

## Введение

В данном курсе лекций рассматриваются преобразовательные устройства, которые служат для преобразования переменного тока в постоянный (выпрямители), преобразования постоянного тока в переменный (инверторы), для преобразований частоты и других целей.

Наиболее важным и распространенным является преобразование переменного тока в постоянный ток. Исторически выпрямители развивались в следующем порядке.

1. Вращающиеся преобразователи: двигатели – генераторы и одноякорные преобразователи.
2. Ионные (ртутные) преобразователи.
3. Полупроводниковые преобразователи на полупроводниковых диодах.

Промышленные полупроводниковые преобразователи, широкое применение которых началось в конце 50-ых годов, выполнялись на базе германиевых, а позднее кремниевых диодов. Для регулирования напряжения использовались дроссели насыщения с подмагничиванием постоянным током.

4. Полупроводниковые преобразователи на управляемых полупроводниковых вентилях.

Появление тиристоров резко расширило возможность использования преобразовательных устройств для автономного преобразования постоянного тока в переменный (автономные инверторы) и преобразования частоты (преобразователи частоты).

Параметры преобразовательных устройств весьма различны. Различны и предъявляемые к ним требования, а также режимы и условия их работы. Выпрямленный ток установок изменяется в широком диапазоне от единиц ампер до сотен тысяч ампер, а выпрямленное напряжение от десятков до сотен тысяч вольт.

Разнообразны требования и к режиму регулирования. Так большая группа установок работает при нерегулируемом выпрямленном напряжении. Наряду с этим на других установках требуется не только регулирование напряжения, но и преобразование постоянного тока в переменный ток. Существенен для работы преобразовательных устройств также и характер графика нагрузки – от совершенно ровного (электролиз) до резкого неравномерного (тяга).

Диапазон параметров устройств зависимого инвертирования также как и выпрямительных устройств очень обширен: от нескольких ампер до десятков тысяч ампер, от десятков вольт до сотен тысяч вольт.

Диапазон параметров автономных инверторов более скромный. Максимальные токи и напряжения редко превосходят нескольких тысяч ампер и несколько сотен вольт.

При проектировании преобразовательных устройств необходимо составить рациональную общую схему со стороны как переменного так и постоянного тока, определить параметры и число рабочих и резервных преобразователей, выбрать коммутационную, защитную и контрольную аппаратуру, составить схему регулирования, схему вспомогательных устройств и собственных нужд. Все перечисленные вопросы должны решаться не изолированно друг от друга, а совместно, преследуя общую цель – создание установки определенного назначения, обеспечивающую максимальную экономичность и нужную для конкретных условий степень надежности при минимальных затратах. Для правильного решения необходимо принять во внимание ряд факторов: особенности питающей сети переменного тока, график нагрузки, степень требуемой потребителем бесперебойности, особенности заданного режима работы преобразователей, условия эксплуатации и, наконец, условия размещения оборудования.

Анализ электромагнитных процессов в преобразовательных устройствах и разработка на этой основе методов расчета схем преобразователей является главным содержанием курса «Основы преобразовательной техники».

Методика расчета преобразователей малой мощности несколько отличается от методики расчета преобразователей большой мощности, что объясняется специфическими особенностями этих устройств, но электромагнитные явления в них имеют один и тот же характер. Анализ электромагнитных процессов производится на основе метода анализа нелинейных и в большинстве случаев линейных электрических цепей.

В настоящее время широко применяются преобразователи с регулированием и стабилизацией напряжения, тока, частоты. При этом регулирование и стабилизация режима питания предполагает наличие устройств автоматически поддерживающих заданную величину тока, напряжения или частоты при изменении внешних условий. В преобразовательных устройствах предусматривается средства выполняющие вспомогательные операции: пуск, защиту, коммутацию и т.д.

Существующие типы преобразователей электрического тока (напряжения) могут быть представлены в виде двух структурных схем, показанных на рисунках В.1 и В.2.

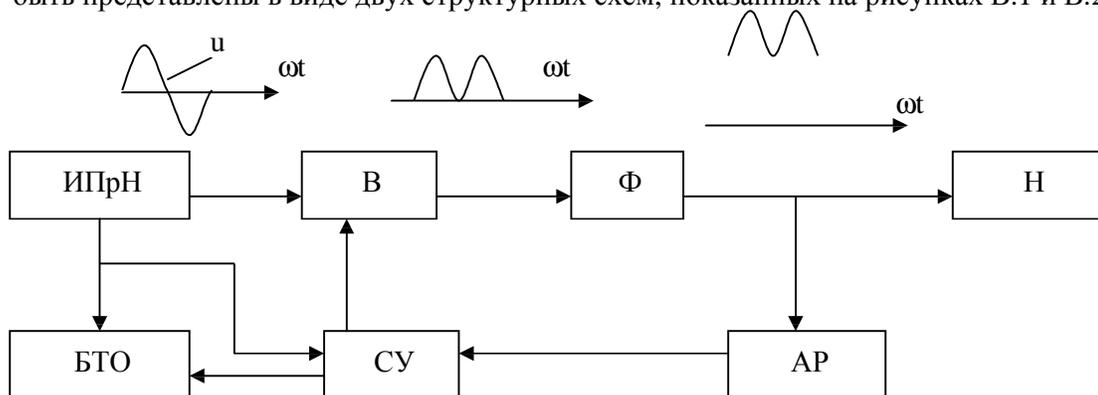


Рис.В.1. Структурная схема с замкнутой системой преобразования переменного напряжения в постоянное.

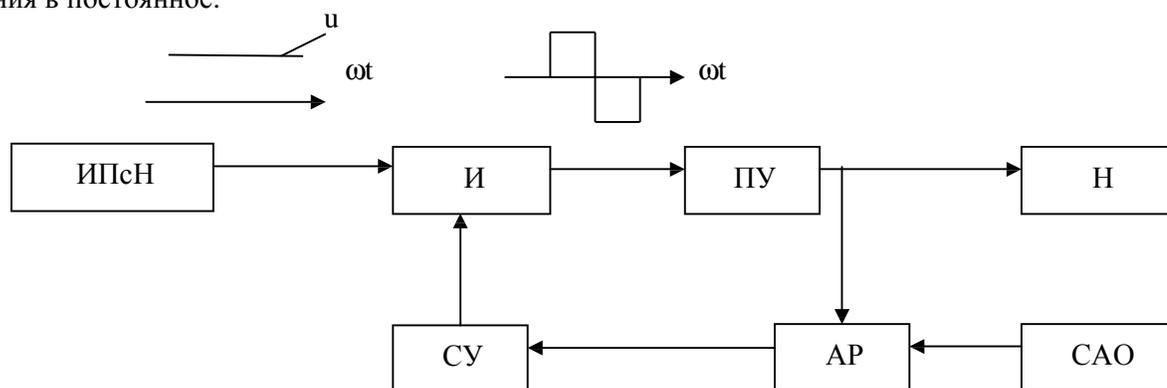


Рис.В.2. Структурная схема замкнутой системы преобразования постоянного напряжения в переменное.

На рис.В.1 изображена замкнутая система преобразования и автоматического регулирования постоянного напряжения. В этой системе в напряжение источника переменного напряжения (ИПрН) с помощью выпрямителя (В) преобразуется в пульсирующее напряжение одного знака, которое потом сглаживается фильтром (Ф) до приемлемого для нагрузки (Н) уровня. Цепь обратной связи (ОС) состоит из автоматического регулятора (АР) и системы управления (СУ) может осуществлять либо стабилизацию, либо автоматическое регулирование напряжения на нагрузке согласно программе, которая заложена в программное устройство (ПУ). Для ограничения токов КЗ при аварийных режимах работы

выпрямителя предусмотрен блок токовой отсечки (БТО) который через систему управления ограничивает ток до безопасного уровня.

На рис.В.2 представлена замкнутая система преобразования и автоматического регулирования переменного напряжения. Система осуществляет преобразование постоянного напряжения от источника (ИПсН) с помощью инвертора (И) в переменное напряжение, которое через промежуточное устройство (ПУ) подводится к нагрузке. ПУ согласует инвертор с нагрузкой. Оно включает в себя фильтры по переменному току, компенсаторы, а также элементы обеспечивающие устойчивую работу инвертора при изменении нагрузки, выходной частоты и напряжения.

Обратная связь осуществляется автоматическим регулятором АР и системой управления СУ, в которую входит генератор управляемых импульсов, преобразователь фаз и генератор задающей частоты. В схеме также имеется система аварийного отключения САО, с помощью которой производится отключение инвертора при аварийных режимах работы.

На основе описанных структурных схем могут быть построены системы преобразования электрического тока без цепей обратной связи (например, разомкнутая система преобразования и регулирования постоянного напряжения, представленная на рис. В3, где С - стабилизатор). А также более сложные преобразователи, осуществляющие преобразование постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня, преобразование переменного напряжения одной частоты в переменное напряжение другой частоты.

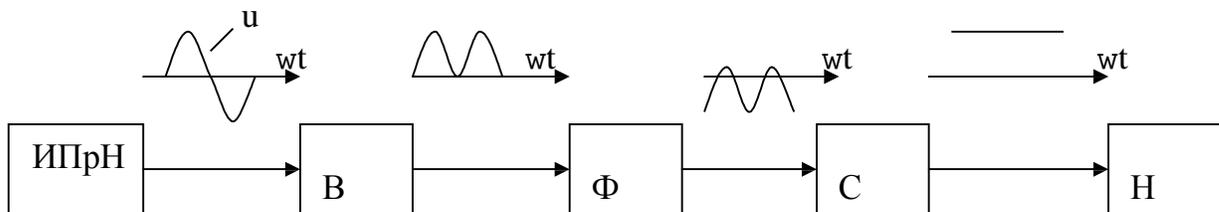


Рис.В3. Структурная схема разомкнутой системы преобразования переменного напряжения в постоянное.

В курсе “Основы преобразовательной техники” основное внимание уделяется анализу электромагнитных процессов таких устройств как выпрямители, регуляторы, электрические фильтры, стабилизаторы, инверторы и другие. Системы электропитания в целом, как замкнутые или разомкнутые системы автоматического регулирования рассматриваются в другом курсе.

Разработка новых полупроводниковых преобразователей во многом определяется успехами в развитии полупроводниковых приборов. В современных условиях развитие полупроводниковых приборов складывается в основном из двух направлений:

- а) совершенствование технологических способов изготовления приборов с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных показателей;
- б) разработка принципиально новых приборов.

Особое внимание уделяется разработке и совершенствованию мощных приборов, работающих как переключатели электрического тока (тиристоры, силовые транзисторы, запираемые тиристоры). Такие приборы при незначительных потерях могут управлять огромными мощностями, подводимыми к нагрузке, что открывает широкие перспективы для их применения в различных областях техники, где требуется высокоэффективное регулирование режимов работы потребителя.

Силовые полупроводниковые преобразовательные устройства выпускаются на малые, средние и большие мощности, поэтому они используются для электролиза на химических и алюминиевых предприятиях для тяговых подстанций, для электрифицированного железнодорожного транспорта, для регулируемого электрического привода, для пита-

ния различного рода подъёмников, лифтов, в бортовых системах электропитания различного назначения и т.д.

Среди разнообразных требований, предъявляемых к преобразователям, общими являются обеспечение максимального коэффициента полезного действия и коэффициента мощности отдельных узлов и элементов, а также максимальной надёжности и устойчивости. Полупроводниковые преобразующие устройства наиболее качественно удовлетворяют перечисленным требованиям. Они отличаются малыми габаритами и весом, потребляют очень малую мощность управления, их коэффициент управления превышает 100000. Они почти безынерционны. Отсутствие подвижных частей, возможная универсальность создания отдельных блоков преобразователей открыли широкую возможность их применения.

### Контрольные вопросы

1. Назовите в какой последовательности развивались преобразователи.
2. В чём заключается задача проектирования преобразовательного устройства?
3. В чём заключается содержание курса “Основы преобразовательной техники”?
4. Нарисуйте структурную схему преобразователя напряжения.
5. Назовите направления развития полупроводниковых приборов.
6. Перечислите достоинства полупроводниковых преобразователей.

## Раздел 1. Неуправляемые выпрямители однофазного тока.

### *Лекция №1 Назначение, классификация, основные характеристики выпрямителей.*

Выпрямитель – это электротехническое устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное.

Основными элементами полупроводниковых выпрямителей являются трансформатор и вентили, с помощью которых обеспечивается одностороннее протекание тока в цепи нагрузки, в результате чего переменное напряжение преобразуется в пульсирующее. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения к выходным зажимам выпрямителя подключают электрический сглаживающий фильтр. Для регулирования или стабилизации выпрямленного напряжения и тока потребителя к выходным зажимам фильтра подключают регулятор или стабилизатор (стабилизатор может быть включён и на стороне переменного тока выпрямителя).

Структурная схема выпрямителя с фильтром и стабилизатором приведена на рис.В3.

Режимы работы и параметры отдельных элементов выпрямителя, фильтра, регулятора и стабилизатора согласуются с заданными условиями работы потребителя постоянного тока, поэтому основная задача теории выпрямительных устройств сводится к определению расчётных соотношений, позволяющих по заданному режиму работы потребителя определить электрические параметры элементов стабилизатора, регулятора, фильтра, а также вентиля и трансформатора выпрямителя и затем произвести выбор этих элементов по каталогу или, если это необходимо, рассчитать их.

## Классификация выпрямителей

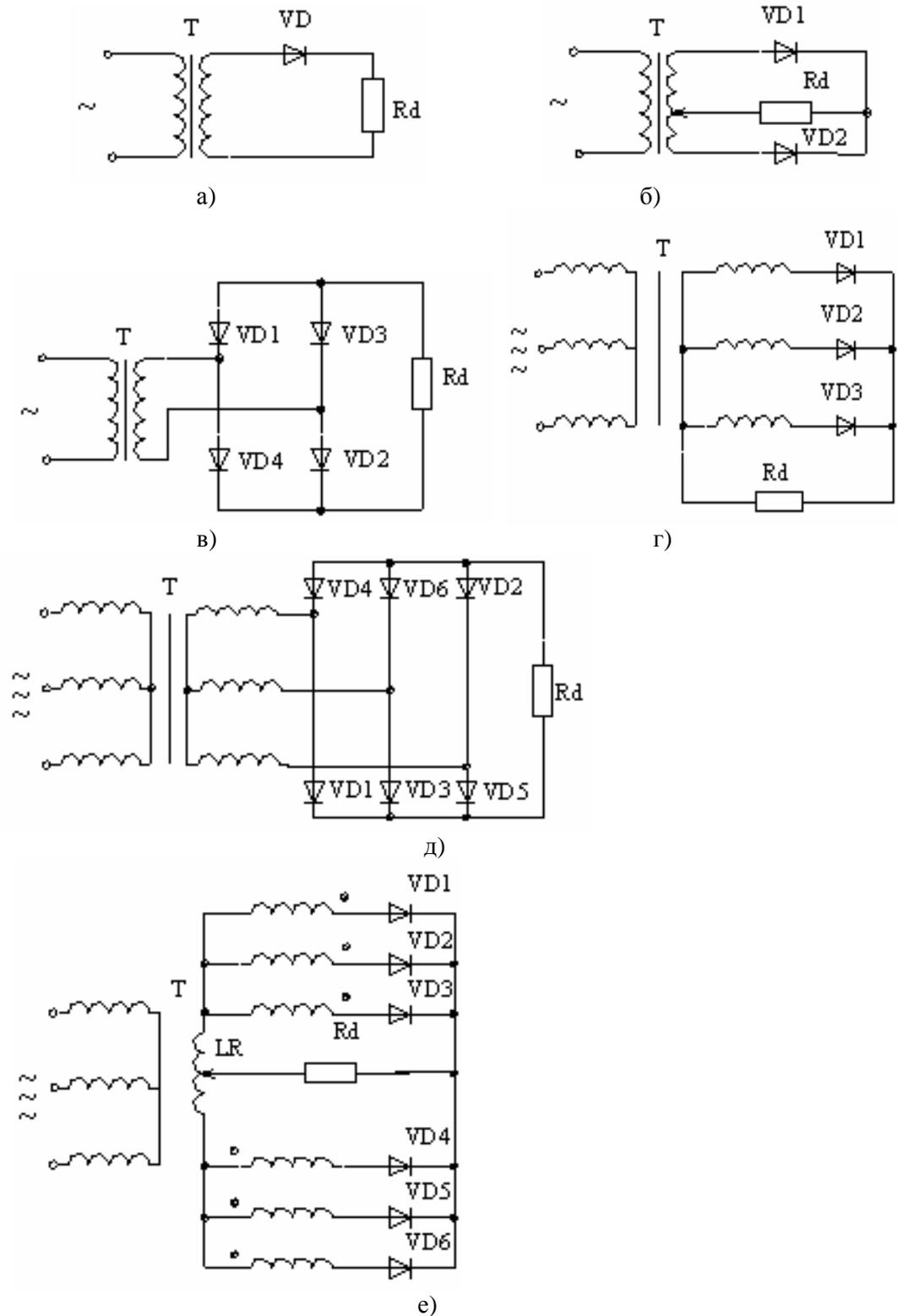


Рис.1.1. Основные схемы выпрямителей:

- а) однофазного однополупериодного;      б) однофазного с нулевым выводом;  
 в) однофазного мостового;                      г) трёхфазного с нулевым выводом;  
 д) трёхфазного мостового;  
 е) двойного трёхфазного с уравнивающим реактором.

Схемы выпрямителей классифицируют по ряду признаков (рис.1.1).

1. В зависимости от числа фаз питающего источника переменного напряжения различают схемы однофазного (рис.1.1 а, б, в) и трёхфазного (рис.1.1 г, д, е) питания.

2. В зависимости от количества импульсов тока, протекающего за полный период по вторичным обмоткам трансформатора:

а) Однотактные – ток протекает один раз за полный период. Отношение частоты пульсаций выпрямленного напряжения ( $m_{\Pi}$ ) к частоте сети в однотактных схемах равно числу фаз вторичной обмотки трансформатора. В таких схемах кроме простейшего однофазного однополупериодного выпрямителя обязательно выводится нулевая точка трансформатора (рис.1.1 а, б, г).

б) Двухтактные – в каждой фазе вторичной обмотки трансформатора ток протекает дважды за один период, причём в противоположных направлениях. Кратность пульсаций выпрямленного напряжения в таких схемах в 2 раза больше, чем число фаз вторичной обмотки трансформатора. Эти схемы также называют мостовыми (рис.1.1 в, д). В мостовых схемах ток во вторичной цепи всегда проходит последовательно по двум вентилям.

3. По степени сложности:

а) простые (рис.1.1 а – д);

б) сложные – несколько простых схем выпрямителей соединяют последовательно или параллельно (рис.1.1 е).

4. По числу пульсаций за период питающего напряжения:

а) с однофазными пульсациями (рис.1.1 а);

б) с двухфазными пульсациями (рис.1.1 б, в);

в) схема с трёхфазными пульсациями (рис.1.1 г);

г) схемы с четырёхфазными пульсациями;

д) схемы с шестифазными пульсациями (рис.1.1 д, е);

е) схемы с двенадцатифазными и более пульсациями. Представляют собой последовательное и параллельное соединения предыдущих схем.

5. В зависимости от назначения выпрямители могут быть управляемыми и неуправляемыми.

Возможны различные модификации схем выпрямителей: с включением вторичной обмотки трансформатора в треугольник, в зигзаг, несимметричные схемы, схемы с нагрузкой шунтированной диодом и др.

Эксплуатационные характеристики выпрямителей

1. Среднее значение выпрямленного напряжения и тока  $U_d, I_d$ .

2. Коэффициент полезного действия (КПД) –  $\eta$ ;

3. Коэффициент мощности –  $\cos \phi$ ;

4. Внешняя характеристика выпрямителя – зависимость  $U_d=f(I_d)$ ;

5. Регулировочная характеристика для управляемых выпрямителей  $U_d=f(\alpha)$ , где  $\alpha$  – угол управления (регулирования);

6. Коэффициент пульсаций:

$$K_{\Pi} = \frac{U_m(q)}{U_d},$$

где  $q$  – номер гармоники,

$U_m$  – амплитуда напряжения.

7. Коэффициент искажения:

$$n = \frac{I_{1(1)}}{\sqrt{I_{1(1)}^2 + I_{1(2)}^2 + \dots + I_{1(q)}^2 + \dots}},$$

где  $I_{1(1)}$  – действующее значение основной гармоники первичной обмотки трансформатора,

$\sqrt{I_{1(1)}^2 + I_{1(2)}^2 + \dots + I_{1(q)}^2 + \dots}$  – полный ток первичной обмотки трансформатора.

8. Величина и длительность протекания допустимого прямого тока перегрузки.
9. Эксплуатационные и экономические характеристики вентилей: срок службы, стоимость и надёжность.

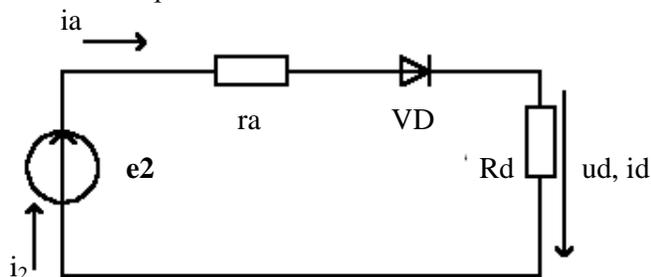
### Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен выпрямитель?
2. Перечислите основные элементы выпрямителя и их назначение.
3. Сформулируйте основную задачу теории выпрямительных устройств.
4. По каким признакам классифицируют выпрямители?
5. Перечислите эксплуатационные характеристики выпрямителей.

### Лекция № 2. Однофазные однополупериодные выпрямители.

Принципиальная схема однофазного однополупериодного выпрямителя приведена на рисунке 1.1.а. Рассмотрим режим  $r_a \neq 0$ ,  $L\gamma = 0$ ,  $r_a$  – активное сопротивление обмоток трансформатора,  $L\gamma$  – индуктивность рассеяния трансформатора.

На рисунке 2.1 приведена эквивалентная схема выпрямителя, а на рисунке 2.2 – временные диаграммы.



Эквивалентная схема выпрямителя

Рис. 2.1

ЭДС вторичной обмотки трансформатора:

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t).$$

$$\text{Интервал } 0 < \omega t < \pi: i_d = i_2 = \frac{E_{2m}}{R_d + r_a} \sin(\omega t).$$

$$\text{Интервал } \pi < \omega t < 2\pi: i_d = i_2 = 0.$$

Величина  $\frac{E_{2m}}{R_d + r_a} = I_{ам}$  – максимальное значение выпрямленного тока.

Выпрямленное напряжение:  $u_d = R_d i_d = \frac{E_{2m} R_d}{R_d + r_a} \sin(\omega t) = \eta_a E_{2m} \sin(\omega t) = U_{dm} \sin(\omega t)$ ,

где  $\eta_a = R_d / (R_d + r_a)$  – условный КПД анодной цепи,

$U_{dm} = E_{2m} \eta_a$  – максимальное значение выпрямленного напряжения.

Среднее значение выпрямленного напряжения (постоянная составляющая):

$$U_d = \frac{1}{2p} \int_0^{2p} u_d(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{2p} \int_0^p U_{dm} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_{dm}}{2p} [-\cos(\omega t)]_0^p = \frac{U_{dm}}{2p} [-\cos p + \cos 0] =$$

$$= \frac{U_{dm}}{2p} (1 + 1) = \frac{U_{dm}}{p} = \frac{h_a}{p} E_{2m} = h_a E_d ;$$

$E_d = E_{2m} / \pi$  – ЭДС выпрямителя (напряжение холостого хода).

Среднее значение выпрямленного тока (а также тока вентиля)  $I_d = I_a = U_d / R_d = I_{am} / \pi$ .

Действующее значение анодного тока вентиля:

$$I_{a \text{ эфф.}} = \sqrt{\frac{1}{2p} \int_0^{2p} i_d^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2p} \int_0^p I_{am}^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t)} = I_{am} / \sqrt{2} = \frac{p}{2} I_d = \frac{E_{2m}}{2(R_d + r_a)} ;$$

Максимальное обратное напряжение на вентиле:  $U_{\text{обр. макс.}} = E_{2m} = \frac{p}{h_a} U_d$ .

По найденным величинам  $I_a$ ,  $I_{am}$ ,  $I_{a \text{ эфф.}}$  и  $U_{\text{обр. макс.}}$  выбирают вентиль.

Согласно полученным данным, вентиль должен допускать амплитудное значение тока и максимальное напряжение, по крайней мере, в  $\pi$  раз превышающее среднее значение тока и напряжения на нагрузке.

Без вывода запишем формулу для амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения:

$$U_{m(1)} = U_{dm} / 2 = \frac{p}{2} U_d.$$

Коэффициент пульсации по гармонике номер  $q$ :  $K_{n(q)} = U_{m(q)} / U_d$ ,

где  $U_{m(q)}$  – амплитудное значение гармоники номер  $q$ .

Коэффициент пульсации по первой гармонике:  $K_{n(1)} = U_{m(1)} / U_d = 1.57$ ,

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора:  $I_2 = I_{a \text{ эфф.}} = I_{am} / \sqrt{2} = \frac{p}{2} I_d$ .

Действующее значение ЭДС вторичной обмотки трансформатора:

$$E_2 = E_{2m} / \sqrt{2} = \frac{p}{\sqrt{2} h_a} U_d = 2.22 U_d / \eta_a.$$

Расчётная мощность вторичной обмотки трансформатора:

$$S_2 = I_2 E_2 = \frac{2.22}{h_a} U_d \frac{p}{2} I_d = 3.49 \frac{P_d}{h_a},$$

где  $P_d = U_d I_d$  – мощность постоянных составляющих выпрямленного напряжения и тока.

Без вывода запишем формулу для действующего значения тока первичной обмотки трансформатора:  $I_1 = 1.21 k I_d$ ,

где  $k = w_1 / w_2$ .

Расчетная мощность первичной обмотки:

$$S_1 = U_1 I_1 = \frac{E_2}{k} 1.21 k I_d = 2.69 \frac{P_d}{h_a}$$

Расчётная (типовая) мощность трансформатора:

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = 3.09 \frac{P_d}{h_a}$$

Коэффициент использования трансформатора по мощности:

$$K_p = P_d / S_T = \eta_a / 3.09 = 0.324 \eta_a$$

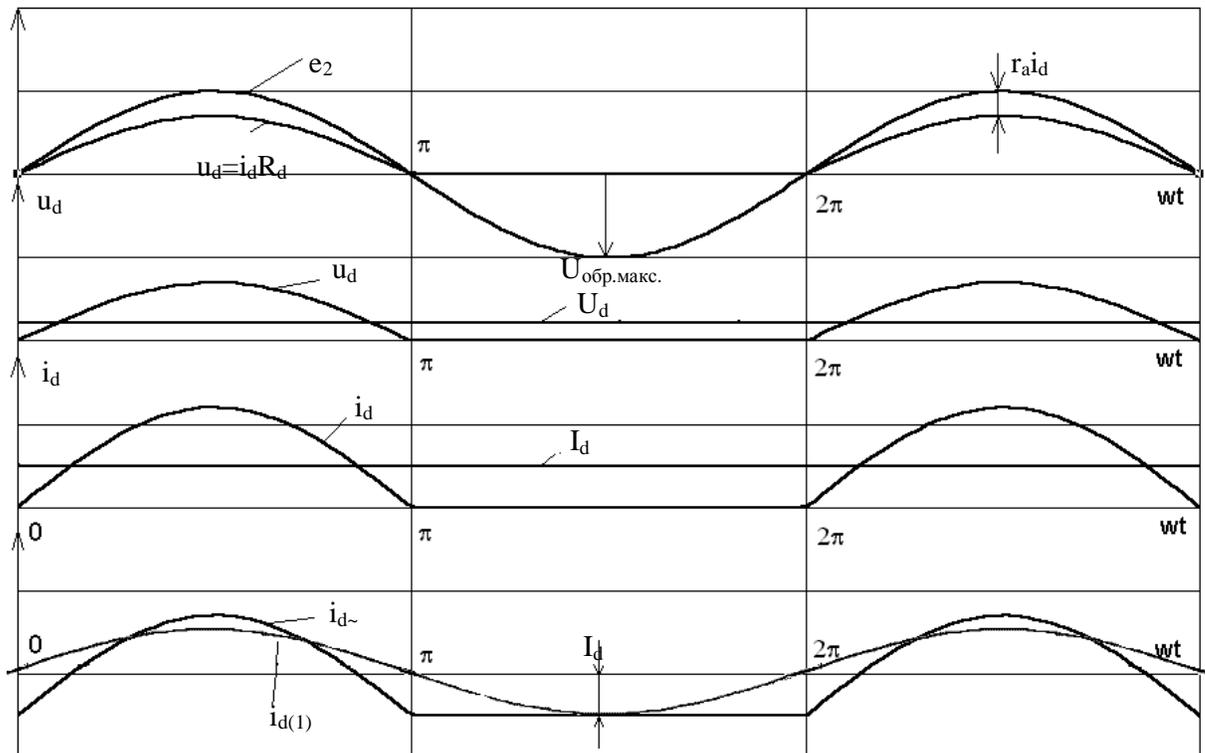


Рис.2.2. Временные диаграммы напряжений и токов.

$i_d$  – выпрямленный ток;  $I_d$  – постоянная составляющая выпрямленного тока;  $i_{d\sim}$  – переменная составляющая выпрямленного тока;  $i_{d(1)}$  – первая гармоника выпрямленного тока.

Полный коэффициент мощности выпрямителя в общем виде:

$$\chi = P_{a1} / S_1,$$

где  $P_{a1} = \sum_{q=1}^{q=n} U_{1(q)} \cdot I_{1(q)} \cdot \cos \varphi_{(q)}$  - активная мощность первичной обмотки, пред-

ставляет собой среднее значение мощности переменного тока за период и определяется как сумма активных мощностей отдельных гармонических составляющих тока;

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = \sqrt{U_{1(1)}^2 + \dots + U_{1(q)}^2 + \dots} \cdot \sqrt{I_{1(1)}^2 + \dots + I_{1(q)}^2 + \dots}$$

- полная мощность первичной обмотки;

где  $U_1$  - полное действующее значение напряжения на первичной стороне трансформатора;

$I_1$  - полное действующее значение тока на первичной стороне трансформатора.

Если полагать, что напряжение сети есть синусоидальная функция, то:

$$P_{a1} = U_1 \cdot I_{1(1)} \cdot \cos j_{(1)},$$

следовательно, коэффициент мощности:

$$c = \frac{U_1 \cdot I_{1(1)} \cdot \cos j_{(1)}}{U_1 \cdot \sqrt{I^2_{1(1)} + \dots + I^2_{1(q)} + \dots}} = n \cdot \cos j_{(1)},$$

$$\text{где } n = \frac{I_{1(1)}}{\sqrt{I^2_{1(1)} + \dots + I^2_{1(q)} + \dots}} - \text{коэффициент искажения;}$$

$\varphi_{(1)}$ - угол сдвига фаз между напряжением сети и первой гармоникой тока первичной обмотки трансформатора.

В рассматриваемом случае (активная нагрузка)  $\varphi_{(1)}=0$ , но коэффициент мощности меньше единицы, так как  $v < 1$ . Это является одной из причин вызывающих увеличение размера трансформатора.

Активная мощность выпрямленного тока вычисляется как среднее значение мощности пульсирующего тока за период:

$$P_{ad} = \frac{1}{2p} \int_0^{2p} U_d \cdot i_d \cdot d(\omega t) = I^2_2 \cdot R_d = \frac{P^2}{4} \cdot P_d,$$

т.е. мощность  $P_{ad}$  больше мощности постоянных составляющих выпрямленного тока и напряжения, примерно в 2,5 раза, что также является причиной увеличения размеров трансформатора.

В сердечнике трансформатора за счет постоянной составляющей тока вторичной обмотки, создается добавочный постоянный магнитный поток, насыщающий сердечник трансформатора. Это явление принято называть вынужденным намагничиванием трансформатора. В результате насыщения магнитопровода, намагничивающий ток трансформатора возрастает в несколько раз, по сравнению с током при нормальном режиме намагничивания. Возрастание намагничивающего тока связано с увеличением сечения провода первичной обмотки и размеров трансформатора в целом.

Уравнение внешней характеристики имеет вид:

$$U_d = E_d - r_a \cdot I_d,$$

$$\text{где } I_d = \frac{E_d}{R_d + r_a}.$$

### Контрольные вопросы.

1. Нарисуйте эквивалентную схему и временные диаграммы однофазного, однополупериодного выпрямителя.
2. Напишите формулу для расчета среднего значения выпрямленного напряжения однофазного, однополупериодного выпрямителя.
3. Напишите уравнение внешней характеристики однофазного, однополупериодного выпрямителя.
4. По каким величинам выбирается вентиль?
5. Напишите соотношение между расчетной (типовой) мощностью трансформатора и активной мощностью нагрузки  $P_d$ .
6. Перечислите недостатки однофазного, однополупериодного выпрямителя.
7. Перечислите причины увеличения типовой мощности трансформатора по сравнению с мощностью постоянных составляющих тока и напряжения.