис.5. Регулировочные характеристики: 1 – при активной нагрузке; 2 – при активно-индуктивной нагрузке

Заштрихованная область на рис.5 соответствует семейству регулировочных характеристик в режиме с прерывистым током i_d при различных значениях $\omega L_d / R_d$.

Примем индуктивность L_d настолько большой, что ток нагрузки i_d до момента отпирания следующего вентиля не успевает пройти через нуль. Когда ток через нуль не проходит, он нарастает от интервала к интервалу и устанавливается в течение ряда периодов (обычно трех, четырех).

В трехфазной мостовой схеме к нагрузке $R - L$ подключено напряжение

$$u = U_m \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha + \omega t\right),$$

где $U_m = \sqrt{6}E_2$, а угол естественного включения вентилей при $\alpha = 0$ составляет $60^\circ = \pi/3$.

Ток через нагрузку определяется дифференциальным уравнением

$$U_m \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha + \omega t\right) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (9)$$

Общий интеграл решения уравнения (9)

$$i = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha + \omega t - \varphi\right) + A_n e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

где $Z = R + j\omega L = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} e^{j\varphi}$; $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ – угол нагрузки; $\tau = L/R$ – постоянная времени цепи нагрузки; A_n – постоянная интегрирования, определяемая в каждом конкретном случае из начальных условий.

Для определения тока в любом интервале времени удобно воспользоваться разностными уравнениями.

В общем случае к нагрузке $R - L$ может быть подключено напряжение с противо ЭДС

$$u = U_m \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha + \omega t\right) - E_0,$$

где E_0 – противо-ЭДС, например, аккумуляторная батарея или якорь двигателя постоянного тока. При воздействии противо-ЭДС можно получить режим прерывистых токов, где уравнения (9) и (10) недействительны.

1. 8 Лекция №8(2 часа).

Тема: « Параллельный тиристорный инвертор напряжения»

1.8.1 Вопросы лекции:

1. Принцип действия и анализ его работы.
2. Схемы тиристорных ключей постоянного тока.
3. Конвертор напряжения. Тиристорные инверторы повышенной частоты.

1.8.2 Краткое содержание вопросов:

1. Принцип действия и анализ его работы. Особенности некоторых режимов в схемах выпрямителей. Коммутация в однофазных схемах.

В реальных схемах из-за наличия во входной цепи переменного тока индуктивных сопротивлений, в частности индуктивных сопротивлений обмоток согласующего трансформатора или входных реакторов, процесс коммутации имеет определенную длительность, т.е. процесс перехода тока с одного вентиля на другой происходит не мгновенно, а с некоторой постоянной времени контура коммутации.

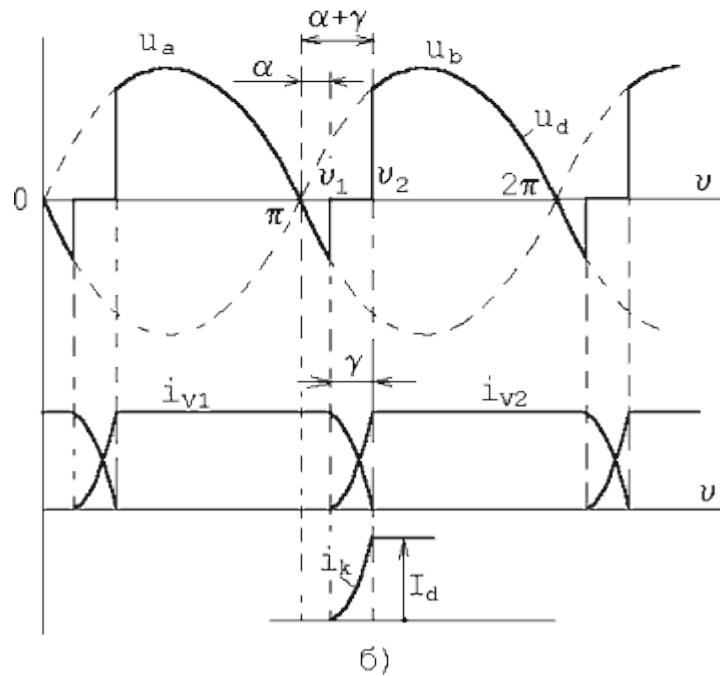
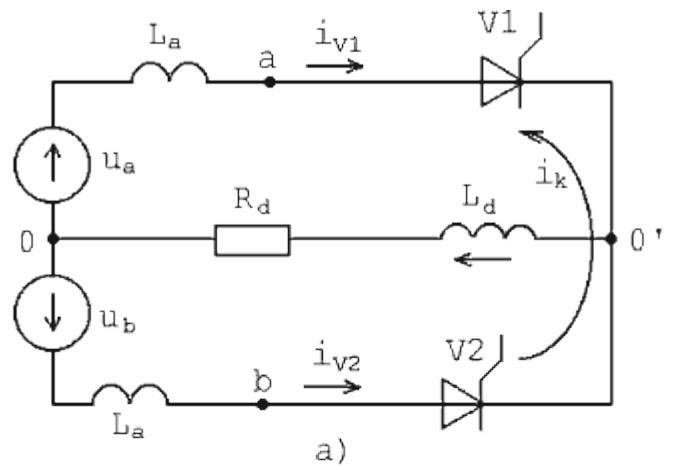


Рис.1. Процессы коммутации: а - схема; б – осциллограммы

Помимо индуктивного сопротивления, на процессы коммутации влияет и входное активное сопротивление обмоток трансформатора, но его влияние в нормальных режимах значительно меньше. Поэтому рассмотрим процессы коммутации с учетом только входных индуктивных сопротивлений (L_a), полагая при этом выпрямленный ток идеально слаженным ($\omega L_d \rightarrow \infty$).

Учитывая одинаковый характер процессов коммутации в различных вентильных схемах, остановимся на наиболее простой схеме выпрямления – однофазной двухполупериодной (рис.1,а).

Индуктивные сопротивления обмоток силового трансформатора учтены введением в схему индуктивностей L_a ; u_a и u_b – мгновенные значения ЭДС вторичных полуобмоток.

Предположим, что в проводящем состоянии находится вентиль $V1$. В момент v_1 поступает отпирающий импульс на вентиль $V2$.

Поскольку потенциал анода вентиля $V2$ в этот момент положителен относительно катода, вентиль включается (рис.1,б).

Начиная с момента v_1 оба вентиля будут включены, и вторичные полуобмотки трансформатора оказываются замкнутыми через вентили $V1$ и $V2$ накоротко. Под воздействием ЭДС вторичных полуобмоток u_a и u_b в короткозамкнутой цепи (контур

коммутации) возникает ток короткого замыкания i_k , который является коммутирующим током.

Этот ток можно в любой момент времени, начиная с $\psi 1$, определить как сумму двух составляющих: установившейся i_k' и свободной i_k'' , которые рассчитываются по следующим соотношениям:

$$i_k' = \frac{2\sqrt{2}E_2}{2X_a} \cos(\psi + \alpha);$$

$$i_k'' = \frac{\sqrt{2}E_2}{X_a} \cos \alpha,$$

где E_2 – действующее значение напряжения вторичной полуполуботки трансформатора; $X_a = \omega L_a$; α - угол управления.

Результирующий ток короткого замыкания можно записать в виде

$$i_k = i_k' + i_k'' = \frac{\sqrt{2}E_2}{X_a} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \psi)].$$

Учитывая, что выпрямленный ток при $\omega L_d \rightarrow \infty$ в период коммутации остается неизменным, можно записать для узла 0 или $0'$ следующее уравнение токов:

$$i_{V1} + i_{V2} = I_d = \text{const},$$

где I_d – среднее значение выпрямленного тока или тока нагрузки. Последнее уравнение справедливо для любого момента времени. Пока ток проводит только вентиль $V1$, получаем

$$i_{V1} = I_d; i_{V2} = 0.$$

В интервале коммутационного процесса (γ) от $\psi 1$ до $\psi 2$ ток i_{V2} плавно увеличивается, а i_{V1} уменьшается. Когда ток i_{V2} будет равным I_d , а ток i_{V1} снизится до нуля, вентиль $V1$ выключится, и ток нагрузки будет протекать лишь через вентиль $V2$.

Длительность интервала коммутации характеризуется обычно углом коммутации γ , который может быть определен для рассмотренной схемы из следующего уравнения:

$$I_d = \frac{\sqrt{2}E_2}{X_a} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] \quad (1)$$

Обозначив угол коммутации γ при угле $\alpha = 0$ через γ_0 , можно записать

$$1 - \cos \gamma_0 = \frac{I_d X_a}{\sqrt{2}E_2} \quad (2)$$

подставив (2) в (1) получим

$$\gamma = \arccos[\cos \alpha + \cos \gamma_0 - 1] - \alpha \quad (3)$$

Замечание 1. Длительность протекания тока в вентилях по сравнению с идеализированной схемой увеличивается на угол γ и становится равной $\pi + \gamma$.

Замечание 2. Процесс коммутации оказывает непосредственное влияние на выпрямленное напряжение $E_d(U_d)$, так как на интервалах коммутации мгновенное значение выпрямленного напряжения в рассмотренной схеме снижается до нуля. В результате этого происходит уменьшение среднего значения выпрямленного напряжения на Δu_k .

$$\Delta u_k = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha + \gamma} \sqrt{2}E_2 \sin \psi d\psi = \frac{\sqrt{2}E_2}{\pi} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] \quad (4)$$

Для нашего случая имеем $E_{d0} = \frac{2\sqrt{2}E_2}{\pi}$, таким образом, падение напряжения в коммутационном интервале выразится как

$$\Delta u_x = E_{d0} \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)}{2}$$

или

$$2\Delta u_x = E_{d0} \cos \alpha - E_{d0} \cos(\alpha + \gamma) \quad (5)$$

но

$$\Delta u_x = \frac{I_d X_a}{\pi},$$

где

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} \approx \frac{E_d}{R_d} \quad (6)$$

При непрерывных токах, т.е. токах, при которых существуют коммутационные провалы напряжения Δu_x , имеем регулировочную характеристику $E_d = E_{d0} \cos \alpha$ (рис.2).

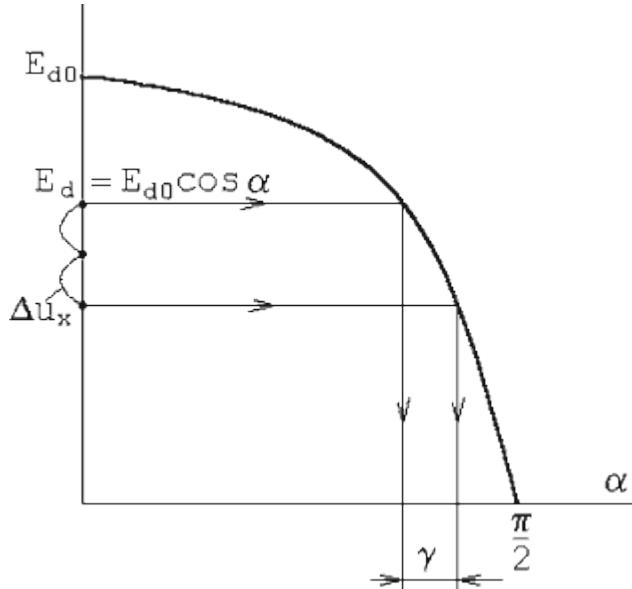


Рис.2. Регулировочные характеристики

Процедура определения угла коммутации по регулировочной характеристике (рис. 2):

- находим $E_d = E_{d0} \cos \alpha$ и откладываем ее на регулировочной характеристике,
- от точки E_d откладываем $2\Delta u_x$,
- проводим прямую, и, опустив перпендикуляры на ось α , получаем угол коммутации γ .

Среднее значение выпрямленного напряжения для рассмотренной схемы

$$u_d = E_{d0} \cos \alpha - \Delta u_x = E_{d0} \cos \alpha - \frac{I_d X_a}{\pi}.$$

Рассмотренный принцип нахождения угла коммутации γ применим к любой схеме, но при условии непрерывного тока I_d .

Замечание 3. Появление коммутационных участков в выпрямленном напряжении приводит к изменению его гармонического состава (5-8%). Угол коммутации влияет и на

гармонический состав первичного тока (тока, забираемого из сети), потребляемого выпрямителем.

2. Схемы тиристорных ключей постоянного тока.

Влияние процесса коммутации в других схемах.

Однофазная мостовая схема по принципу действия подобна однофазной двухполупериодной схеме, рассмотренной ранее (рис.3).

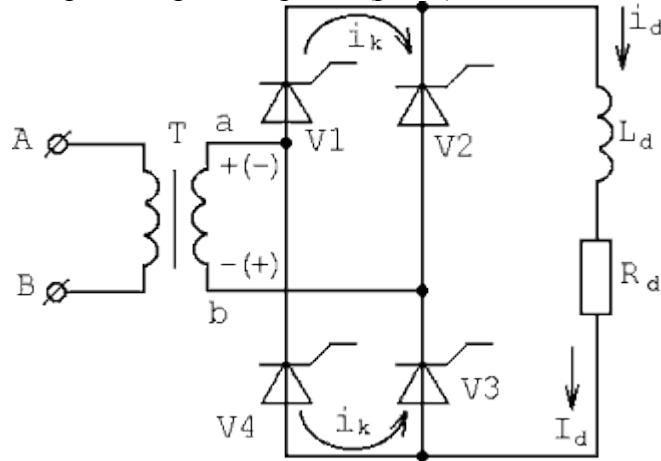


Рис.3. Мостовая однофазная схема

Отличие состоит в том, что при коммутации тока в этой схеме возникают два контура коммутации, каждый из которых состоит из двух вентилей и вторичной обмотки трансформатора: один контур – из вентилями $V1$ и $V2$, а другой – из $V3$ – $V4$. Ток i_k распределяется между этими контурами поровну (рис.3).

Для мостовой схемы имеем

$$I_d = \frac{\sqrt{2}E_2}{2X_a} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]; E_{d0} = \frac{2\sqrt{2}E_2}{\pi}.$$

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_d = E_{d0} \cos \alpha - \frac{2X_a I_d}{\pi} = E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_x,$$

где

$$\Delta U_x = \frac{2X_a}{\pi} I_d \quad (7)$$

В многофазных схемах ($m > 0$) возникают частичные контуры короткого замыкания между отдельными фазами. При этом мгновенное значение выпрямленного напряжения не падает до нуля, а становится равным среднему арифметическому значению напряжений фаз, в вентилях которых коммутируются токи. Так, для трехфазных схем со средней точкой и мостовой мгновенное значение выпрямленного напряжения на интервале коммутации тока между вентилями фаз a и b равно

$$u_{d(r)} = \frac{u_a + u_b}{2},$$

где u_a и u_b – мгновенные значения фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора. Длительность протекания тока через вентили увеличивается на угол γ и становится равной $\left(\frac{2}{3}\pi + \gamma\right)$. В схемах со средней точкой и трехфазной мостовой угол коммутации γ связан с выпрямленным током I_d и углом α следующим соотношением:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2I_d X_a}{\sqrt{6} E_2}.$$

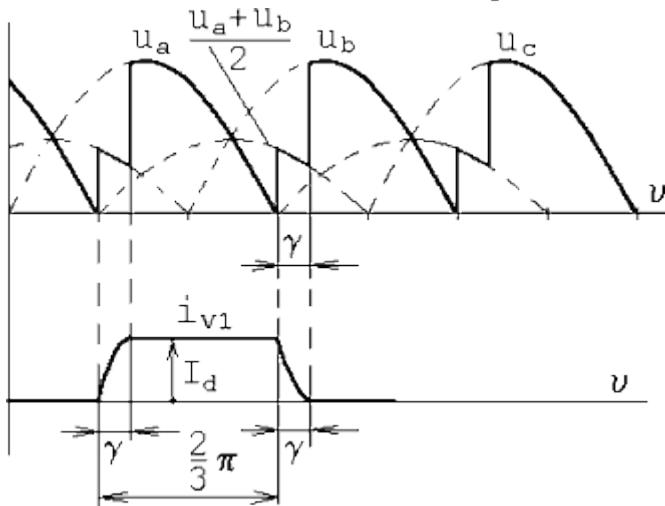


Рис.4. Процесс коммутации в трехфазной схеме

Падение напряжения Δu_x , на которое уменьшаются средние значения выпрямленного напряжения, равно:

- в трехфазной схеме со средней точкой

$$\Delta u_x = \frac{3I_d X_a}{2\pi} \quad (8)$$

- в трехфазной мостовой схеме

$$\Delta u_x = \frac{3I_d X_a}{\pi}, \quad E_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_2 \quad (9)$$

Часто встречается выражение $\Delta u_x = \frac{mX_a}{2\pi}$, что не всегда оправдано, т.к. есть еще коэффициент схемы.

3. Конвертор напряжения. Тиристорные инверторы повышенной частоты. Внешние характеристики выпрямителей

Внешней характеристикой выпрямителя называется зависимость выпрямленного напряжения от среднего значения тока нагрузки, т.е. $U_d = f(I_d)$.

Внешняя характеристика определяется внутренним сопротивлением выпрямителя, которое приводит к снижению выпрямленного напряжения с ростом нагрузки. Снижение напряжения обусловлено активным сопротивлением схемы выпрямителя ΔU_R , падением напряжения в вентилях ΔU_B и индуктивным сопротивлением ΔU_X , которое проявляется при процессах коммутации.

Соответственно внешнюю характеристику выпрямителя (при $\omega L_d \rightarrow \infty$) можно записать в виде следующего уравнения:

$$U_d = E_d - \Delta U_R - \Delta U_B - \Delta U_X,$$

где ΔU_X находится по выражениям (7-9);

$$X_a = X_S = \frac{U_x \% U_{1\phi}}{100 I_{1\phi, \text{ном}}^2 K_{12}^2}; \quad \Delta U_R = R_a I_d; \quad R_a = \frac{\Delta P_{x,z}}{m I_{1\phi, \text{ном}}^2 K_{12}^2}; \quad \Delta U_B - \text{падение напряжения на вентилях } (0.5...2)B. \quad E_d = E_{d0} \cos \alpha - \text{в режиме непрерывных токов}; \quad E_d = E_d(\varphi, \alpha) - \text{из}$$

регулировочной характеристики для каждого частного случая; $E_d = E_d(C_e \Omega)$ - при работе выпрямителя на якорь двигателя постоянного тока [1].

4. Тиристорные инверторы повышенной частоты.

Работа выпрямителей на противо-ЭДС

Рассмотрим влияние противо-ЭДС на электромагнитные процессы в схеме выпрямителя на примере однофазной схемы со средней точкой, в цепь постоянного тока которой включена аккумуляторная батарея с ЭДС E_0 и внутренним сопротивлением R_d (рис.5, а).

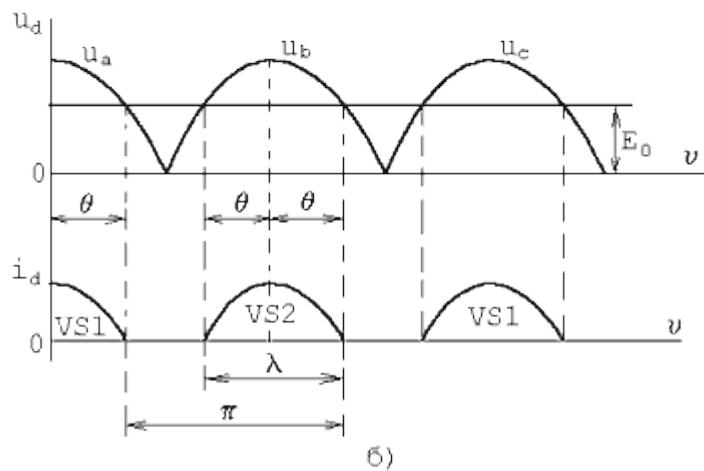
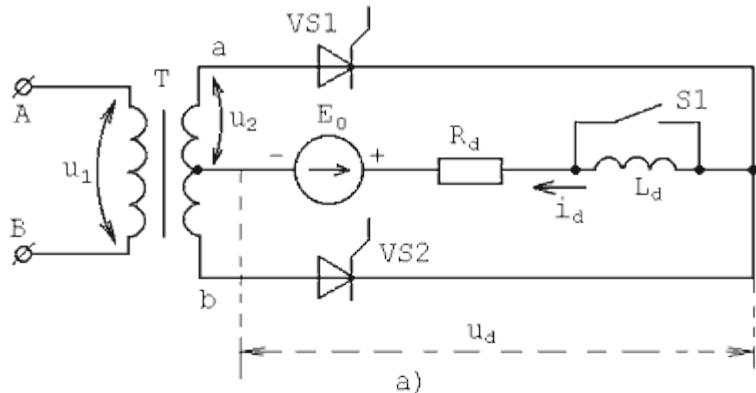


Рис.5. Выпрямитель с противо-ЭДС: а – схема, б – диаграммы напряжения и тока

Предположим, что ключ $S1$ замкнут, т.е. индуктивность L_d отсутствует. В этом случае ток i_d в нагрузке начинает протекать, когда мгновенное значение выпрямленного напряжения u_d превышает ЭДС E_0 (рис.5, б), так как только при этом условии к вентилям схемы будет приложено прямое напряжение, и они будут проводить ток.

Ток i_d , протекающий в этом случае в цепи нагрузки, можно выразить следующей формулой, приняв за начало отсчета максимум выпрямленного напряжения:

$$i_d = \frac{u_d - E_0}{R_d} = \frac{\sqrt{2}E_2 \cos \omega t - E_0}{R_d} \quad (10)$$

Очевидно, что интервал проводимости вентилей будет зависеть от соотношения амплитуды напряжения вторичной обмотки трансформатора $\sqrt{2}E_2$ и противо-ЭДС E_0 . Тогда интервал проводимости вентилей λ можно записать в виде

$$\lambda = 2\theta.$$

Учитывая, что отсчет ведется от максимума выпрямленного напряжения, можно записать

$$\sqrt{2}E_2 \cos \theta = E_0 \quad (11)$$

или

$$\theta = \arccos \frac{E_0}{\sqrt{2}E_2}.$$

Подставляя (11) в (10), получаем следующее выражение для мгновенного значения тока в нагрузке:

$$i_d = \frac{\sqrt{2}E_2}{R_d} (\cos \psi - \cos \theta).$$

Среднее значение выпрямленного тока (постоянную составляющую) можно определить из соотношения

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\lambda} i_d d\psi = \int_{-\theta}^{\theta} \frac{\sqrt{2}E_2}{R_d} (\cos \psi - \cos \theta) = \frac{2\sqrt{2}E_2}{\pi R_d} (\sin \theta - \theta \cos \theta) \quad (12)$$

Для схемы m -фазного выпрямителя уравнение (12) принимает вид

$$I_d = \frac{m}{\pi} \frac{E_{\Phi,m}}{R_d} (\sin \theta - \theta \cos \theta) \quad (13)$$

где $E_{\Phi,m}$ – амплитуда фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Если в цепь постоянного тока включена индуктивность L_d (ключ $S1$ разомкнут), то пульсация выпрямленного тока уменьшается и при $\omega L_d \rightarrow \infty$ становится равной нулю. В этом случае можно записать

$$I_d = \frac{E_d - E_{d0}}{R_d},$$

где E_d – среднее значение выпрямленного напряжения из регулировочной характеристики.

Пример. Рассчитать интервал проводимости λ и среднее значение тока вентиляй неуправляемого выпрямителя, выполненного по однофазной схеме со средней точкой и работающего на противо-ЭДС.

Исходные данные следующие:

- действующее значение напряжение вторичной полубомотки трансформатора $E_2 = 127 \text{ В}$;
- противо-ЭДС в цепи постоянного тока $E_0 = 120 \text{ В}$;
- внутреннее сопротивление источника противо-ЭДС $R_d = 0,1 \Omega$;
- индуктивность в цепи постоянного тока $L_d = 0$ $L_d=0$.

Определим по (11) угол отсечки вентиляй θ :

$$\theta = \arccos \frac{E_0}{\sqrt{2}E_2} = \arccos \frac{120}{\sqrt{2} \cdot 127} = 48^\circ = 0,48 \text{ рад.}$$

Тогда интервал проводимости вентиляй

$$\lambda = 2\theta = 2 \cdot 48^\circ = 96^\circ.$$

Среднее значение выпрямленного тока

$$I_d = \frac{2\sqrt{2}E_2}{\pi R_d} (\sin \theta - \theta \cos \theta) = \frac{2\sqrt{2} \cdot 127}{\pi \cdot 0,1} (\sin 48^\circ - 0,83 \cos 48^\circ) = 206 \text{ А.}$$

Среднее значение тока вентиля равно $I_{B,av} = \frac{I_d}{2} = \frac{206}{2} = 103 \text{ А.}$

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

2.1 Практическое занятие №1 (2 часа).

Тема: «Выпрямители переменного напряжения»

2.1.1 Задание для работы:

Рекомендации по выполнению практических работ

Перед выполнением работ все студенты должны изучить правила техники безопасности применительно к лаборатории проводимых занятий, для чего преподавателем проводится инструктаж. Краткий инструктаж проводится также на каждом занятии.

При подготовке к практической работе необходимо:

- 1) ознакомиться с ее содержанием и, пользуясь рекомендованной литературой и конспектом лекций, изучить теоретические положения, на которых базируется работа;
- 2) выполнить предварительные расчеты и построения, указанные в задании для своего варианта;
- 3) изучить схему лабораторной установки и продумать методику выполнения практической работы;
- 4) ответить на контрольные вопросы.

При выполнении практической работы необходимо:

- 1) ознакомиться с рабочим местом, проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводов;
- 2) проверить положение стрелок электроизмерительных приборов и если требуется, установить на нуль; приборы с несколькими пределами измерения включить на наибольший предел;
- 3) произвести сборку схемы;
- 4) после разрешения преподавателя включить питание и приступить к выполнению работы;
- 5) в ходе работы и по ее окончанию полученные данные представлять на проверку преподавателю;
- 6) схему разбирать только после проверки преподавателем результатов опыта (перед разборкой выключить источник питания!);
- 7) по окончании работы привести в порядок рабочее место.

2.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

Выпрямители

Классификация. Структурная схема. Виды нагрузок.

Методические указания

Выпрямители классифицируются по ряду признаков: по числу фаз, по числу выпрямляемых полуволн, по построению схем, по мощности по возможностям управления. Обобщенная структурная схема выпрямителя, содержит сетевой фильтр, трансформатор, вентильный блок, сглаживающий фильтр, стабилизатор, нагрузку. Не все указанные блоки обязательно присутствуют в схеме. В зависимости от предъявляемых

требований могут отсутствовать некоторые блоки. Ввиду сложности расчетов выпрямителей, анализ процессов в них в первом приближении выполняется при упрощающих допущениях об индуктивности нагрузки. Принимается, что, либо индуктивность в цепи выпрямленного тока $L_d = 0$, либо $L_d = \infty$.
Литература:[1, с. 289 – 291; 3, с. 6 – 8].

Контрольные вопросы

1. По каким признакам классифицируются выпрямители?
2. Как изменяется структурная схема выпрямителей в зависимости от требований?

Неуправляемые выпрямители

Однофазные схемы выпрямления. Однофазная однополупериодная схема. Учет неидеальности вентилей и трансформатора. Однофазная нулевая и мостовая схемы. Временные диаграммы. Основные соотношения в схемах.

Многофазные схемы выпрямления. Трехфазная нулевая схема. Поток вынужденного намагничивания. Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом и вторичными обмотками, соединенными в зигзаг. Параллельная работа трехфазных нулевых схем. Схема две обратные звезды с уравнительным реактором. Трехфазная мостовая схема (схема Ларионова). Составные схемы. Временные диаграммы и основные соотношения в схемах. Сравнение схем.

Методические указания.

При изучении этого параграфа нужно обратить внимание на схемы, **построение временных диаграмм** и элементы расчета. Обратите внимание на особенности отдельных схем. Вид временных диаграмм зависит от схемы и характера нагрузки. Диаграммы строят при следующих допущениях: вентиль и трансформатор идеальны.

Рассмотрим построение диаграмм напряжений и токов в однофазной нулевой схеме для случая $L_d = 0$. При построении диаграмм для вторичных ЭДС и выпрямленного напряжения потенциал нулевого вывода трансформатора принимают за 0. На вторичной стороне трансформатора действуют противофазные напряжения. Когда напряжение в точке a положительно по отношению к точке 0, то в точке b оно отрицательно. При этом проводит вентиль $V1$, а $V2$ заперт. Ток через нагрузку в соответствии с законом Ома повторяет форму напряжения на нагрузке. Когда один из вентилей проводит, к запертому прикладывается двойное напряжение.

Если $L_d = \infty$, то форма напряжения на нагрузке сохраняется. Выпрямленное напряжение содержит постоянную составляющую и гармоники, но, т.к. $X_d = \infty$, то ток от гармоник равен нулю и i_d строго постоянен. Поэтому токи через вентили и обмотки трансформаторов превращаются в прямоугольники.

Расчет схем выпрямления позволяет установить связь между токами и напряжениями на стороне переменного и на стороне постоянного тока, определить ток и напряжение на вентиле, а также расчетную мощность трансформатора.

Расчет схемы производится в несколько этапов:

1. Определение токов и напряжений на стороне нагрузки,
2. Определение токов и напряжений для вентиля,

3. Определение токов и напряжений для трансформатора.

Вентили выбираются по среднему току, для трансформатора важно действующее значение, для нагрузки важно среднее значение тока и напряжения.

Обратите внимание на сравнение схем выпрямления. В большинстве случаев в выпрямителях средней мощности применяется трехфазная мостовая схема.

Рассчитав идеальный выпрямитель, нужно уметь учесть неидеальность вентилей и активные сопротивления обмоток трансформатора.

Литература: [1, с. 291 – 312; 3, с. 8 – 32].

Контрольные вопросы

1. Назовите основные однофазные и трехфазные схемы выпрямления.
2. Назовите основные величины, используемые при описании работы выпрямителей.
3. *Почему при $x_d = \infty$ в токе нагрузки отсутствуют пульсации?*
4. Сравнить однофазные схемы выпрямления по основным показателям.
5. *Что такая внешняя характеристика?*
6. *Что такое поток вынужденного намагничивания и как он влияет на работу трансформатора?*
7. *Методы борьбы с потоком вынужденного намагничивания.*
8. Сравнить многофазные схемы выпрямления по основным показателям.
9. Какова частота пульсаций в изучаемых схемах?
10. *Сравните форму токов i_a и \mathbf{i}_2 для трехфазной нулевой схемы при $x_d = \infty$. Почему отличаются формулы для I_a и \mathbf{I}_2 ?*
11. *Как строятся временные диаграммы токов и напряжений в изученных схемах?*
12. Как изменяются временные диаграммы токов и напряжений в трехфазной нулевой схеме (при $x_d = 0$), если сгорит предохранитель в цепи одного вентиля?
13. *Как изменяются временные диаграммы токов и напряжений в трехфазной нулевой схеме (при $x_d = \infty$), если сгорит предохранитель в цепи одного вентиля?*

Управляемые выпрямители

Понятие о режимах работы. Процессы и основные соотношения в управляемых выпрямителях. Регулировочные характеристики. Влияние анодных индуктивностей на коммутацию тока и внешние характеристики в непрерывном режиме. Влияние анодных индуктивностей на регулировочные характеристики в непрерывном режиме. Особенности работы выпрямителей на противо-ЭДС.

Методические указания.

В зависимости от вида выпрямленного тока существует три режима: **границный, прерывистый и непрерывный**. Угол управления α измеряется от точки естественной коммутации (в которой начал бы проводить вентиль в неуправляемом выпрямителе) до момента подачи управляющего импульса и включения тиристора. Угол управления, при котором меняется режим, называется границным. Обратите внимание на основные понятия: регулировочная характеристика, внешняя характеристика. Внешняя характеристика – это зависимость выпрямленного напряжения от выпрямленного тока при постоянном угле управления. Регулировочная характеристика – это зависимость выпрямленного напряжения от угла управления α при постоянстве выпрямленного тока. **Анодное активное сопротивление** – это активное сопротивление обмоток

трансформатора, приведенное ко вторичной стороне, а **анодное индуктивное сопротивление** - это индуктивное сопротивление рассеивания, приведенное ко вторичной стороне. Коммутация в вентилях осуществляется под действием линейной ЭДС. В период коммутации мгновенное значение выпрямленного напряжения падает и находится посередине между фазными ЭДС. Это нужно учитывать при построении временных диаграмм. В фазных напряжениях в моменты коммутаций также появляются провалы и выбросы. Все соотношения, полученные при активно-индуктивной нагрузке в непрерывном режиме, справедливы и для нагрузки с ПЭДС в непрерывном режиме.

Очень важно усвоить, как влияют режим и параметры схемы на вид, положение, наклон характеристик.

Литература: [1, с. 312 – 326; 3, с. 33 – 49].

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются режимы работы выпрямителя?
2. Что такое угол управления α и как он определяется по осциллографме?
3. Что такое регулировочная характеристика?
4. От чего зависит вид регулировочной характеристики?
5. Можно ли снять регулировочную характеристику на холостом ходу? Обоснуйте ответ.
6. Как изменяется соотношение между приведенным индуктивным сопротивлением рассеивания трансформатора и приведенным активным сопротивлением обмоток при изменении мощности трансформатора?
7. Что такое внешняя характеристика?
8. От каких параметров зависит положение и наклон внешней характеристики в непрерывном режиме?
9. От каких параметров зависит положение регулировочной характеристики в непрерывном режиме?
10. Как снимаются внешние и регулировочные характеристики выпрямителя?
11. Что такое граничный ток $I_{d_{rp}}$ и граничный угол α_{ep} ?
12. От чего зависят $I_{d_{rp}}$ и α_{ep} ?
13. Как определить экспериментально $I_{d_{rp}}$ и α_{rp} ?
14. Чем отличаются временные диаграммы (осциллограммы) выпрямленного напряжения u_d и тока i_d в различных режимах при различных нагрузках.
15. Как изменяются временные диаграммы токов и напряжений в трехфазной нулевой схеме (при $x_d = 0$), если сгорит предохранитель в цепи одного вентиля при $\alpha=45^\circ$?
16. Как изменяются временные диаграммы токов и напряжений в трехфазной нулевой схеме (при $x_d = \infty$), если сгорит предохранитель в цепи одного вентиля при $\alpha=45^\circ$?

2.2Практическоезанятие №2 (2 часа).

Тема: «Транзисторные преобразователи постоянного напряжения»

2.2.1Задание для работы:

Рекомендации по выполнению практических работ

Перед выполнением работ все студенты должны изучить правила техники безопасности применительно к лаборатории проводимых занятий, для чего преподавателем проводится инструктаж. Краткий инструктаж проводится также на каждом занятии.

При подготовке к практической работе необходимо:

- 1) ознакомиться с ее содержанием и, пользуясь рекомендованной литературой и конспектом лекций, изучить теоретические положения, на которых базируется работа;
- 2) выполнить предварительные расчеты и построения, указанные в задании для своего варианта;
- 3) изучить схему лабораторной установки и продумать методику выполнения практической работы;
- 4) ответить на контрольные вопросы.

При выполнении практической работы необходимо:

- 1) ознакомиться с рабочим местом, проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводов;
- 2) проверить положение стрелок электроизмерительных приборов и если требуется, установить на нуль; приборы с несколькими пределами измерения включить на наибольший предел;
- 3) произвести сборку схемы;
- 4) после разрешения преподавателя включить питание и приступить к выполнению работы;
- 5) в ходе работы и по ее окончанию полученные данные представлять на проверку преподавателю;
- 6) схему разбирать только после проверки преподавателем результатов опыта (перед разборкой выключить источник питания!);
- 7) по окончании работы привести в порядок рабочее место.

2.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

Транзисторы

Классификация.

Биполярные транзисторы. Устройство и принцип действия. Схемы включения.

Статические характеристики. Параметры. Работа транзистора в линейном режиме. Классы усиления. Ключевой режим. Особенности работы транзисторов на высоких частотах.

Унипольные (полевые) транзисторы. Устройство и принцип действия транзисторов с затвором в виде р-п перехода и с изолированным затвором. Характеристики в схеме с общим истоком. Параметры.

IGBT (БТИЗ) транзисторы. Характеристики. Параметры.

Сравнение транзисторов. Применение.

Методические указания

Транзисторы по принципу действия делятся на биполярные (управляемые током), унипольные (управляемые электрическим полем или полевые) и IGBT-транзисторы. Аббревиатура IGBT – это сокращение названия Insulatedgatebipolartransistor. В переводе это значит биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ). Нужно знать разновидности транзисторов, их принципы действия, ВАХ и схемы включения в усилительных каскадах. Нужно уметь нарисовать схемы для снятия ВАХ транзисторов любого типа на постоянном токе и с помощью осциллографа. Обратите внимание на параметры транзисторов, порядок их величин. Следует уметь сравнивать транзисторы по основным показателям.

Ключевой режим важнейший режим работы транзистора. Нужно уметь обосновать его преимущества.

Литература: [1, с. 203 – 219; 2, с 19 – 32].

Контрольные вопросы

- 1.Принцип действия биполярного транзистора.
- 2.Объясните вид выходных характеристик биполярного транзистора.
- 3.Сравните схемы включения биполярного транзистора. Укажите преимущества и недостатки схем по усилительным свойствам, частотным характеристикам и термостабильности.
- 4.Нарисуйте схему простейшего усилительного каскада. Укажите назначение элементов.
- 5.Почему отличаются характеристики прямой передачи по току транзистора и транзисторного усилительного каскада?
- 6.Нарисуйте нагрузочную диаграмму транзисторного усилительного каскада. Что произойдет с выходным сигналом, если сместится рабочая точка покоя?
- 7.Что такое ключевой режим и каковы его преимущества?
- 8.Назовите основные параметры транзисторов.
- 9.Укажите порядок величин параметров мощных транзисторов.
- 10.Принципы действия полевых транзисторов.
- 11.Характеристики и параметры полевых транзисторов.
- 12.Принцип действия БТИЗ.

13. Характеристики и параметры БТИЗ.
14. Сравните параметры транзисторов, имеющих различные принципы действия.
15. От чего и как зависит переходный процесс при переключении транзисторного ключа?
16. Что такое защищенный транзисторный ключ?

Реверсивные преобразователи

Основные определения. Схемы реверсивных преобразователей. Регулировочные и внешние характеристики. Способы управления реверсивными преобразователями. Управлительные тока при совместном управлении и способы их ограничения.

Методические указания.

Чтобы изменять направление тока, реверсивный преобразователь содержит два комплекта вентилей. Наиболее перспективная и выгодная встречно-параллельная схема.

Если комплекты проводят ток по очереди, то такое управление называется раздельным. При совместном управлении работают одновременно два комплекта один в выпрямительном режиме, другой в инверторном. Обратите внимание на преимущества и недостатки раздельного и совместного управления.

Регулировочные и внешние характеристики реверсивного преобразователя аналогичны характеристикам однокомплектного рекуперирующего преобразователя. Имеются различные способы согласования. В реверсивном преобразователе вводится угол α_{\max} , который выбирается из условий инвертирования, чтобы не произошло опрокидывание инвертора. Чтобы произвести реверс двигателя, необходимо в начале произвести рекуперативное торможение, при этом двигатель переходит в генераторный режим, напряжение мгновенно изменяться не может, а ток проходит через 2-й комплект, работающий в инверторном режиме. В выпрямительном режиме вводится угол α_{\min} из условий предотвращения опрокидывания инвертора.

Изучите способы ограничения уравнительного тока при совместном управлении.

Литература: [1, с. 345 – 350; 3, с. 71 – 78].

Контрольные вопросы

1. Почему в реверсивном преобразователе предусматривается два комплекта вентилей?
2. В чем отличие совместного и раздельного управления?
3. Какие отличительные признаки силовых схем при раздельном и совместном управлении?
4. Как располагаются внешние характеристики комплектов вентилей при различных способах согласования?
5. Каков вид регулировочных характеристик реверсивного преобразователя?
6. Почему применяют нелинейное согласование характеристик?
7. Для чего вводится ограничение в регулировочной характеристике преобразователя.

Системы управления преобразователей (СУП)

Назначение, функциональные схемы и требования, предъявляемые к СУП.

Способы управления фазой управляющего импульса. Регулировочные характеристики фазосдвигающих устройств (ФУ) и преобразователей с различными формами опорных напряжений. Многоканальные СУП.

Одноканальные СУП. Понятие о цифровых СУП. Особенности систем управления реверсивных преобразователей. Пример выполнения СУП.

Переходные процессы в реверсивных преобразователях при различных видах нагрузки.

Методические указания.

Уделите основное внимание СУП ведомых преобразователей. Требования, предъявляемые к СУ, определяются рядом факторов: физическими процессами в приборах, особенностями самой схемы, особенностями нагрузки.

Требования:

- 1) достаточная амплитуда управляющего импульса, выбираемая для тиристора по диаграмме управления;
- 2) крутизна управляющих импульсов не менее 0.5-1 А/мкс;
- 3) достаточная длительность управляющих импульсов: а) с точки зрения физики работы тиристора – 20 мксб) исходя из особенностей 3-хфазной мостовой схемы, длительность импульсов более 60° или нужно применять сдвоенные импульсы, в) исходя из особенностей активно-индуктивной нагрузки с большой индуктивностью, необходимо применять длинные импульсы;
- 4) требуемый диапазон регулирования в зависимости от назначения преобразователя;
- 5) быстродействие, чтобы за время 3..6 мс в полном диапазоне сдвинулся управляющий импульс;
- 6) допустимая несимметрия управляющих импульсов меньше 1°.

В СУП ведомых преобразователей чаще всего применяется **вертикальное управление**. Опорное напряжение может быть либо косинусоидальное, либо пилообразное. Рассмотрите три вида регулировочных характеристик: регулировочная характеристика системы управления, регулировочная характеристика преобразователя, регулировочная характеристика преобразователя вместе с системой управления. Нужно изучить эти характеристики при различной форме опорного напряжения.

Для того, чтобы сместить регулировочную характеристику применяют напряжение смещения.

Особое внимание уделите системам управления и регулировочным характеристикам реверсивных преобразователей при раздельном управлении. Из-за перехода в прерывистый режим при $\alpha_0=90^\circ$ и $U_{ynp}=0$ двигатель не останавливается. Следовательно. Чтобы обеспечить остановку двигателя при $U_{ynp}=0$, α_0 нужно сделать больше, 90°. Поэтому, **регулировочная характеристика преобразователя вместе с системой управления имеет вид типа «люфт», если происходит переход в прерывистый режим, или типа «гистерезис», если режим непрерывен.**

Литература: [1, с. 351 – 370; 3, с. 79 – 100].

Контрольные вопросы

1. Из каких блоков состоит система управления преобразователя (СУП)?
2. Обоснуйте требования предъявляемые к СУП.
3. Что такое СИФУ?

4. В какой момент и почему появляется импульс на выходе СИФУ?
5. Чем определена частота импульсов на выходе СИФУ?
6. От чего зависит вид регулировочных характеристик СУ и преобразователя вместе с СУ?
7. Как влияет на вид регулировочных характеристик введение напряжения смещения?
8. Каков вид регулировочных характеристик реверсивного преобразователя при различных формах опорных напряжениях СУ и различных способах согласования?
9. Почему применяют нелинейное согласование характеристик?

10. Почему при раздельном управлении при $U_{bx} = 0$ угол управления α_0 должен быть больше 90° ?
11. Для чего вводятся ограничения в регулировочной характеристике системы управления и в регулировочной характеристике всего преобразователя вместе с системой управления?

Влияние вентильных преобразователей на питающую приемную сеть, и пути повышения коэффициента мощности

Энергетические характеристики выпрямителей и качество выпрямленного напряжения. КПД. Гармонические составляющие в кривой выпрямленного напряжения и первичного тока. Пульсации. Коэффициент несинусоидальности тока, коэффициент мощности, $\cos \varphi$. Условно 12-фазные схемы. Схемы с переключением отпаек и обмоток трансформатора. Понятие о схемах с искусственной коммутацией и опережающим углом сдвига.

Фильтрокомпенсирующие устройства для уменьшения вредного влияния преобразователей на сеть.

Улучшение качества выпрямленного напряжения. Сглаживающие фильтры. Назначение. Емкостной фильтр. Индуктивный фильтр. Г-образный фильтр. Многозвенные фильтры.

Методические указания.

Обратите особое внимание на этот важный материал. Энергетические показатели выпрямителя – это **коэффициент полезного действия (КПД)**, **коэффициент мощности**, **коэффициент несинусоидальности тока и $\cos\varphi$** . Качество выпрямленного напряжения характеризует **коэффициент пульсаций**.

Преимущества полупроводниковых выпрямителей: высокий КПД и малая зависимость КПД от нагрузки.

С точки зрения улучшения качества выпрямленного напряжения увеличение пульсности выгодно, т.к. увеличивается частота пульсаций и уменьшается их амплитуда. Коэффициент пульсаций резко растет с увеличением угла управления α .

Выпрямители генерируют высшие гармоники и посылают их в сеть. Чем выше пульсность, тем выше частота и меньше амплитуда гармоник, генерируемых в сеть, тем легче с ними бороться. Гармоники первичного тока искажают напряжение сети. Чем выше внутреннее сопротивление сети, тем сильнее искажения. Напряжение в сети становится несинусоидальным.

Недостатки полупроводниковых выпрямителей: уменьшение $\cos\varphi$, коэффициента мощности и ухудшение качества выпрямленного напряжения с ростом глубины регулирования; генерация высших гармоник, ухудшающих качество напряжения в сети.

Снижение содержания гармоник в первичном токе и в выпрямленном напряжении возможно за счет применения условно двенадцатифазной схемы.

Изучите принципы работы схем, повышающих коэффициент мощности.

Фильтры включаются на входе и на выходе преобразователей. Входные фильтры служат для уменьшения вредного влияния преобразователей на питающую сеть. Выходные фильтры улучшают форму выходного напряжения.

Сглаживающие фильтры бывают ёмкостные, индуктивные, Г-образные и др. Обратите внимание на их области применения, преимущества и недостатки.

Литература: [1, с. 327 – 337, 481 – 485; 2, с. 50 – 62; 4, с.133 – 137].

Контрольные вопросы

1. Что такое КПД, и как он определяется в выпрямителях?
2. Как и почему зависит КПД выпрямителя от нагрузки?
3. Что такое коэффициент мощности и к чему приводит его уменьшение?
4. Что такое коэффициент пульсаций, и от чего зависит его величина?
5. От чего зависит частота основной гармоники пульсаций?
6. От чего зависит $\cos\varphi$ выпрямителя?
7. Каковы пути улучшения $\cos\varphi$ выпрямителя?
8. Каковы пути улучшения коэффициента пульсаций?
9. Поясните преимущества условно 12-фазной схемы.
10. Поясните принципы действия известных Вам сглаживающих фильтров.
11. Обоснуйте области применения индуктивного и ёмкостного фильтров.
12. Каково назначение фильтро-компенсирующих устройств?

Преобразователи постоянного напряжения (ППН)

Классификация. Непосредственные преобразователи. ППН на транзисторах и тиристорах. Реверсивные ППН при симметричном и несимметричном управлении и различных видах нагрузки. Двухзвенные ППН.

Методические указания

Преобразователи постоянного напряжения (ППН) предназначены для преобразования постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня с высоким КПД. Иногда их называют конверторами. Они служат для питания нагрузки постоянным напряжением, отличающимся по величине от напряжения источника. ППН делятся по построению на **двуухзвенные** ППН и **непосредственные** ППН, выполненные на основе прерывателей с применением ШИМ. Непосредственные ППН могут быть **понижающими, повышающими и инвертирующими**.

В электроприводах применяют реверсивные ППН, позволяющие менять не только величину, но и знак напряжения на нагрузке. Если транзисторы комплекта включаются и выключаются одновременно, то такой способ управления называется **симметричным**. При этом всегда проводят либо два, либо ни один транзистор. Если выключение происходит не одновременно, то такое управление называется **несимметричным**. При несимметричном управлении все время проводят либо один, либо два транзистора.

При изучении этого материала обратите внимание на принципы действия, регулировочные и внешние характеристики ППН.

Литература: [1, с. 371 – 401; 4, с. 4 – 39].

Контрольные вопросы

1. Какие виды ППН Вы знаете?
2. Поясните преимущества и недостатки непосредственных ППН.
3. Сравните симметричное и несимметричное управление реверсивными ППН.
4. Как происходит переход к торможению при симметричном управлении?
5. Как происходит переход к торможению при несимметричном управлении?
6. От чего зависит наклон внешних характеристик?
7. Что такая регулировочная характеристика преобразователя постоянного напряжения?
8. В чем состоят преимущества двухзвенных ППН?

2.3 Практическое занятие №3 (2 часа).

Тема: «Тиристорные преобразователи напряжения»

2.3.1 Задание для работы:

Рекомендации по выполнению практических работ

Перед выполнением работ все студенты должны изучить правила техники безопасности применительно к лаборатории проводимых занятий, для чего преподавателем проводится инструктаж. Краткий инструктаж проводится также на каждом занятии.

При подготовке к практической работе необходимо:

- 1) ознакомиться с ее содержанием и, пользуясь рекомендованной литературой и конспектом лекций, изучить теоретические положения, на которых базируется работа;

- 2) выполнить предварительные расчеты и построения, указанные в задании для своего варианта;
- 3) изучить схему лабораторной установки и продумать методику выполнения практической работы;
- 4) ответить на контрольные вопросы.

При выполнении практической работы необходимо:

- 1) ознакомиться с рабочим местом, проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводов;
- 2) проверить положение стрелок электроизмерительных приборов и если требуется, установить на нуль; приборы с несколькими пределами измерения включить на наибольший предел;
- 3) произвести сборку схемы;
- 4) после разрешения преподавателя включить питание и приступить к выполнению работы;
- 5) в ходе работы и по ее окончанию полученные данные представлять на проверку преподавателю;
- 6) схему разбирать только после проверки преподавателем результатов опыта (перед разборкой выключить источник питания!);
- 7) по окончании работы привести в порядок рабочее место.

2.3.2 Краткое описание проводимого занятия:

Тиристоры

Устройство и принцип действия. Схемы включения в управляемом выпрямителе и прерывателе постоянного тока. Вольтамперные характеристики. Диаграмма управления. Переходные процессы в тиристорах. Параметры тиристоров. Разновидности тиристоров: симметричные тиристоры, запираемые тиристоры, динисторы. Групповое соединение тиристоров и диодов. Сравнение тиристоров и транзисторов. Применение.

Методические указания.

Наиболее часто **тиристоры применяют в управляемых выпрямителях**. В настоящее время тиристоры являются основными приборами в мощных преобразователях электрической энергии, особенно, в преобразователях связанных с сетью переменного тока. Нужно знать разновидности тиристоров, их принципы действия, ВАХ и схемы включения в устройствах преобразовательной техники. Принцип действия тиристора лучше изучить на двухтранзисторной модели. Основной способ включения тиристора – по управляющему переходу. Чем больше ток управления, тем при меньшем напряжении на аноде включается тиристор. Коэффициент передачи тиристора по току очень велик (тысячи) После включения тиристора ток управления можно прекратить, однако, тиристор будет удерживаться во включенном состоянии. Чтобы выключить тиристор, нужно уменьшить ток в цепи анода до очень малой величины или приложить к нему обратное

напряжение. Таким образом, обычный тиристор – это прибор с **неполной управляемостью**. Возможность выключения – это большое преимущество запираемых тиристоров, но они имеют и существенный недостаток – их коэффициент усиления по току при выключении не превышает 3...4.

Нужно уметь нарисовать схемы для снятия ВАХ тиристоров любого типа на постоянном токе и с помощью осциллографа. Надо знать назначение и уметь пользоваться **диаграммой управления**. Следует уделить внимание переходным процессам в тиристорах. Обратите внимание на **параметры тиристоров**, порядок их величин, зависимость допустимого тока от условий работы тиристора.

Литература: [1, с. 219 – 230; 2, с. 37 – 48].

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия тиристора.
2. Нарисуйте схему простейшего однополупериодного управляемого выпрямителя.
3. Сравните тиристоры и транзисторы по возможностям управления и области применения.
4. Постройте временные диаграммы токов и напряжений в однополупериодном управляемом выпрямителе.
5. Объясните вид анодной ВАХ тиристора.
6. Каково назначение диаграммы управления и как ею пользоваться?
7. От чего и как зависит переходный процесс при включении тиристора?
8. Как протекает процесс выключения тиристора?
9. Почему напряжение на тиристоре не может нарастать слишком быстро?

Преобразователи частоты (ПЧ)

Классификация. Двухзвенные ПЧ. Рекуперация в ПЧ. Двухзвенный ПЧ с обратимым рекуперирующим преобразователем напряжения на входе. Непосредственные ПЧ (НПЧ). Принцип действия НПЧ. Законы управления выходным напряжением. Расчет НПЧ. Сравнение ПЧ.

Методические указания

Преобразователи частоты сейчас особенно актуальны в связи с развитием электропривода переменного тока. Преобразователи частоты для частотно-регулируемых электроприводов преобразуют электроэнергию, поступающую из сети переменного тока, в электроэнергию с меняющейся по заданным законам частотой и напряжением.

Преобразователи частоты по построению могут быть разбиты на 2 типа: **двузвенные преобразователи частоты (ДПЧ)** и **непосредственные преобразователи частоты (НПЧ)**. ДПЧ позволяют получить на выходе частоты как меньшие, так и большие входных.

Регулирование напряжения на выходе ПЧ на основе АИН может осуществляться, как с помощью управляемого выпрямителя, так и с помощью АИН с импульсной модуляцией. Динамическое торможение обеспечивается путем включения параллельно конденсатору фильтра цепи, содержащей тормозной резистор и транзистор. При торможении асинхронного двигателя снижается его скорость и генерируемое им напряжение. Передача энергии в цепь постоянного тока к конденсатору, имеющему более высокое напряжение,

осуществляется за счет перехода АИН в режим выпрямителя напряжения с ШИМ (обращенного АИН), позволяющего повышать напряжение на выходе. Эта схема целесообразна при редких торможениях.

При частых торможениях целесообразна установка в качестве первого звена обратимого рекуперирующего преобразователя напряжения с ШИМ. Так реализуется **симметричный рекуперирующий ДПЧ на основе АИН**. Этот преобразователь является самым идеальным на сегодняшний день для электроприводов с частыми торможениями.

Рекуперация энергии при торможении в ДПЧ на базе АИТ возможна при сохранении направления тока переводом АИТ в режим выпрямления, а управляемого выпрямителя на входе в режим инвертирования.

Каждая фаза НПЧ выполняется на основе реверсивного двухкомплектного преобразователя с раздельным или совместным управлением комплектами. Возможны **два закона управления - прямоугольный и синусоидальный**. Преимущества НПЧ – однократное преобразование энергии, позволяющее получить более высокий КПД, однотипность применяемых вентилей. Недостатки НПЧ - низкая предельная частота, низкий коэффициент мощности.

Литература: [1, с. 462 – 475; 4, с. 112 – 126].

Контрольные вопросы

1. Сравните двухзвеный и непосредственный преобразователи частоты.
2. Что такое регулировочная (частотная) характеристика преобразователя частоты?
3. Какой вид и почему имеет регулировочная (частотная) характеристика преобразователя частоты для электропривода?
4. Как снять внешнюю характеристику?
5. Как снять регулировочную (частотную) характеристику?
6. Как определить КПД АИН?
7. Как определить КПД преобразователя частоты?
8. Как выглядит внешняя характеристика первого звена двухзвенного преобразователя частоты?
9. Назначение элементов силовой схемы преобразователя частоты.

Преобразователи переменного напряжения

Классификация. Принципы построения. Законы управления выходным напряжением. Сравнение.

Методические указания

Преобразователи переменного напряжения (регуляторы переменного напряжения) предназначены для изменения величины переменного напряжения.

Обратите внимание на **законы управления и энергетические показатели**. Усвойте область применения преобразователей переменного напряжения в электроприводе.

Литература: [1, с. 476 – 480; 4, с. 127 – 132].

Контрольные вопросы

1. *Классификация преобразователей переменного напряжения и способов их управления.*

2. Принцип действия преобразователя при фазовом и широтно-импульсном управлении.
3. Сравните способы регулирования переменного напряжения по энергетическим показателям?
4. Укажите область применения фазового регулирования в электроприводе.

2.4 Практическое занятие №4 (1 час).

Тема: «Стабилизаторы постоянного напряжения»

2.4.1 Задание для работы:

Рекомендации по выполнению практических работ

Перед выполнением работ все студенты должны изучить правила техники безопасности применительно к лаборатории проводимых занятий, для чего преподавателем проводится инструктаж. Краткий инструктаж проводится также на каждом занятии.

При подготовке к практической работе необходимо:

- 1) ознакомиться с ее содержанием и, пользуясь рекомендованной литературой и конспектом лекций, изучить теоретические положения, на которых базируется работа;
- 2) выполнить предварительные расчеты и построения, указанные в задании для своего варианта;
- 3) изучить схему лабораторной установки и продумать методику выполнения практической работы;
- 4) ответить на контрольные вопросы.

При выполнении практической работы необходимо:

- 1) ознакомиться с рабочим местом, проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводов;
- 2) проверить положение стрелок электроизмерительных приборов и если требуется, установить на нуль; приборы с несколькими пределами измерения включить на наибольший предел;
- 3) произвести сборку схемы;
- 4) после разрешения преподавателя включить питание и приступить к выполнению работы;
- 5) в ходе работы и по ее окончанию полученные данные представлять на проверку преподавателю;
- 6) схему разбирать только после проверки преподавателем результатов опыта (перед разборкой выключить источник питания!);
- 7) по окончании работы привести в порядок рабочее место.

2.4.2 Краткое описание проводимого занятия:

Преобразователи постоянного напряжения (ППН)

Классификация. Непосредственные преобразователи. ППН на транзисторах и тиристорах. Реверсивные ППН при симметричном и несимметричном управлении и различных видах

нагрузки. Двухзвенные ППН.

Методические указания

Преобразователи постоянного напряжения (ППН) предназначены для преобразования постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня с высоким КПД. Иногда их называют конверторами. Они служат для питания нагрузки постоянным напряжением, отличающимся по величине от напряжения источника. ППН делятся по построению на **двузвенные** и **непосредственные** ППН, выполненные на основе прерывателей с применением ШИМ. Непосредственные ППН могут быть **понижающими, повышающими и инвертирующими**.

В электроприводах применяют реверсивные ППН, позволяющие менять не только величину, но и знак напряжения на нагрузке. Если транзисторы комплекта включаются и выключаются одновременно, то такой способ управления называется **симметричным**. При этом всегда проводят либо два, либо ни один транзистор. Если выключение происходит не одновременно, то такое управление называется **несимметричным**. При несимметричном управлении все время проводят либо один, либо два транзистора. При изучении этого материала обратите внимание на принципы действия, регулировочные и внешние характеристики ППН.

Контрольные вопросы

1. Какие виды ППН Вы знаете?
2. Поясните преимущества и недостатки непосредственных ППН.
3. Сравните симметричное и несимметричное управление реверсивными ППН.
4. Как происходит переход к торможению при симметричном управлении?
5. Как происходит переход к торможению при несимметричном управлении?
6. От чего зависит наклон внешних характеристик?
7. Что такое регулировочная характеристика преобразователя постоянного напряжения?
8. В чем состоят преимущества двухзвенных ППН?

Автономные инверторы (АИ)

Классификация и принципы построения. АИ тока, напряжения и резонансные.

Сравнение АИ. Автономные инверторы с одноступенчатой коммутацией.

Параллельный автономный инвертор тока (АИТ). Пути улучшения характеристик АИТ. Автономный инвертор напряжения (АИН). Резонансный АИ. АИН с двухступенчатой коммутацией. Трехфазный мостовой АИН на транзисторах.

Способы регулирования напряжения в АИН. АИН с широтно-импульсной модуляцией. Методы расчета АИ.

Методические указания.

В настоящее время в связи с развитием электропривода переменного тока автономные инверторы приобретают особую актуальность. **Автономные инверторы (АИ)** – это, преобразователи постоянного тока в переменный, которые работают на сеть, в которой нет других источников электроэнергии. Коммутации вентилей в них осуществляются благодаря применению полностью управляемых вентилей или устройств искусственной коммутации. При этом частота на выходе АИ определяется частотой управления, а напряжение – параметрами нагрузки и системой регулирования.

Автономные инверторы (АИ) классифицируются по ряду признаков.

1. По виду входного тока или напряжения АИ делятся на:

- а) автономные инверторы тока (АИТ).** На входе АИТ действует источник тока, образованный источником ЭДС и большой индуктивностью, форма тока на выходе вентильной группы прямоугольная, а форма напряжения определяется характером нагрузки;
- б) автономные инверторы напряжения (АИН).** На выходе АИН действует источник ЭДС, напряжение на выходе вентильной группы прямоугольное, а форма тока определяется характером нагрузки;
- в) резонансные (колебательные) автономные инверторы (РАИ).** РАИ – это инвертор, на входе и на выходе вентильной группы которого ток прерывистый, а форма напряжения на выходе определяется нагрузкой.

2. По применяемым вентилям АИ делятся на:

- а) АИ на вентилях с неполным управлением (обычных тиристорах);
- б) АИ на вентилях с полным управлением (транзисторах и запираемых тиристорах).

3. По способу коммутации АИ на незапираемых тиристорах делятся на:

- а) АИ с одноступенчатой коммутацией;
- б) АИ с двухступенчатой коммутацией.

4. По месту включения коммутирующего конденсатора АИ с одноступенчатой коммутацией делятся на:

- а) параллельные АИ;
- б) последовательные АИ.

Обратите особое внимание на принципы построения, временные диаграммы, методы расчета и характеристики АИТ и АИН.

Недостаток АИТ – плохая внешняя характеристика.

Существует много схем АИН. Однако, наибольшее применение в электроприводе переменного тока получила трехфазная мостовая схема на полностью управляемых (транзисторах или запираемых тиристорах) вентилях. В этой схеме управляемые вентили могут работать с длительностью открытого состояния $l = 120^\circ$ и $l = 180^\circ$. При угле проводимости вентилей $l = 180^\circ$ обеспечивается непрерывная связь фаз нагрузки с источником питания и лучшая форма напряжений на выходе, независимая от параметров нагрузки. Это обусловило более широкое применение такого управления. Регулирование напряжения на выходе АИН может осуществляться с помощью импульсной модуляции. Из импульсных методов регулирования выходного напряжения наибольшее распространение получила широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Частота модуляции должна быть хотя бы на порядок выше, чем наибольшая частота выходного напряжения. При **широтно-импульсной модуляции (ШИМ)** одновременно обеспечивается регулирование напряжения на выходе АИН и изменение его по синусоидальному закону. **АИН на IGBT транзисторах** в настоящее время являются наиболее перспективным видом АИ.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие ведомого и автономного инвертора?
2. По каким схемам могут выполняться автономные инверторы?

3. По каким признакам классифицируются автономные инверторы? Чем отличается автономный инвертор напряжения от автономного инвертора тока?
4. От каких параметров и как зависит время t_δ в автономных инверторах тока и напряжения?
5. Объясните вид внешних характеристик автономных инверторов тока и напряжения.
6. Как зависит напряжение на выходе автономных инверторов тока и напряжения от частоты?
7. Каково назначение элементов C_k , L_d в тиристорных автономных инверторах тока и напряжения?
8. Как снимаются внешние характеристики автономных инверторов?
9. Как изменить частоту выходного напряжения автономного инвертора?
10. Зачем в инверторах напряжения включаются обратные диоды?
11. Почему выходное напряжение в инверторе тока может быть больше, чем входное?
12. Что такое опрокидывание инвертора и каковы его причины?
13. Как прервать аварийный ток при опрокидывании инвертора?
14. Какими элементами отличаются автономные инверторы напряжения, выполненные на полностью и неполностью управляемых вентилях?
15. Какой аварийный режим возникает при сбросе нагрузки до холостого хода в автономном инверторе тока?

Стабилизаторы напряжения и тока

Основные параметры. Параметрические стабилизаторы. Непрерывные стабилизаторы. Импульсные стабилизаторы. Стабилизаторы в интегральном исполнении. Непрерывные стабилизаторы.

Методические указания

Основные статические параметры стабилизатора напряжения – **коэффициент стабилизации и выходное сопротивление**.

Стабилизаторы делятся на: параметрические и компенсационные.

Компенсационные стабилизаторы по способу регулирования напряжения делятся на: **непрерывные и импульсные**.

Преимущества импульсного стабилизатора: меньшие потери, а, следовательно, более высокий КПД и меньшие габариты.

Преимущества непрерывного стабилизатора: выше качество стабилизации, меньше пульсации.

Контрольные вопросы

1. Из каких элементов состоит импульсный и непрерывный стабилизаторы постоянного напряжения? Назначение элементов.
2. Сравните ключевой и линейный режимы работы транзистора.
3. Преимущества и недостатки импульсных и непрерывных стабилизаторов.
4. До какого предела можно уменьшать напряжение источника питания, чтобы напряжение на выходе понижающего стабилизатора еще могло оставаться стабильным?

5. Как определить КПД стабилизатора?

Источники вторичного электропитания (ИВЭП) для систем управления и автоматики

Требования, предъявляемые к ИВЭП. Принципы построения ИВЭП.

Бестрансформаторные источники питания.

Методические указания

Источники вторичного питания преобразуют переменное или постоянное напряжение от первичных источников в переменное или постоянное напряжение для вторичных.

ИВЭП бывают двух типов: бестрансформаторные источники питания и централизованные стабилизаторы постоянного напряжения.

В них используются регулируемые автономные инверторы напряжения малой мощности. Обратите внимание на особенности этих преобразователей.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение ИВЭП?
2. Опишите варианты структурных схем бестрансформаторных источников питания.
3. Какие особенности схем автономных инверторов, применяемых в ИВЭП?
4. Что такое ККМ?