

МИНОБРНАУКИ РОССИИ



Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

---

В. Д. Латышко  
А. Н. Прокшин

## **СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
2016

Конспект лекций по дисциплине «Силовая Электроника»/Сост.: В.Д. Латышко, А.Н.Прокшин СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018, 104 с.

Излагаются принципы преобразования электрической энергии: выпрямления, инвертирования, преобразования частоты и др. Описаны основные схемы преобразовательных устройств, способы управления ими и регулирования основных параметров, показаны области рационального использования различных типов преобразователей.

Конспект лекций по дисциплине «Силовая электроника» предназначен для бакалавров по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профилю «Электропривод и автоматика».

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016

© Латышко В.Д., 2016

© Прокшин А.Н., 2016

### **Аннотация**

Излагаются принципы преобразования электрической энергии: выпрямления, инвертирования, преобразования частоты и др. Описаны основные схемы преобразовательных устройств, способы управления ими и регулирования основных параметров, показаны области рационального использования различных типов преобразователей.

Конспект лекций по дисциплине «Силовая электроника» предназначен для бакалавров по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профилю «Электропривод и автоматика».

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Введение, приборы силовой электроники, классификация силовых полупроводниковых приборов</b>	<b>3</b>
1.1	Описание дисциплины Силовая Электроника . . . . .	3
1.2	Силовые полупроводниковые приборы . . . . .	4
1.3	Классификация силовых полупроводниковых преобразователей электрической энергии . . . . .	6
1.4	Выпрямители . . . . .	11
1.5	Элементы защиты . . . . .	15
1.6	Требования ключевого режима . . . . .	16
1.7	Основные типы полупроводниковых приборов . . . . .	16
1.8	Вольт-амперная характеристика . . . . .	17
<b>2</b>	<b>Основные схемы силовых полупроводниковых преобразователей</b>	<b>18</b>
2.0.1	нулевая однофазная однополупериодная схема . . .	22
2.0.2	мостовая схема . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Схемы выпрямителей</b>	<b>29</b>
3.1	нулевые схемы выпрямителей . . . . .	32
3.1.1	Однофазная нулевая схема . . . . .	32
3.1.2	симметричная двухфазная схема . . . . .	33
3.1.3	Двухполупериодная однофазная нулевая схема . . .	33
3.1.4	вариант схема умножения . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Внешние характеристики преобразователей, прерывистый режим, регулировочные характеристики</b>	<b>39</b>
4.0.1	регулировочные характеристики . . . . .	48
4.0.2	Прерывистый режим работы преобразователя . . .	53
4.0.3	Внешние характеристики $\alpha = const$ . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Реверсивные преобразователи</b>	<b>60</b>
5.0.1	реверсивные преобразователи . . . . .	60
5.0.2	классификация реверсивных тиристорных преобразователей . . . . .	61

5.0.3	Контактный реверсор . . . . .	61
5.0.4	бесконтактный ключ . . . . .	62
5.0.5	перекрестная схема . . . . .	63
5.0.6	Эквивалентная схема замещения реверсивного тиристорного преобразователя . . . . .	68
5.0.7	Принципы построения отдельной системы управления . . . . .	74
5.0.8	Функциональная схема отдельного управления . .	76
5.0.9	Внешние характеристики реверсивных преобразователей . . . . .	78
5.0.10	Пульсации выпрямленного напряжения и тока . . .	80
<b>6</b>	<b>Энергетические характеристики тиристорных преобразователей</b>	<b>86</b>
6.0.1	Энергетические характеристики тиристорных преобразователей . . . . .	86
6.0.2	Энергетические реки: . . . . .	90
6.0.3	Коэффициент мощности . . . . .	90
<b>7</b>	<b>Непосредственные преобразователи частоты</b>	<b>97</b>
7.0.1	Непосредственные преобразователи частоты . . . .	97

## Глава 1

# Введение, приборы силовой электроники, классификация силовых полупроводниковых приборов

### 1.1 Описание дисциплины Силовая Электроника

Дисциплина называется Силовая Электроника. Также есть синонимы Силовая Преобразовательная техника, Энергетическая электроника.

Кафедра РАПС – первая в стране кафедра электропривода. Дисциплина начиналась с Промышленной электроники. Электронные приборы и устройства. Есть наука о приборах и устройствах, нелинейных.

Промышленная электроника – это продолжение ТОЭ в область нелинейных устройств. Может быть недостаточно для современного специалиста. Может оказаться недостаточно

приборы

электрические цепи

электронные устройства

управление, хранение, обработка информации

Дисциплина относится к силовым устройствам

- Генераторы Г
- Двигатели М
- Трансформаторы Т
- UZ – преобразователи электрической энергии из одного вида в другой.

Какие параметры электрической энергии известны?:

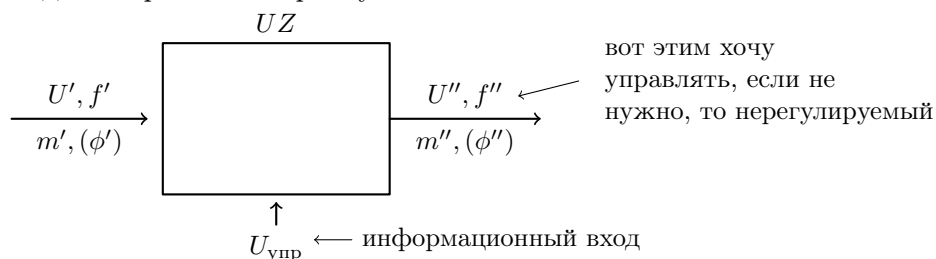
- $U_{mo}$  в розетке
- $U$
- $f$
- число фаз
- “Форма”

$G$  преобразует механическую энергию в электрическую. Аккумулятор не зарядишь переменным током. Электролиз – алюминий из бокситов, требует постоянного тока. Управление скоростью двигателей в производстве.

Чего в мире больше:  $G$ ,  $M$ ,  $T$ ,  $UZ$ ? Лифт не круглосуточный, предприятия ночью не работают.  $G$  не загружены полностью.  $T$  – по мощности больше всего. В среднем от одного  $G$  до потребителя 3.5  $T$  трансформатора. 6,10,35kV.

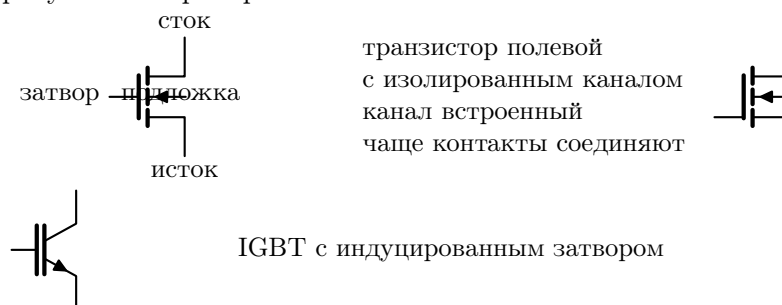
Электропривод, управляющий механизм. Электролиз, гальваника.

Задан вопрос на который у самого нет ответа.



## 1.2 Силовые полупроводниковые приборы

Нарисую УГО прибора:

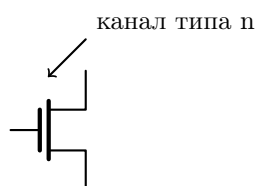
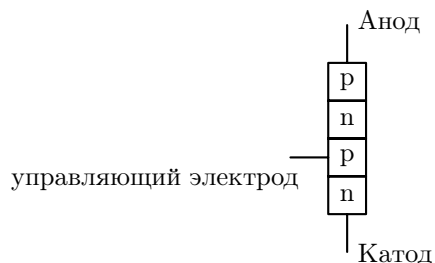


Я знаю, что читали приборы. Приборы надо знать, надо знать их характеристики, как ими пользоваться.

Чем силовые полупроводниковые приборы отличаются от несиловых: мощность, габариты.



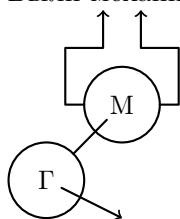
запираемый тиристор



В течении двух недель изучить по любому учебнику по СПП (силовые полупроводниковые приборы). По программе ну отведено ни одного часа.

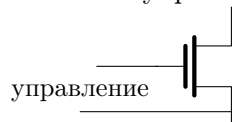
Силовые полупроводниковые приборы начали применяться с середины XX века. До этого были ионные приборы, электровакуумные. Чем они были хуже будем оценивать с точки зрения силовой электроники. Допустим, что нет никаких приборов, ни ионных, ни электровакуумных на планете.

Были механические преобразователи



И получу на выходе, что что мне нужно:  $\mathcal{E} \rightarrow M \rightarrow \mathcal{E}$ . У силовых преобразователей КПД самый главный параметр. В компьютере всё по-другому.

Что такое управляемый прибор?

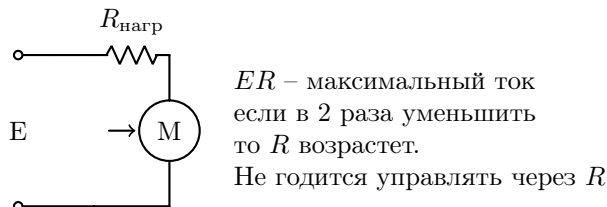


Сопротивление меняется, можно плавно регулировать, значит  $R$  меняется, значит не могу силовой прибор использовать.

Чем отличается ЭДС от напряжения? В розетке ЭДС или напряже-



ние. Напряжением будем считать ЭДС + плюс падение на внутреннем сопротивлении.



*Все полупроводниковые приборы должны работать в ключевом режиме – железное правило*

Как во всяком правиле есть исключения: если мощность не очень большая.

Неразумно отводить мощность от полупроводникового прибора(ПП), поэтому используется ключевой режим.

Импульсный режим 0,100,0,100 – 50%

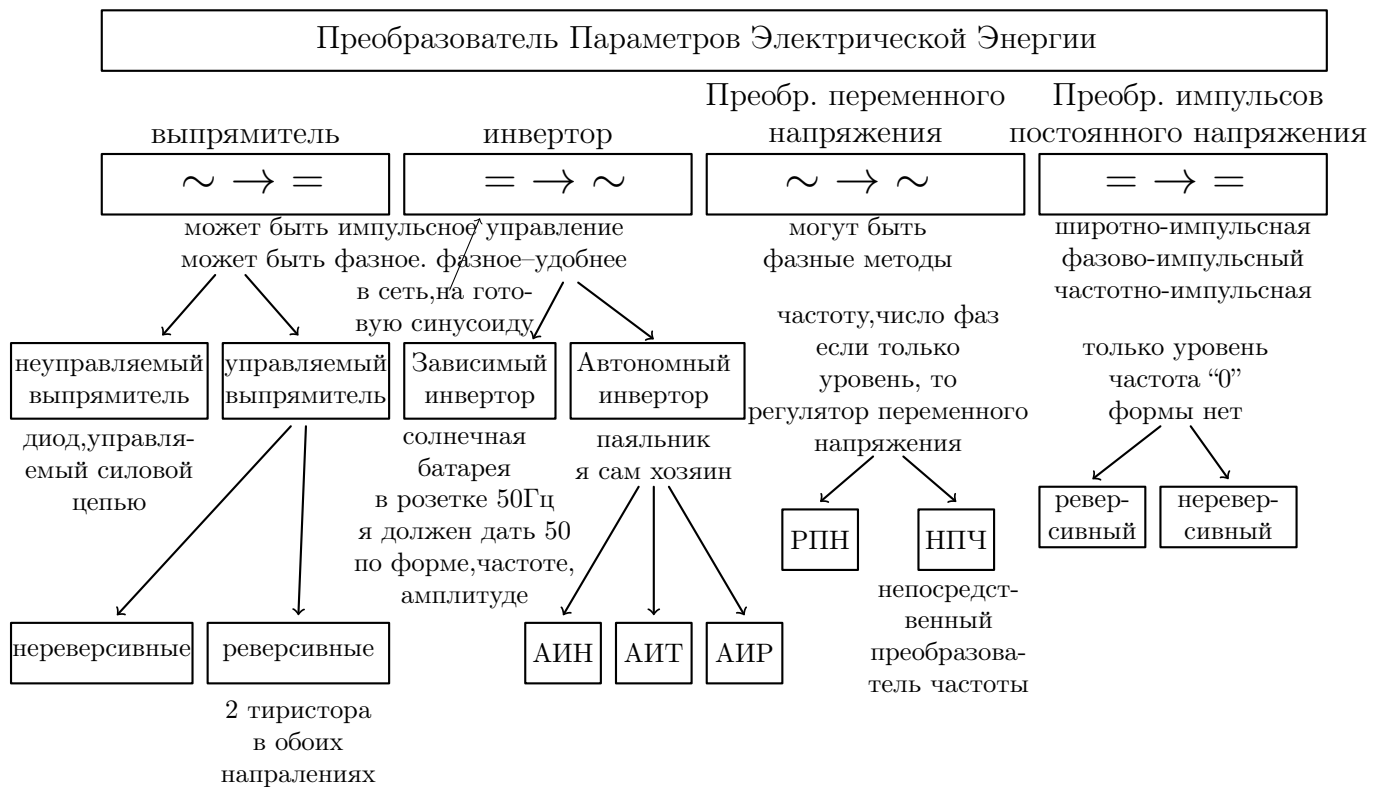


500 Герц

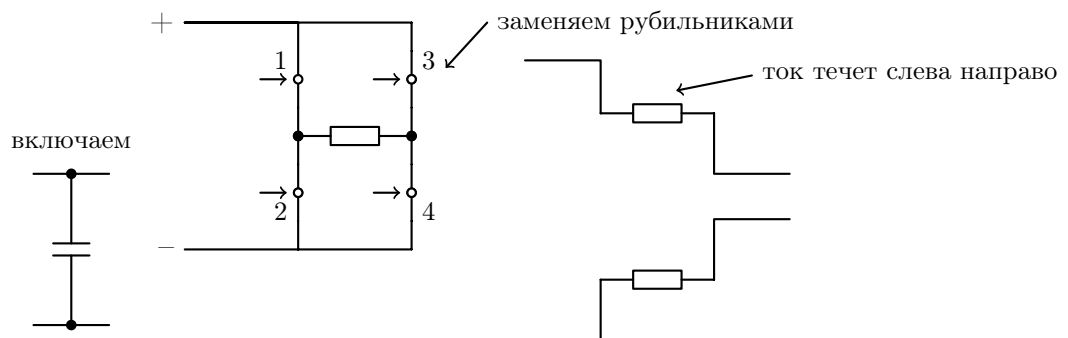
Таким фильтром обычно является сама нагрузка. Если этого не хватает, то добавим фильтр.

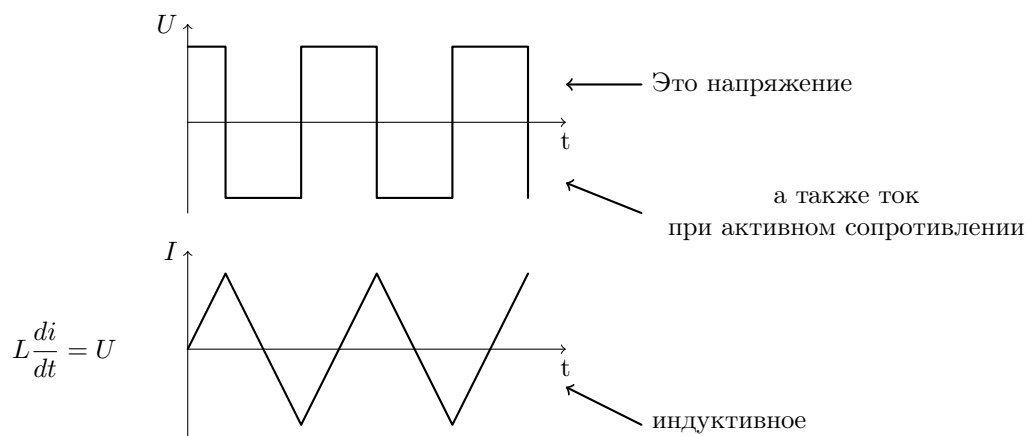
### 1.3 Классификация силовых полупроводниковых преобразователей электрической энергии

Существует много классификаций, в основу кладется тот или иной классификационный признак. Мы сделаем классификацию на основе противопоставления переменного и постоянного тока. Выпрямитель напряжения или тока? Немного нефизично.  $I$  – производить основную работу(ампер-часы). Но  $U$  является средством получения тока. Так что можно говорить и то и другое.



АИН – формирует на выходе кривую напряжения. АИТ – формирует на выходе кривую тока. Помним, что все приборы работают в ключевом режиме.

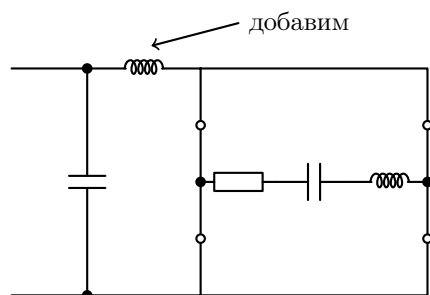




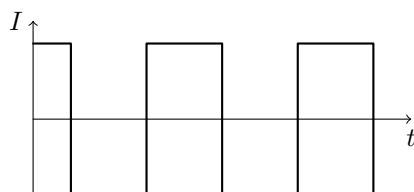
Конденсатор ставить в качестве нагрузки нельзя

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad \frac{du}{dt} = \infty$$

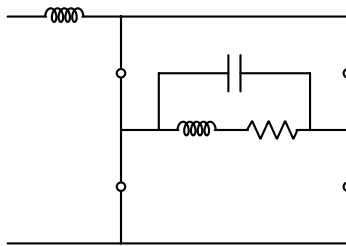
Если нельзя, но очень хочется то можно



Включаем в нагрузку. Ток в этой индуктивности

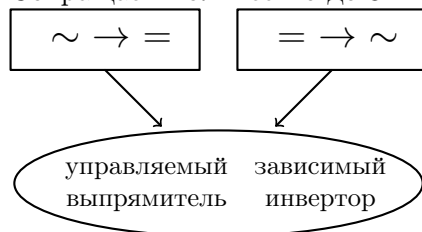


Если вставили индуктивность на входе, то теперь индуктивность в нагрузку нельзя. Если на входе индуктивность, то индуктивность в нагрузку нельзя.



АИР(автономный инвертор резонансный) резонансного типа. Для нашей специальности не очень подходит. Резонансный – значит частоту изменить не можем. Применяется для закалки стали.

Сокращаем количество до 8ми. Генераторы → Моторы.



Если энергия пошла в обратную сторону. Рассмотрим управляемый выпрямитель.

НПР ↔ Реверсивный выпрямитель. При одном направлении тока, а если поставить второй транзистор. И ток и напряжение можно инвертировать.

Переменное напряжение  $\sim$  – это постоянное, которое меняется по уровню и направлению.

50  $\sim$   $\approx$   $\sim$  500

Непосредственный – это не 2х ступенчатый преобразователь (преобразователь частоты со звеном постоянного тока).

Это классификация одноступенчатых преобразователей.

НПЧ – одноступенчатый преобразователь!

Реверсивный постоянного ↔ АИН. Осталось 8, но это неполная классификация.

$\boxed{= \rightarrow =}$  – по квадрантам.

Другие классификационные признаки, выбирается параметр, по нему идет классификация.

2-й параметр) по типам силовых полупроводниковых приборов.

неуправляемые – диоды

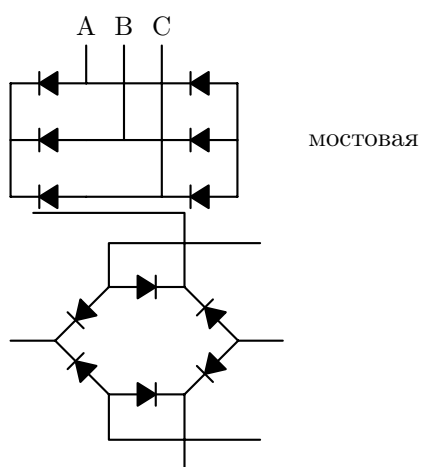
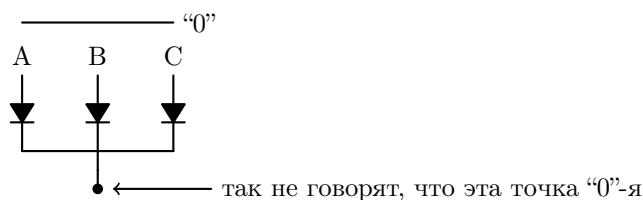
управляемые – однозначно тиристоры

Транзисторов достаточно много. Тиристор – отпираемые, незапираемые по управляющему току семистор.

3-й параметр) – тип силовой схемы.

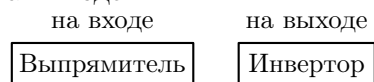
- нулевые схемы – трансформаторы с выводом “0”-й точки.  
 мостовые – содержат две нулевых. (Одна схема – объединены катоды, другая – аноды)

кольцевые  
 комбинированные



4-й признак

С трансформатором или нет. Трансформатор может быть на входе и на выходе.



5-й признак – число фаз

6-й признак – по уровню напряжения >1000 Вольт В последних гостах по среднему уровню напряжения 6|10|35 kV.

7-й признак – по назначению.

- для возбуждения
- для зарядки (электрокары)
- для гальваники

8-й признак – по конструктивному обозначению

- IR – защитная оболочка от окружающей среды
- IR=0 – открытое
- IR=23
- IR=65 – пыле-влаго

Классификация, на нее буду ссылаться

По приборам или перейти к первому типу.

Диоды	Тиристоры	Транзисторы
обычные	обычные	биполярные
быстровосста-	симметричные(симисторы)	униполярные
навливающиеся	запираемые	pn переходом
Шотки		с изолированным затвором
		со встроенным
		с индуцированным

Варисторы, стабилитроны(кремнивые ограничители). Везде делает-ся акцент на большую мощность.

9-й признак – диапазон мощности современных устройств от заряд-ки телефона, до линий передач постоянным током  $10^4$ , была линия  $10^5$  Вольт.

$$U \quad 10^0..10^4 \text{В}$$

$$I \quad 10^{-2}..10^4 \text{А}$$

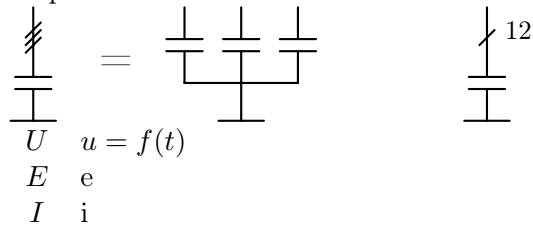
$$P \quad 10^{-1}..10^6-10^7 \text{Вт}$$

$$T \quad 0;0.50,100,200,400 \text{Гц}..10^4 \quad (10^5 \text{Hz})$$

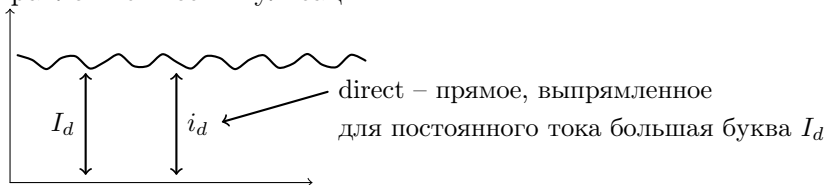
$10^5$  используется несущая частота, а не рабочая частота. — доли мик-рогенри, 1MGz – это сопротивление значительное.

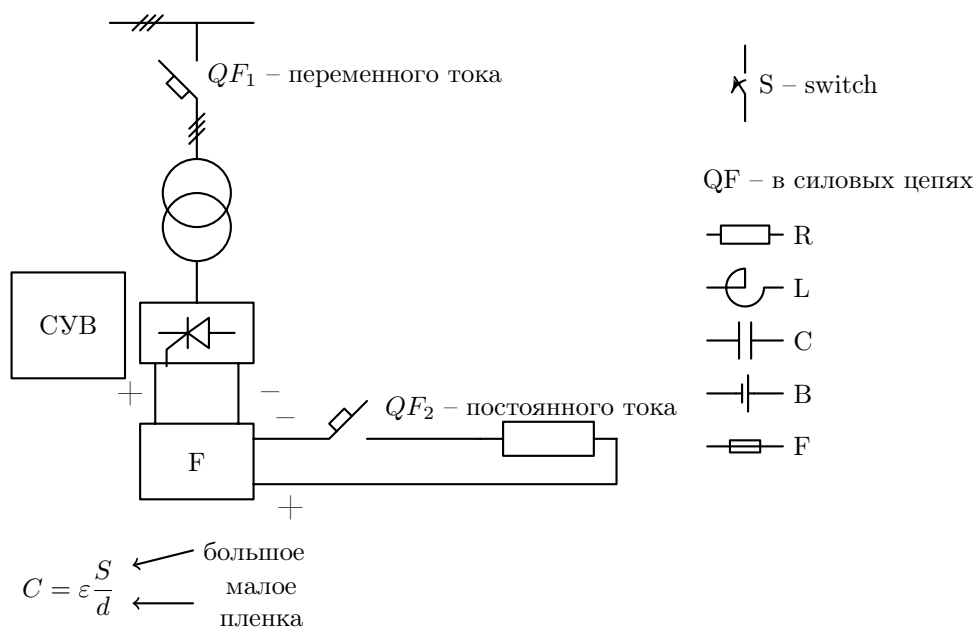
## 1.4 Выпрямители

Установки большой мощности всегда трехфазные. В квартирах разво-дятся так, чтобы напряжение было приблизительно одинаковые в сред-нем для разных фаз. Будем использовать однолинейное изображение многофазных сетей

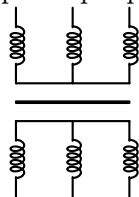


$I$  – действующее или среднеквадратичное значение. Постоянное по направлению и есть пульсации.





Электролитический конденсатор пропитан проводящим раствором создается пленка. Выключатели по включению по часовой стрелке. Трансформаторы рисуют так:



VB – выпрямительный блок. На выходе выпрямителя есть фильтр.

СУВ – система управления выпрямителя, включает в себя диагностику, измерения, сигнализацию, контроль, защиты.

Назначение трансформатора:

- Т – изменяет уровни напряжения

$$U_1 \rightarrow U_2$$

- Т – преобразование числа фаз.

$$m_2 \rightarrow m_1$$

- гальваническая развязка
- сопротивление К.З.; ограничение тока короткого замыкания Т.К.З. Электрические аппараты должны быть устойчивы к токам К.З. Чтобы К.З. не развивалось. Не должно приводить к выводу других приборов.

Есть термическое, динамическое, всё это  $I_{КЗ}^2$ .

$I_{КЗ} = 100$ , нагрев  $10^4$

Специальные токоограничивающие реакторы.

$I_{КЗ} \approx$  кратен  $I_{ном}$  5..10..15 раз.

Рассмотрим производственное помещение, превышение 5..10..15 раз в трансформаторе, а для станков это много.

Т, вернее его  $R$  – естественный ограничитель, в некоторых случаях можно выбросить. Если нужен только токоограничитель, то ставим токоограничивающий реактор.



СУВ = СИФУ – система импульсно-фазового управления. Реализуется теми же программными средствами в микроконтроллере. выходной сигнал. через усилитель мощности подается сигнал.

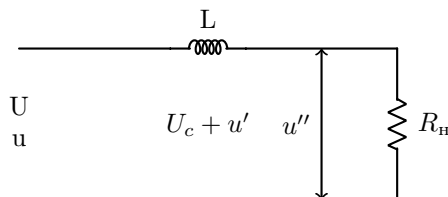
Фильтр: Всегда задаю вопрос, что такое

$R$  – коэффициент пропорциональности  $\frac{U}{I}$   
 $L$  – коэффициент пропорциональности  $\frac{\Psi}{I} = \frac{\omega\Phi}{I}$   
 $C$  –  $\frac{q}{U}$

Любая из этих величин философская, физическая.  $R$  – это потери! В нашем случае КПД на первом месте!

- $L$
- $C$
- $L-C$
- $C-L$  Г-образная
- $C-L-C$  Т-образная

Основные характеристики фильтра: Во сколько раз снижается пульсаций.



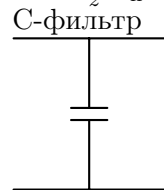
Обмотка возбуждения генератора это хорошо?



Коэффициент сглаживания фильтра  $= \frac{u''}{u'}$

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

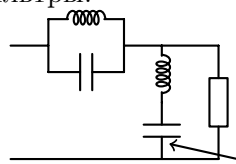
Отсюда коэффициент сглаживания фильтра =  
 $K = \frac{u'}{\frac{u'}{Z} R_n} = \frac{Z}{R_n} = \sqrt{1 + (\omega T)^2} \approx \omega T$ , при  $\omega T = 4$



Пульсация до установки на пульсацию после. Фильтр будет хорошо действовать когда будут диоды, будет их запирасть.

Коэффициент сглаживания фильтров – самостоятельно. Зарисовать схемы.

Это классические реактивные фильтры. Существуют резонансные фильтры.



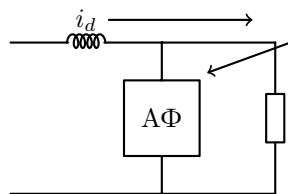
для остальных частот добавим Фильтр-пробка

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Теоретически задержит полностью. Он эффективен только на одной частоте.  $\omega_{\text{рез}}$  – здесь на резонансной частоте сопротивление 0

В последнее время применяют активные фильтры.

Активный генератор переменной составляющей:



в противофазе добавляем  
 $i' = i''$

Это тоже что и резонансный фильтр, но <имеет собственный источник энергии>. Это тоже преобразователь.

Д.з. – транзисторы и фильтры.

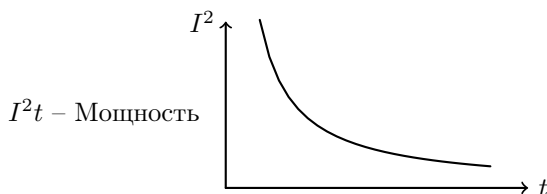
## 1.5 Элементы защиты

L и C выдержит пока не горит изоляция. Основной элемент ПП - кристалл очень малых размеров

Трансформатор, реактор, мотор можно перегружать в десятки раз. ПП – граммы. Защита по току очень важна.

ПП – прочность обратного рп-перехода ограничена. Малое время для защиты по току (быстродействующая защита). А по напряжению защита нет. Если перенапряжение состоялось, то всё распространяется со скоростью света. Защита по напряжению, по недопущению перенапряжения.

Из-за малой теплоемкости по току защита  $10^{-3} \dots 10^{-2}$ . Существуют быстродействующие плавкие предохранители.



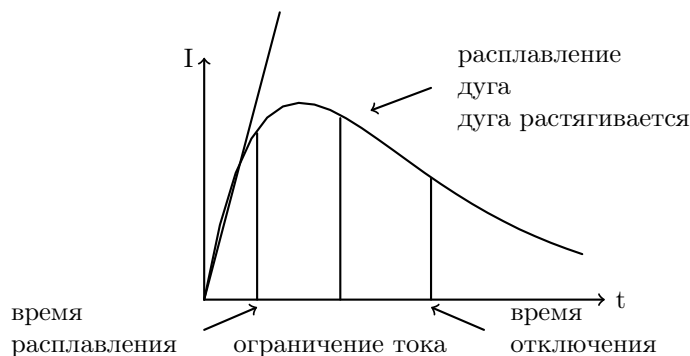
Обычные плавкие предохранители олово+медь. Используется плавкая вставка из технического серебра 99.9% техническое чистое серебро (драгоценный, но не благородный металл). Плавкая вставка должна быть меньше чем ПП, чтобы быстро сгорела – она должна быть горячей в нормальном режиме.

$$W = \left( \int I^2 dt \right)_{\text{тиристора}} > W_{\text{предохранителя}}$$

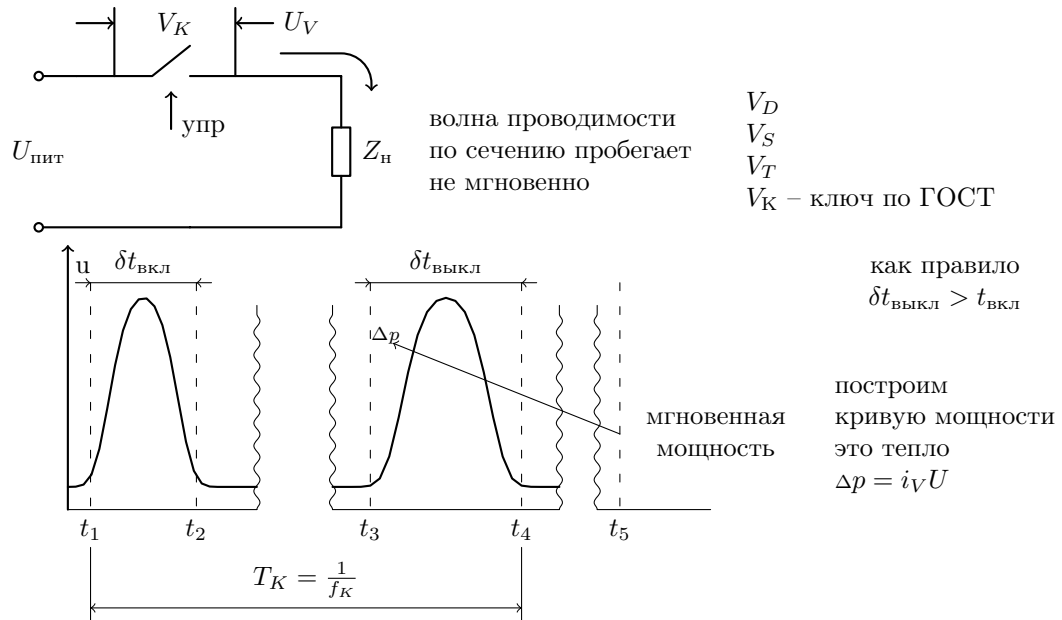
В этом случае тиристор может выдержать.

Все зависит от отношения

$$\frac{I^2 R}{c} \leftarrow \begin{array}{l} \text{– мощность} \\ \text{– теплоемкость} \end{array}$$



## 1.6 Требования ключевого режима



Энергия в секунду = мощность.

$\Delta P = \frac{w}{T_K}$  – энергия в сек, мощность.

$$= f_K \int_{t_1}^{t_1+T_K} U_V i_V dt$$


где  $f_K$  – энергия потерь на переключении.


- мощность, выделяемая в открытом состоянии
- мощность в закрытом состоянии

1)  $\gg$  2)


Чем больше частота, тем больше потери, но частоту нужно повышать.

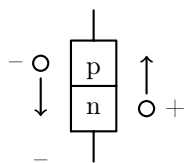
## 1.7 Основные типы полупроводниковых приборов

Приборы неуправляемые – диоды 

стабилитроны 

КСОН – кремниевый стабилизированный ограничитель напряжения.

варисторы 

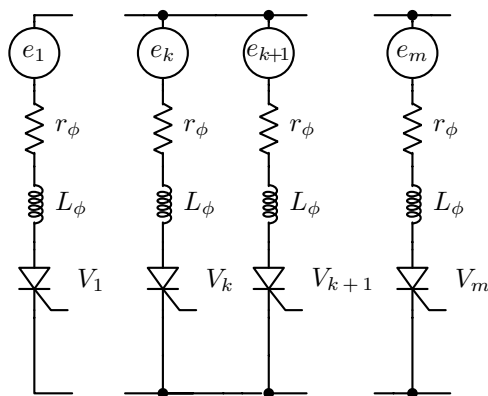



транзисторы	{	МДП	–	метал-диэлектрик-полупроводник
		МОП	–	метал-оксид-полупроводник
		униполярные		
		с изолированным затвором		

## 1.8 Вольт-амперная характеристика

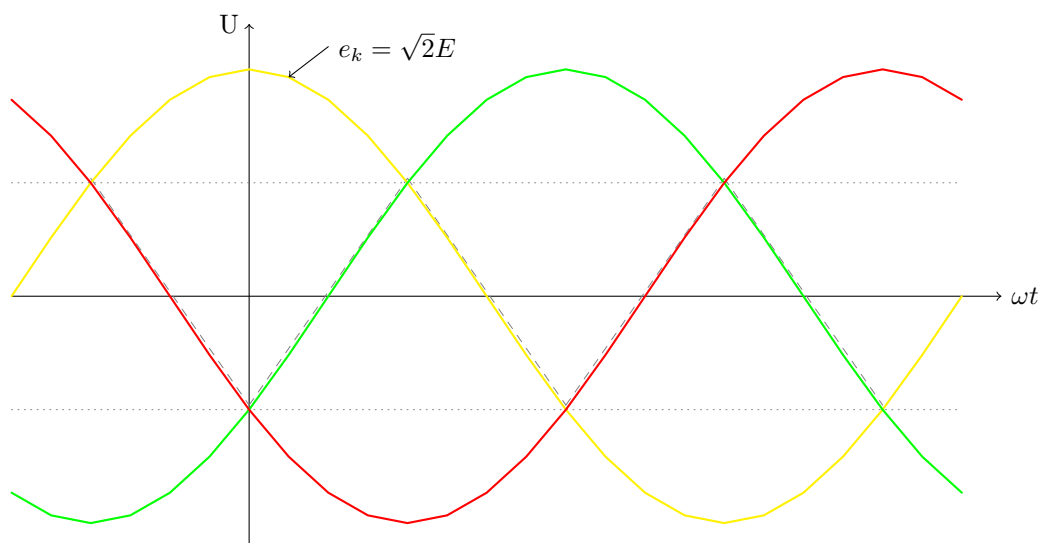
## Глава 2

# Основные схемы силовых полупроводниковых преобразователей



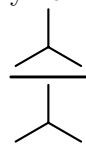
по госту обозначение диода .  
 $\longrightarrow \omega t$

Значения по оси времени откладываются в угловых единицах  $\omega t$ .  
 $\frac{1}{50}$  сек – период.  $1 msec = 18^\circ$



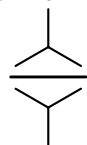
Обмотки трехфазных трансформаторов могут быть включены звездой

Все одноименные точки соединены или началами или концами в одну точку. Звезда может быть прямой или обратной.

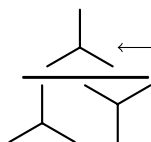


← сердечник

прямая звезда



обратная звезда

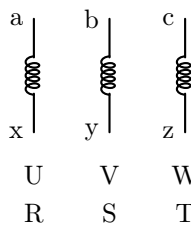


← первичная всегда в сети

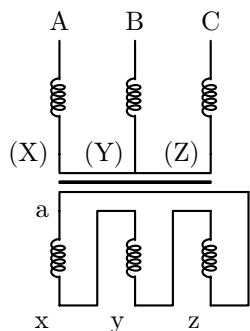


← звезда с выведенным нулём

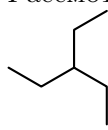
Другой способ соединения обмоток – треугольник. Треугольник тоже бывает прямой и обратный.



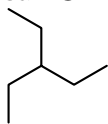
← в новых работах





Рассмотрим изображение звезду как векторную диаграмму.

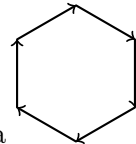


– зигзаг, результирующий будет сдвинут по фазе относительно фазы А. На рисунке равноплечный зигзаг, бывает неравноплечный зигзаг. Зигзаги бывают также обратными





Сдвиг фазы 30% – равноплечный зигзаг, если зигзаг неравноплечный, то сдвиг фаз может быть от  $0^\circ$  до  $60^\circ$

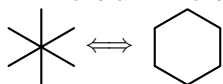
Треугольники бывают правые и левые.  



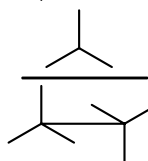
Существует соединение обмоток по схеме шестиугольника

Звезда и треугольник энергетически эквивалентны друг другу. Ни-

какими силами не определить разницу между  

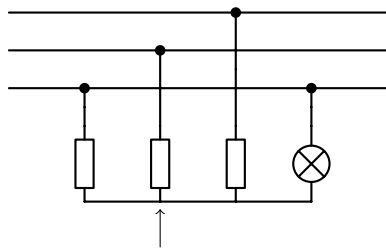


– также никакими силами не определить разницу



← 6-фазная звезда

Был 4-й провод “нулевой”, но оборвался. Если на трансформаторе написано 6кВт это фазное или линейное напряжение. 380В напряжение меряют по междуфазному. Терминология – трансформаторы называют по большему напряжению. “0” может быть физический, а может быть искусственно созданный.



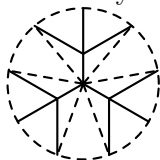
это искусственно созданный "0"

Так же искусственный ноль можно сделать в 6-ти фазной сети, под-



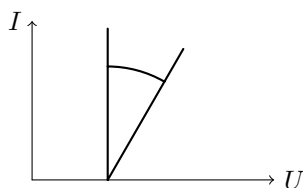
ключив 6 чайников, чего хотите.

Как получить 9 фаз?

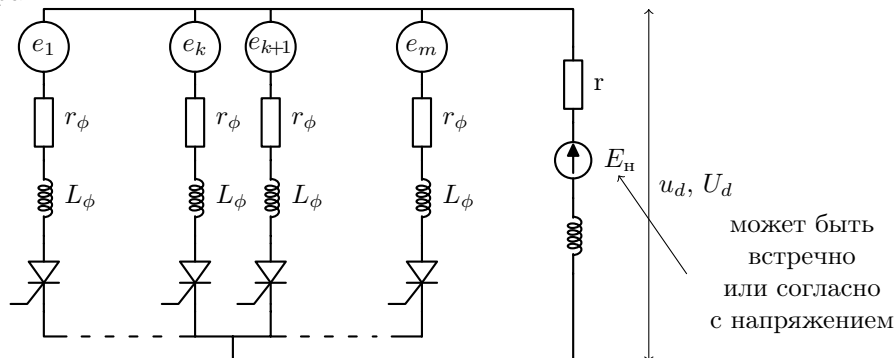


это и есть эквивалентная ЭДС. Здесь картина симметричная. Если делать 4 фазы, получится несимметричная ЭДС.

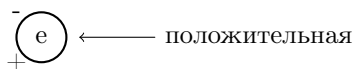
$r_\phi$  – эквивалентное фазное – это сопротивление К.З., учитывающее индуктивность рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора.



тора.



Какая полярность нагрузки считается положительной?



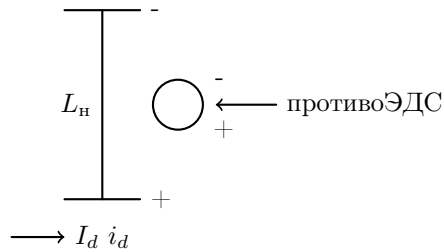
положительная, согласная с током на на-

грузке. И называют её противоЭДС

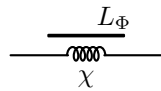




Если среднее, то  $U_d$ , если на осциллографе, то  $u_d$ .



Пульсирующий постоянный ток – это плохой ток. Чтобы уменьшать пульсации в основном применяют индуктивные фильтры. Обычно индуктивности в обмотке мотора может быть достаточно. Переменная составляющая может быть мала.

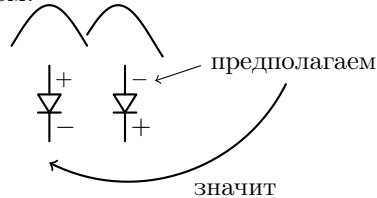


Индуктивность может насыщаться, со стальным сердечником можно  $\frac{\Psi}{I}$ , а большой поток, когда есть  $L$  фильтра.

$$R_d = (R_n + R_\Phi)$$

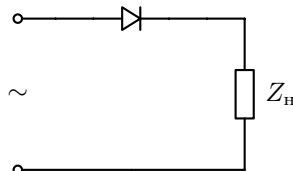
$$L_d = (L_n + L_\Phi)$$

Допущения: В самой сети фазы одинаковы, симметричны Доказываем:



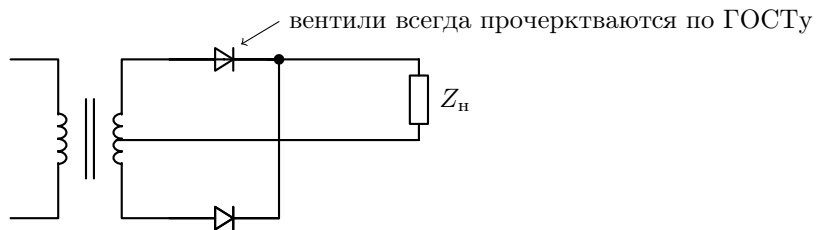
Если пренебречь сопротивлениями  $L_\phi$  и  $r_\phi$  то должен закрыться вентиль.

### 2.0.1 нулевая однофазная однополупериодная схема



Сеть пришла с  $m$  проводами.

Как считать  $\chi$  пока не говорим. В нашем случае  $m = 1$ . У неё ни предыдущей ни последующей фазы. Фильтрация здесь невозможна потому что нет постоянной ЭДС, нет постоянного тока. Обязательно будет перерыв в токе. <положительная больше отрицательного>



Схема, вообще говоря, двухфазная. Называется однофазная двухполупериодная.  $m = 2!$  – эквивалентное число фаз равно двум.

Несимметричная двухфазная система

Симметричная, когда модули одинаковые. В трехфазной системе симметричных не одна, а три “нулевая”, “прямая” и “обратная”. У 5-фазных 5 штук симметрий.

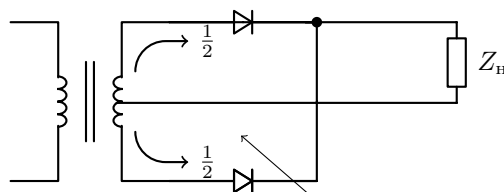
Симметричная фазная система это такая, модули составляющих одинаковые и углы между составляющими одинаковы.

$\frac{2\pi}{m}$  – “прямая” симметрия.

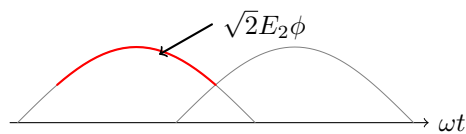
$-\frac{2\pi}{m}$  – “обратная” симметрия.

0 - нулевая.

2 вектора, угол между ними  $180^\circ$



плохое использование мощности трансформатора



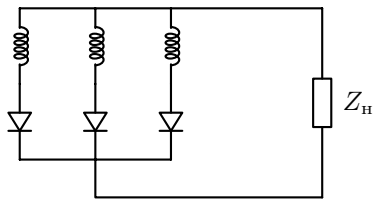

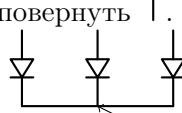


Рис. 2.1: трехфазная нулевая схема

ЭДС – если хотя бы на части периода сохраняет напряжение, то это ЭДС. 1 работник, 2е курят в коридоре. производительность используется на  $\frac{1}{3}$ . Если включил активную нагрузку, то получил бы  $P \sim \frac{1}{3}$  <там среднеквадратичное>.

Если все вентили вывернем, то на нагрузке количественно ничего не

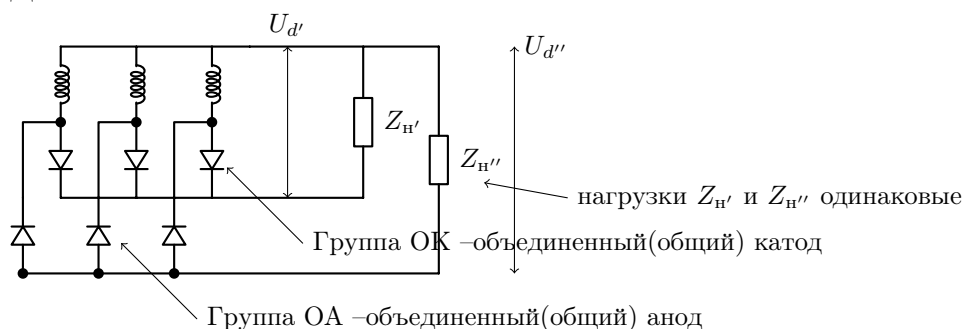
изменится если повернуть . Изменится полярность.



Исторически

Для сети немного изменится

жидкий ртутный катод <так и здесь>.

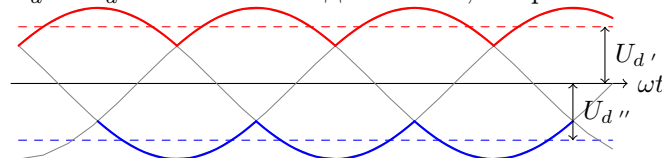


Вентили принадлежат двум группам: Группа ОК и группа ОА.

Прежде был курс ТОЭ –теоретическая часть. Силовая электроника – практическая часть, будем требовать качественно оформление отчёта.

Продукция – это техническая документация.

$U_{d'}$  и  $U_{d''}$  по величине одинаковые, по фазе отличаются:



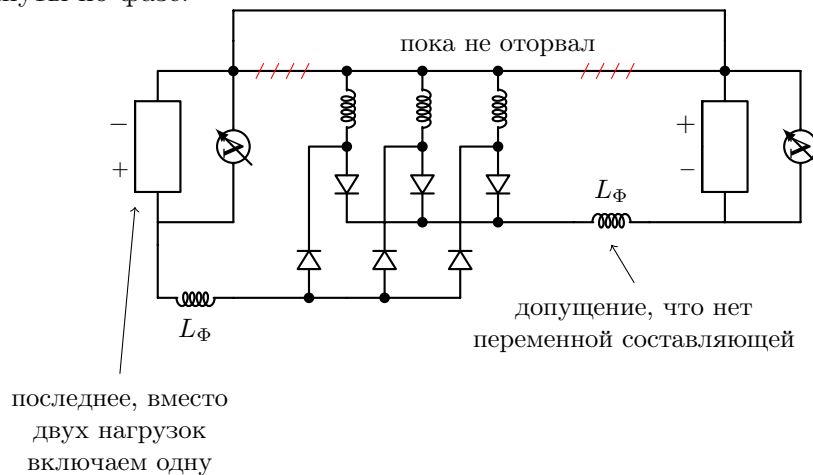
Примем допущение, что  $L_\Phi$  большая а пульсации маленькие по направлению не меняются.

Постоянное  $\frac{U}{R} = i$  (ток).

В нагрузке сумма  $U_{\text{пост}} + U_{\text{перем}}$ . Для средних  $u_{d'} = u_d''$ .

Значит токи будут одинаковыми

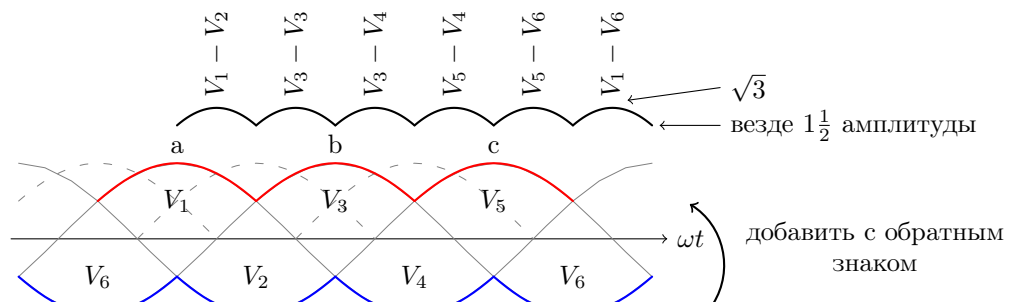
Токи одинаковые, но я оторвал: сколько втекает столько вытекает при условии что переменные пульсации равны. Пульсации равны, но сдвинуты по фазе.



## 2.0.2 мостовая схема

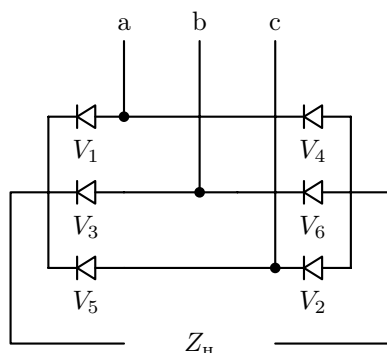
Мостовая схема представляет собой последовательное соединение двух нулевых схем, одна из которых с ОК, другая с ОА. Но так как нет соединения с нулём трансформатора, то у трансформатора "0" не нужен, и вместо звезды у трансформатора может быть треугольник.

Нулевая схема выпрямления предполагает, что все обмотки трансформатора соединены в m-фазную звезду с выведенным нулём и все концы в звезде (либо все с точкой, либо все без точки) объединены, а нагрузка включена между ... При этом на нагрузке напряжение больше



3-х пульсная кривая, <название> некрасивое, но правильное. Например:

- 3-х фазная нулевая - 3-х пульсная
  - 3-х фазная мостовая - 6-ти пульсная
- Амплитуде пульсаций уменьшилась.



ГОСТ требует нумеровать столбцами, здесь пронумеровано по смыслу: вентили проводят в порядке  $V_5 - V_6$ ,  $V_1 - V_6$ ,  $V_1 - V_2$ ,  $V_3 - V_2$ ,  $V_3 - V_4$ ,  $V_5 - V_4$ . Это нужно запомнить.

Уменьшилась амплитуда  $\Rightarrow$  улучшились условия подавления пульсаций.

амплитуда  $\nearrow \Rightarrow L \searrow$   
 $\omega \nearrow \Rightarrow L \searrow$

Размах <пульсаций нулевой схемы> – 0.5

Сумма двух синусоид, также синусоида

Размах <пульсаций ... схемы> – 0.13 

При той же индуктивности ...

3-х фазная схема самая распространенная схема выпрямления.

Достоинства: в 2 раза возрастает частота пульсации. примерно в 2 раза, почему, потому что мы считали для  $\alpha = 0$ , при  $\alpha \neq 0$  будет другая форма кривой напряжения. Примерно в два раза возрастет продолжительность протекания тока вентильных обмоток. Вентили работают  $1/6$  периода, обмотки –  $1/3$ . Ток течёт по двум обмоткам. В 2 раза по среднеквадратичному. При том же выпрямленном напряжении в 2 раза уменьшается напряжение, прикладываемое к вентилям.

К вентилю прикладывается междуфазное линейное напряжение. В худшем случае прикладывается амплитуда.

Для высоковольтной преобразовательной техники важно

$\Rightarrow$  Преобразуем энергию в  $\Rightarrow$

330кВ, 1000кВ (Экибастуз-центр)

ПУЭ – правила устройства электроустановок.

Есть разные категории потребителей. Доменная печь высотой с Исаакиевский собор. Задули электрическую печь кокс+уголь+флюс. Если электроснабжение прекратилось чугун стал в “козел” – нужно выбрасывать.

больницы.

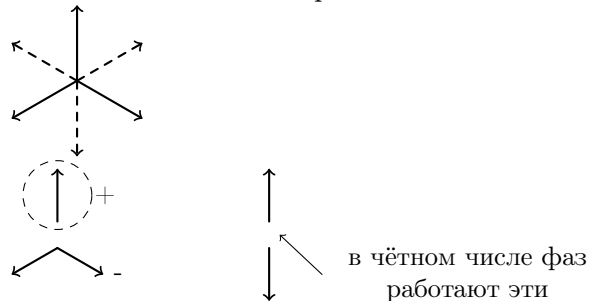
8 мостов – управляемые

один мост закорачивают.

140 вольт.

Мостовые схемы могут быть с разным числом фаз.

С пульсациями может быть не так. Амплитуда и число пульсаций уменьшаются если число фаз нечётное.



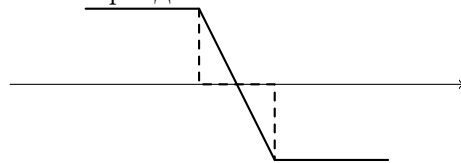
3-х фазная – 6-ти пульсная  
 4-х фазная – 4-ти пульсная  
 2-х фазная – 2-х <фазная?>

Вентили работают  $1/6$  периода. 9 обмоток – вентили работают  $1/9$ ,  $2/9$  периода работают вентильные обмотки. Рост числа фаз уменьшает коэффициент использования вентилей и трансформатора.

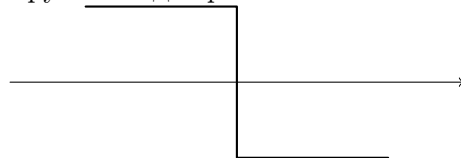
192 фазном выпрямлении эквивалентное

$2/3$  периода работает обмотка

Весь период



Грузится однофазным током



Оптимальное 2.7 между 2 и 3

$\sim \Rightarrow 12$  пульсов

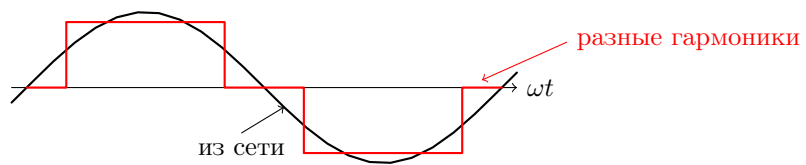
$\sim \Rightarrow 12+12 \rightarrow 24 \rightarrow 48 \rightarrow 96 \rightarrow 192$

32 моста

Можно последовательно, можно параллельно, параллельно через реактор.

32 ванны (4 параллельных 8 штук)

Кроме улучшения гармонического состава выпрямленного напряжения и тока повышение числа фаз улучшает гармонический состав тока потребляемого из сети.



Гармоники не 50 Герц, не передают мощности, искажают ток. Это главный недостаток выпрямителей.

## Глава 3

# Схемы выпрямителей

Мы занимаемся статическими преобразователями в противовес электромашинным. Статические преобразователи управляются ключами. Диод, вообще говоря, имеет управление по силовой цепи: в тот момент когда ток падает до 0, диод выключается. Диод управляется полярностью сети. Для тиристоров лучше употреблять термин "запираемый" или "незапираемый" а не управляемый.

Кроме "классических" приборов существуют модули, в которых несколько приборов интегрированы в одном корпусе.

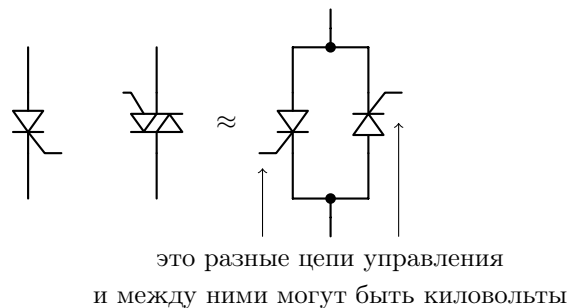


Рис. 3.1: Семистор



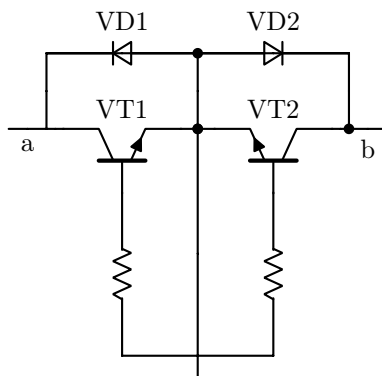


Рис. 3.2: аналог запираемого тиристора

Диоды  $VD1$  и  $VD2$  шунтируют транзисторы. Если к концу  $a$  приложен положительный потенциал, а к концу  $b$  приложен отрицательный, то ток идет по цепи  $VT1 - VD2$ . При противоположной полярности ток идет по цепи  $VT2 - VD1$ .

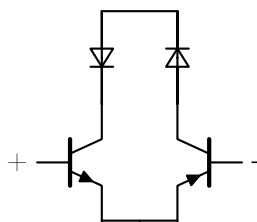


Рис. 3.3:

Диоды параллельны. Чтобы открыть транзисторы нужно подать разнополярные сигналы. Но можно схитрить:

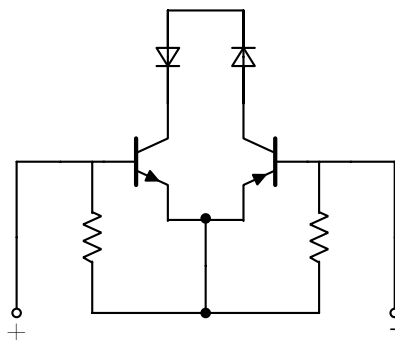


Рис. 3.4:

В этой схеме оба транзистора открыты. При противоположной полярности – закрыты.

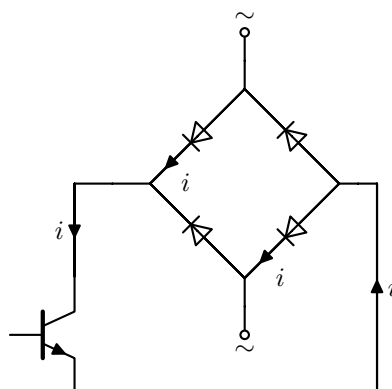


Рис. 3.5:

На этой схеме используется биполярный транзистор, но можно использовать MOSFET, IGBT, ррр. Недостаток: ток всегда будет протекать по трем приборам. В предыдущей схеме ток протекал по двум приборам. А в случае двух встечных запираемых тиристорах – один (правда пятислойный).

Самым распространённым типом преобразовательного прибора является выпрямитель. Затем по распространённости следуют НПЧ, тиристорный регулятор переменного напряжения.

Силовую структуру выпрямителя мы уже знаем. Дальше идет информационная электроника.

Фильтр - как правило, используется индуктивный фильтр и комбинации  $LC$ ,  $CL$ ,  $CLC$ , резонансные фильтры.

Трансформаторы - схемы включения  $\Delta$ ,  $\Delta$ ,  $Z$  и обратные  $Y$ ,  $\nabla$ ,  $Z$ , в которых соединение концов обмоток поменяно местами по сравнению с прямой конфигурацией. Такие же схемы соединения обмоток используются и на первичной стороне.

Трансформатор, вентильная группа, фильтр. Фильтр, как правило, индуктивный фильтр. Конденсаторы не любят быстроменяющегося напряжения. Емкость эффективна при холостом ходе и малых токах. Конденсаторы используются в звене постоянного тока. В инверторах напряжения используется конденсатор, если инвертор тока – индуктивность. Кроме  $C$ -фильтра могут быть  $CL$  и  $CLC$  фильтры.

Основные схемы – "нулевые". Если "нуль" не выведен, то можно восстановить "искусственный нуль".

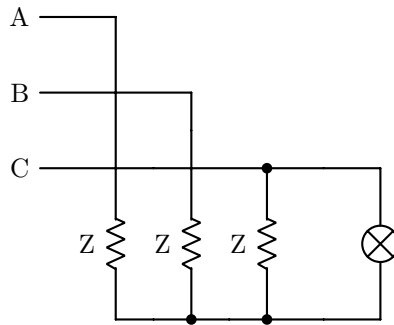


Рис. 3.6: схема восстановления искусственного нуля

При линейном напряжении между фазами 380V получаем напряжение на лампе 220V. Активное сопротивление  $Z$  должно быть на порядок, или хотя бы в несколько раз меньше сопротивления нагрузки  $R_n$ . Использовать  $R$  вместо  $L$  или - глупость.

### 3.1 нулевые схемы выпрямителей

#### 3.1.1 Однофазная нулевая схема

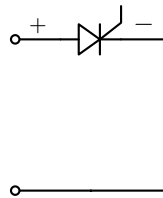


Рис. 3.7: однофазная нулевая схема

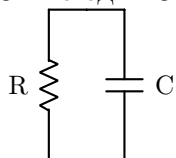
Подавать на тиристор управляющий сигнал, когда на тиристоре обратное напряжение крайне нежелательно.

При  $U_{VS} < 0$  и  $|I_S| \approx I_{упр}$  возникает так называемый транзисторный эффект тиристора, который приводит к нагреву тиристора. Эти токи имеют порядок  $10^{-2}...10^{-1}A$  при температуре около  $40^\circ$ , но могут достигать  $1 - 2A$  при низких температурах  $\approx -40^\circ$ . Потому тиристорные(транзисторные) преобразователи требуют подогрева при низких температурах. Максимальный управляющий ток при нормальных условиях достигает  $600mA$ . К чему приводит  $I_{упр} = 10^{-2}$ , а  $U = 1000V$ ? Тиристор рассеивает сотни ватт, а к ним добавится полкиловатта. А если в схеме 6-12 тириستоров? Поэтому при отрицательном напряжении на тиристоре управляющий сигнал не подают.

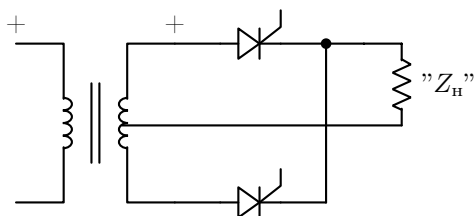
Электрохимическая нагрузка эквивалентна аккумулятору-встречной ЭДС. В нагрузке обязательно бывает  $L$ .  $e_n$ , полярность может быть

согласна, а может быть противоположна приложенному напряжению.

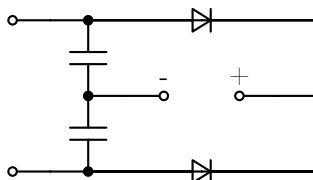
В частном случае роль  $E$  может выполнять конденсатор  $C$ . Но один  $C$  быть не может, он обязательно должен быть в паре с  $R$ .



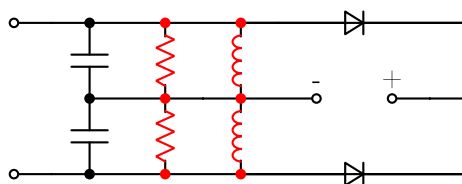
### 3.1.2 симметричная двухфазная схема



### 3.1.3 Двухполупериодная однофазная нулевая схема

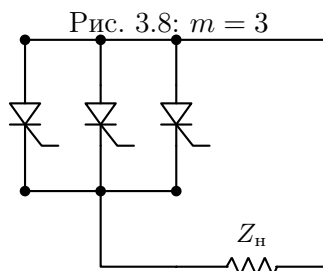


Потечет ли ток? Ток не потечёт, поскольку конденсатор не пропускает постоянный ток. По “нулевому” проводу должен протекать постоянный ток. Создадим искусственный ток:

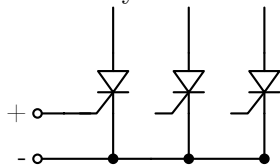


Для постоянного тока  $Z$  не может быть емкостным. “ $Z$ ” должен проводить постоянный ток.

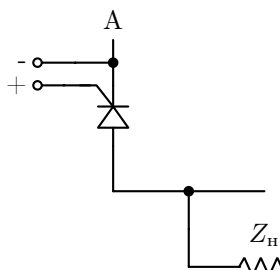
В “нулевых” схемах число вентилей равно числу фаз.



В  $Z_n$  должны быть учтены параметры провода. “Искусственный ноль” должен пропускать постоянный ток и  $Z_n$  должен быть на порядок больше  $Z$  от “искусственного нуля”



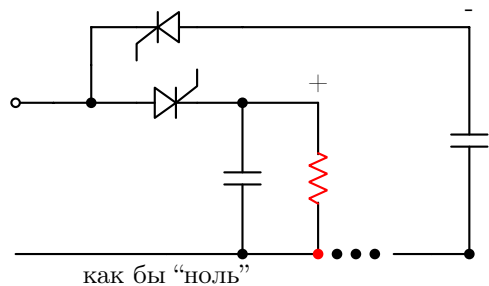
$U_{\text{управления}} \approx 10V$ , может быть 5-8-10, max 15



В этой схеме сигнал управления подается относительно фазы  $A$ . Это означает, что сигналы управления нужно развязывать, например, посредством импульсного трансформатора.

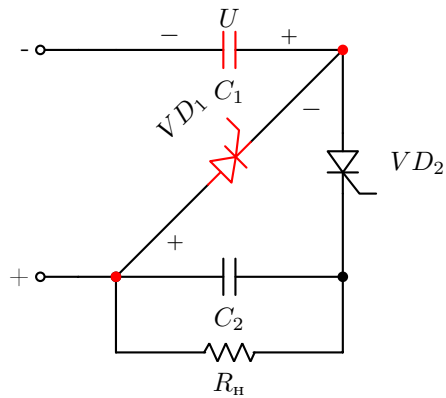
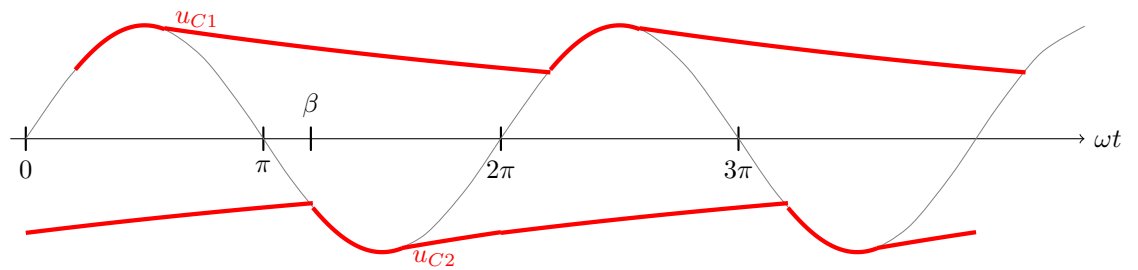
6-фазная схема  $m = 6$ , забирать будем с таких обмоток  $Y, A$ , рисовать не буду

мостовая схема – это объединение двух нулевых. Ток будет протекать в два раза дольше. Если это трансформатор, то обмотка лучше используется. Для того чтобы идти дальше, вернемся к частному случаю. Нулевая однополупериодная схема.

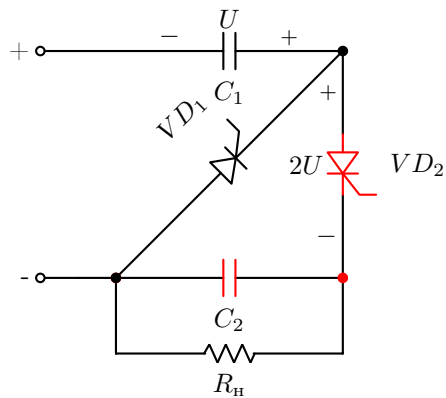


Напряжение между (+) и (−) равно удвоенному напряжению на конденсаторе.  $u_{d1}$  поставлена маленькими, поскольку это функция времени. Сумма  $u_{d1} + u_{d2}$ . По среднему значению будет в два раза больше чем  $U$ . Это схема удвоения,  $2U$  – это напряжения на двух конденсаторах. Эта схема Латура. Однофазная мостовая – это схема Греса. Трёхфазная мостовая – Ларионова. Имена возвращаются.

Рассмотрим ещё одну схему удвоения:

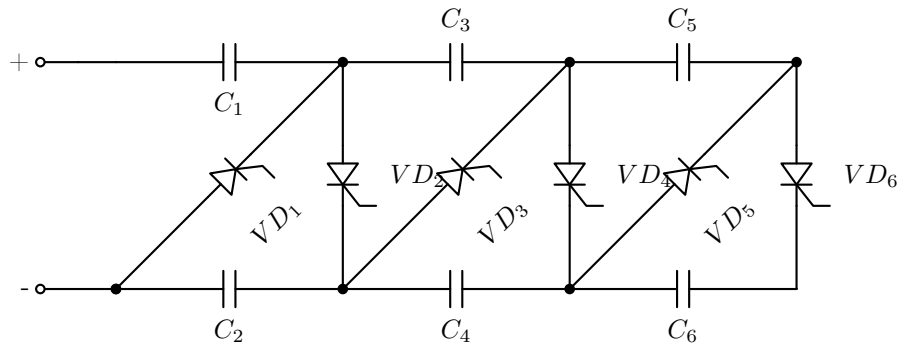


При  $- +$  на входе конденсатор  $C_1$  зарядится  $- +$ . При подаче напряжения на  $VD_1$



За несколько периодов напряжения сети если пренебречь  $R_n$  конденсатор  $C_1$  зарядится до амплитуды  $U$ , а конденсатор  $C_2$  до двух амплитуд  $2U$ .

### 3.1.4 вариант схема умножения



Конденсатор  $C_1$  заряжается на положительных полупериодах порциями. На верхних конденсаторах  $C_1, C_3, C_5, \dots$  нечётные напряжения  $U, 3U, 5U$ . На нижних конденсаторах  $C_2, C_4, C_6, \dots$  нечётные напряжения  $2U, 4U, 6U$ . Таким способом в середине прошлого века получали напряжение в 1 миллион вольт, полтора миллиона вольт. Получали 2 миллиона – была построена линия постоянного тока Экибастуз-Москва. Несколько миллионов можно было получить.

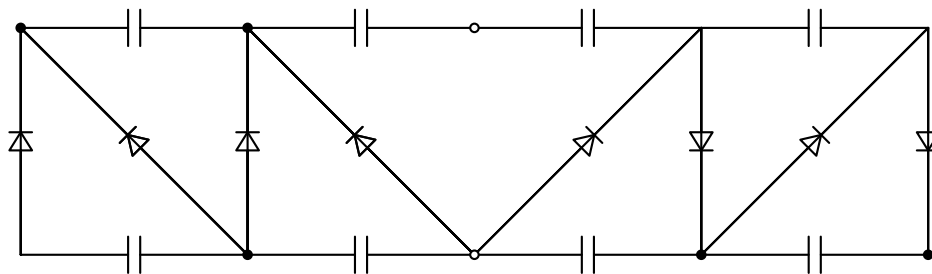
В первых цветных телевизорах напряжение анод-катод было 25kV. Получали это напряжение выпрямлением на электровакуумном приборе. Для этого применялся импульсный трансформатор строчной развертки. Горели строчные трансформаторы из-за межвитковых замыканий. Перешли на схему Латура – пожары прекратились.

Требуется высокое напряжение и малый ток. Газоочистка в трубах требует высокое напряжение. Сажа притягивается как лохмотья бумажки притягиваются к расчётке.

Пример практического применения выпрямителей.

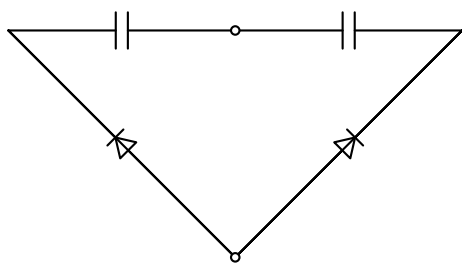
$$7 \times \underbrace{220 \cdot \sqrt{2}}_{283} \approx 1700, 1800V \quad 10 \times 283 = 2830V$$

Можно ещё одну схему нарисовать. Её почему-то в учебниках не приводят



Эта схема как бы двухполупериодная. Частота пульсаций 100Гц, а не 50Гц.



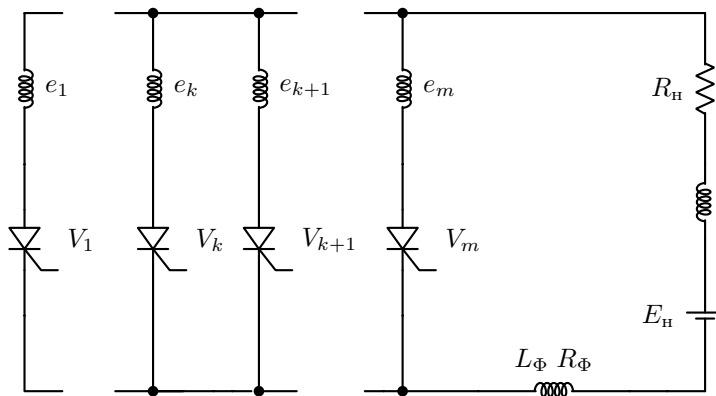


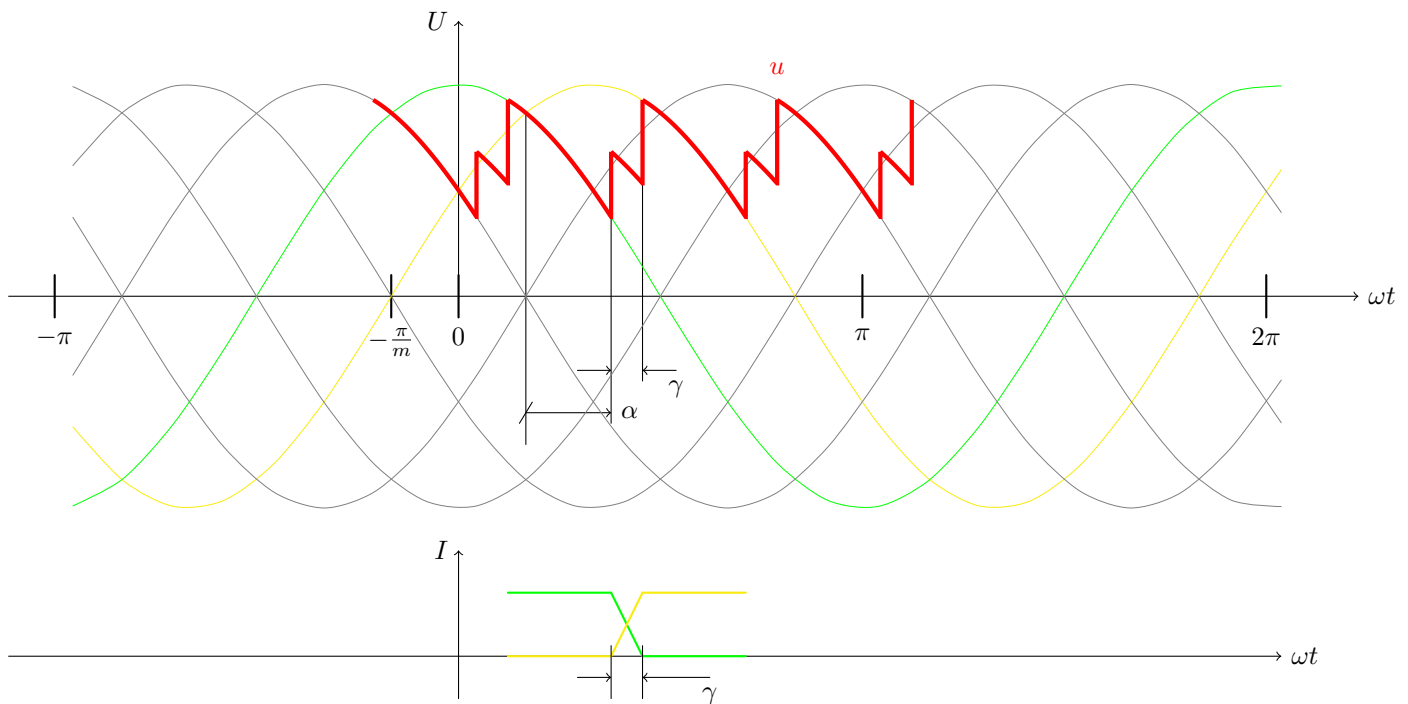
Получили схему Латура.

## Глава 4

# Внешние характеристики преобразователей, прерывистый режим, регулировочные характеристики

До сих пор не писали математических соотношений. В качестве основной схемы рассмотрим  $m$ -фазную “нулевую” схему. Минимум  $m = 2$ . Всегда должна быть предыдущая и последующая фазы. Также всегда должны быть первая и последняя фазы.





В  $e_k$  содержатся  $(E_{2m\phi}, L_\phi, r_\phi)$ . Где  $L_\phi$  – эквивалентная индуктивность приведенная ко вторичной обмотке. Как определить параметры? Из опыта к.з. Есть измеренные  $U, I, Z, P$ . Из  $I^2 R = P$  определим  $L_{\text{фазы}}$   
 $X_{\text{фазы}}, \omega L_{\text{фазы}} = 2\pi f L_\phi$ .

$U_0$  – как бы встречная ЭДС.

$U = U_0 + R_D \cdot I$ , где  $R_D$  – динамическое сопротивление.

Принимаем допущение  $i_d \approx I_d$  – пренебрегаем пульсациями. Еще одно допущение  $m \geq 2$ . Неуправляемые диоды проходили бы по максимуму волн. Обозначим  $e_1$ . На периоде  $2\pi$  имеем  $m$  пульсаций. Предположим, что тиристоры имеют задержку отпирания на угол  $\alpha$  (угол регулирования)

Кривая выпрямленного напряжения (рис). Не спешите делать его жирным, мы будем его поправлять.

Ток через фильтр  $L \frac{\partial i}{\partial t} = \frac{\partial \Psi}{\partial t}$ . На постоянном токе  $i_d \approx I_d$  пульсациями пренебрегаем.  $U_d$  – подлежит определению! Предполагаем, что до  $k$ -й фазы всё включалось.

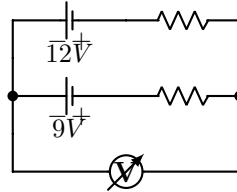
Рисуем токи  $i_k, i_{k+1}$ , рисуем графики  $I_d = i + d, \dots, i_k$  изменяются мгновенно? Да, если пренебречь индуктивностью... А наши обмотки имеют индуктивность. Мгновенно этот процесс не может завершиться. Индуктивность  $L_{\phi k}$  не хочет отдавать ток, а индуктивность  $L_{\phi(k+1)}$  – принимать. Что заставляет обмотки обмениваться током – разность эдс  $e_k - e_{k+1}$ . Обе обмотки начинают проводить ток. Получается к.з. Если не пренебрегать сопротивлением, то на малое сопротивление. есть два

эдс и два  $L$ .  $e_{k+1} - e_k$  упадёт на внутреннем сопротивлении по закону Кирхгофа.  $i_R, i_R, L \frac{\partial i}{\partial t}, L \frac{\partial i}{\partial t}$ .

Переход тока с одной фазы преобразователя на другую называется процессом коммутации.

Время коммутации определяется разностью ЭДС и суммы активно-индуктивных сопротивлений коммутируемых (коммутирующих) фаз. Время процесса (время коммутации), а соответствующий угол принято обозначать  $\gamma$ .  $-e_k + -e_{k+1}$ , но у  $e_{k+1}$  плюс больше! В  $k$ -й фазе протекал ток. Из него вычитается ток к.з. Течёт прямой ток, навстречу ток к.з. Когда ток  $i$  вентиля становится равным нулю вентиль выключается.

Какое напряжение будет на нагрузке-лампочке, когда к ней прило-



жаться разные ЭДС.

Что покажет вольтметр? Если не указано внутреннее сопротивление, то неизвестно. Если одинаковые внутренние сопротивления, то вольтметр покажет полусумму напряжений. Разность напряжений упадет на этих сопротивлениях. Поняв эту детскую задачу двинемся дальше. Теряется заштрихованная площадка из-за коммутации на индуктивностях.

Нужно взять интеграл. Площадь считаем в угловых единицах.

$$u_d = \frac{1}{2\pi/m} \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{\frac{\pi}{m} + \alpha} \left( u_\phi - \underbrace{\Delta u_{V_S}}_{\text{падение на фильтре}} - \underbrace{\Delta u_\phi}_{\text{падение на фильтре}} \right) d\omega t =$$

где

$$u_\phi = e_\phi - i_\phi - L_\phi \frac{di_\phi}{dt}$$

и  $e_\phi = E_k$  - косинусоида.

$$= \frac{m}{2\pi} \underbrace{\int_{-\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \sqrt{2} E_{2\phi} \cos \omega t d\omega t}_{\text{эквивалентное значение выпрямленной ЭДС}} - \Delta U_d$$

через  $U_d$  обозначены все остальные падения напряжения. А если нет никаких падений, то нет и  $U_d$ .

m	“1”	2	3	4	6		$\infty$
$\frac{E_{d0}}{E_{2\Phi}}$	0.45	0.9	1.17	1.27	1.35		$\sqrt{2} \approx 1.414$

$$E_d = \frac{m}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \sqrt{2}E_{2\Phi} \cos \omega t d\omega t = \frac{m}{2\pi} \sqrt{(2)} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{m} + \alpha\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{m} + \alpha\right) \right]$$

Cos полусуммы на Sin полуразности.

$$\frac{m}{2\pi} \sqrt{(2)} 2 \cos \alpha = E_{d0} \cos \alpha$$

Что такое  $E_{d0}$  – это  $U_d$  при  $\alpha = 0$  или  $E_{d0}$  - выпрямленное ЭДС в случае неуправляемых диодов.

$$E_{d0} = \frac{m}{\pi} \sqrt{2} E_{2\Phi} \sin \frac{\pi}{m} \quad (4.1)$$

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha \quad (4.2)$$

Еще не закончили интегрировать, но отметим важный момент

При  $\infty$ : если количество горбиков возрастает, то в пределе подойдет к  $\sqrt{2}$ . Формула верна в предположении, что ток всегда протекает.

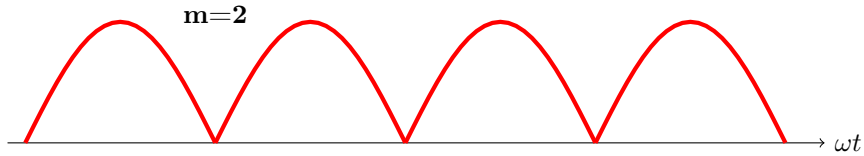


Рис. 4.1: m=2, E = 0.9

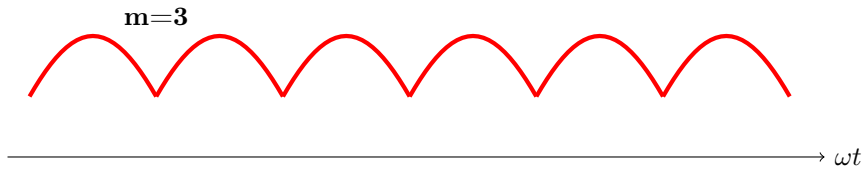


Рис. 4.2: m=3, E = 0.866

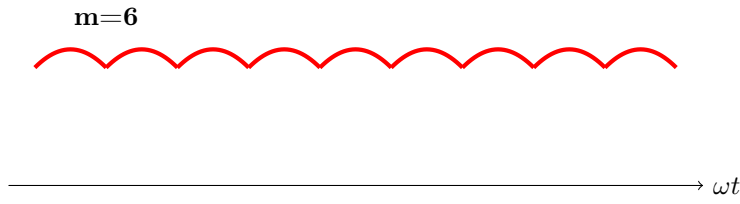


Рис. 4.3: m=6, E =

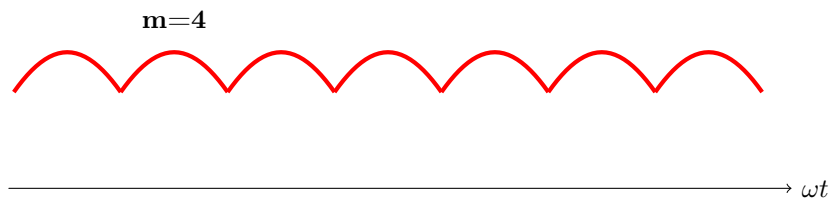


Рис. 4.4: m=4,  $E = \frac{\sqrt{2}}{2}$

Вернулись к однополупериодной схеме

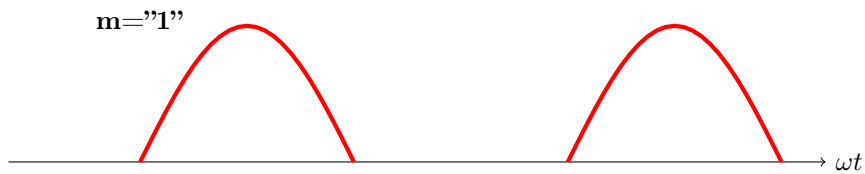


Рис. 4.5: m="1", E = 0.45

Что осталось? Досчитать  $\Delta U_d$

$$\Delta U_d = \frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{\frac{\pi}{m} + \alpha} L_\phi \frac{di_\phi}{dt} d\omega t + \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{\frac{\pi}{m} + \alpha} (i_\phi r_\phi + i_\phi R_d + U_0 + I_d R_\Phi) d\omega t \right\} =$$

$$U_\phi = e_\phi - L_\phi \frac{\partial i_\phi}{\partial t} - i_R i_\phi$$

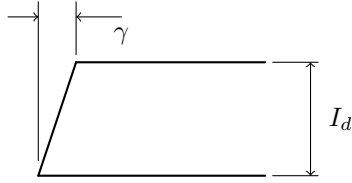
1-й интеграл. смотрим на график  $i$

$$\int_{\frac{\pi}{m} + \alpha \rightarrow \text{в момент включения самой фазы } i}^{\frac{\pi}{m} + \alpha \rightarrow \text{в момент включения следующей фазы}} \omega L_\phi \frac{di_\phi}{d(\omega t)} d\omega t$$

$$\frac{m}{2\pi} \left\{ \underbrace{L_\phi i_\phi \Big|_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}}_{i_\pi = I_d \text{ когда фаза начала включатся}} - \underbrace{L_\phi i_\phi \Big|_{\frac{\pi}{m} + \alpha}}_{= 0 \text{ когда фаза включилась}} \right\}$$

Делаем допущение:  $i_\phi$  – меньше чем площадь прямоугольника (приближённно на всём промежутка равно  $I_d$  )

$$\begin{aligned} & \int i_\phi (r_\phi + R_D) d\omega t + \frac{m}{2\pi} (U_0 + I_d R_\Phi) \int d\omega t = \\ & = \frac{m}{2\pi} I_d X_\Phi + \underbrace{\int i_\phi h i (r_\phi + R_D) d\omega t}_{\text{это возьмём приближённно}} + (U_0 + I_d R_\Phi) = \end{aligned}$$



$$\frac{m}{2\pi}$$

Площадь трапеции равна  $I_d \left( 2\pi m - \frac{\gamma}{2} \right)$

$$= \frac{m}{2\pi} I_d \left( \frac{2\pi}{m} - \frac{\gamma}{2} \right) (r_\phi + R_D)$$

$$\Delta U_d = \frac{m}{2\pi} I_d X_\Phi + U_0 + I_d R_\Phi + (r_\phi + R_D) \left( 1 - \frac{\gamma m}{4\pi} \right) I_d$$

$$U_d = E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_d$$

$$U_d = E_d - U_0 - \frac{m}{2\pi} X_\Phi I_d - I_d \left\{ R_\Phi + (r_\phi + R_D) \left( 1 - \frac{\gamma m}{4\pi} \right) \right\} \quad (4.3)$$

Осталось определить, как  $\gamma$  зависит от тока.

$$E_{d0} = \frac{m}{\pi} \sqrt{2} E_{2\Phi} \sin \frac{\pi}{m} \quad (4.4)$$

– выпрямленная ЭДС неуправляемого преобразователя

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha \quad (4.5)$$

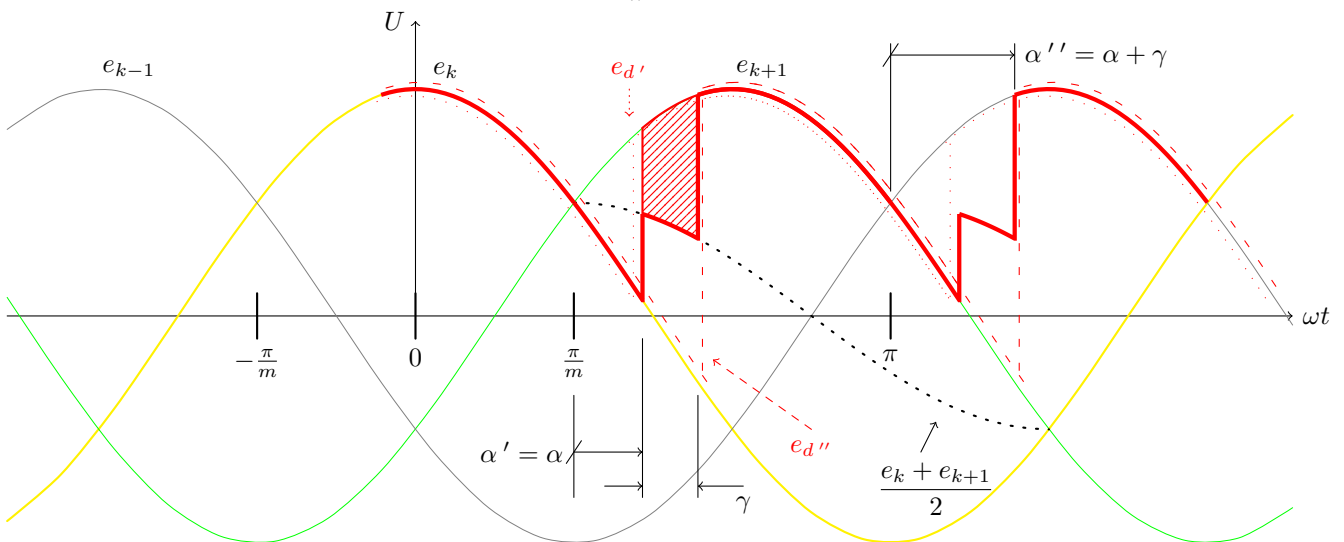
– выпрямленная ЭДС управляемого преобразователя

$$U_d = E_d - U_0 - \frac{m}{2\pi} X_\Phi I_d - I_d \left\{ R_\Phi + (r_\phi + R_D) \left( 1 - \frac{\gamma m}{4\pi} \right) \right\} \quad (4.6)$$

– Выпрямленное напряжение для угла  $\alpha$ , или максимальное (при  $\alpha = 0$ ).

$U_0$  – напряжение на вентиле,  $R_D$  – дифференциальное сопротивление вентилей.  $r_\phi$  – полное эквивалентное сопротивление фазы с учетом сопротивления сети, приведенного ко вторичной обмотке, сопротивление проводников.


Для точности отметим член  $\frac{\gamma}{4\pi}$ .



Почти в каждом билете будет задачка, в которой придется рисовать. кривую — можно получить как полусумму двух кривых  $e_{d'}$  ⋯ и кривой  $e_{d''}$  - - -.

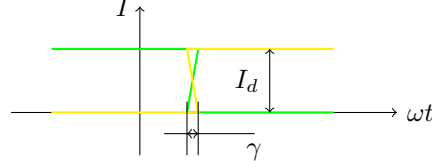
В прошлый раз было убедительно доказано, что при соединении двух ЭДС с равными внутренними сопротивлениями суммарная ЭДС будет полусуммой этих ЭДС.

Из-за индуктивности ток в  $k$ -й фазе спадает с конечной скоростью, а в  $k + 1$ -й нарастает с конечной скоростью. Разность ЭДС  $e_{k+1} - e_k$

падает на сопротивлениях. Площадка  показывает падение напряже-



ния из-за индуктивности фазы. Напомню,  $X_\phi = 2\pi f L_\phi$  (индуктивность это величина отношения  $\frac{\text{потока}}{\text{к току}}$ , где магнитный поток—это магнитный поток рассеяния, обусловленный током нагрузки, а не током намагни-



чивания.

Делали допущение  $i_d = I_d$  — мгновенное равно среднему, пульсаций нет. Уменьшить пульсации до нуля мы не можем, но уменьшить до уровня, когда пульсациями можем пренебречь технически возможно.

Мгновенное значение ЭДС при угле регулирования  $\alpha$  и угле коммутации  $\gamma$  представим в виду полусуммы

$$e_{\alpha, \gamma} = \frac{e_{\dots\dots} + e_{\dots\dots}}{2} = \frac{e_{d'} + e_{d''}}{2} =$$

Это значит, что каждая из них кривая мгновенного напряжения у которого нет  $\gamma$ .

$$= \frac{e_{d'}(\alpha' = \alpha, \gamma' = 0) + e_{d''}(\alpha'' = \alpha + \gamma, \gamma'' = 0)}{2} =$$

--- — при угле  $\alpha'' = \alpha + \gamma$

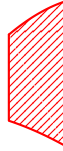
$$E_d(\alpha, \gamma) = \frac{E_{d'}(\alpha, \gamma = 0) + E_{d''}(\alpha'' = \alpha + \gamma, \gamma'' = 0)}{2}$$

Для чего это делаем. Нужно проинтегрировать на интервале повторяемости

$$E_d = \frac{E_{d0} \cos \alpha' + E_{d0} \cos \alpha''}{2} = E_{d0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}$$

$$E_d = E_{d0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}$$

Проанализируем результат. На каждом интервале повторяемости те-



ряем эту площадку  $\Delta E_d$  — разница между  $e_{d'}$  и  $e_{d''}$

$$E_d = E_{d0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} \quad (4.7)$$

$$\Delta E_d = \underbrace{E_d(\alpha, \gamma = 0)}_{\text{без коммутации}} - \underbrace{E_d(\alpha, \gamma \neq 0)}_{\text{при реальном } \gamma}$$

Смотрим внимательно на уравнение (4.6) где учтено  $\Delta E_d$ . Отметим  $X_\phi$  – падение на индуктивности. Кажущаяся нелепость: Постоянный ток умножается на индуктивность. Это есть ЭДС самоиндукции  $\frac{m}{2\pi} X_\phi I_d$  – коммутационное. В учебниках пишут  $\Delta U$ , у нас написано  $E$ , подчеркивая что природа этого – падение на самоиндукции.

$$\Delta U_{d\gamma} = \Delta E_{d\gamma} = E_{d0} \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)}{2} = \frac{m}{2\pi} X_\phi I_d \quad (4.8)$$

Коэффициент  $R_K = \frac{m}{2\pi} X_\phi$  мы умножаем на ток нулевой частоты. Это фикция, но так говорят, мы упоминаем шутка ради. Но это сопротивление не греется от проходящего тока, поэтому оно фиктивное.

Из предыдущего (4.8) уравнения можем найти  $\gamma$

$$\gamma = \arccos \left[ \cos \alpha - \left( \frac{\frac{m}{2\pi} X_\phi I_d}{E_{d0}} \right) \right] - \alpha \quad (4.9)$$

В уравнении (4.8)  $\Delta U_{d\gamma}$  индекс  $\gamma$  подчёркивает, что это падение напряжения вследствие угла коммутации  $\gamma$

$$\gamma = \arccos \left[ \cos \alpha - 2 \left( \frac{\Delta U_{d\gamma}}{E_{d0}} \right) \right] - \alpha \quad (4.10)$$

$$\gamma = \arccos \left[ \cos \alpha - \left( 2 \frac{R_K I_d}{E_{d0}} \right) \right] - \alpha \quad (4.11)$$

где

$$R_K = \frac{m}{2\pi} X_\phi \quad (4.12)$$

Еще раз перепишем формулу (4.6):

$$U_d = E_d - U_0 - I_d [R_K + R_{\text{эквивалентное}}]$$

При практических расчётах приближённо  $U_0$  мало, также пренебрегают влиянием  $\gamma$  на коммутационное сопротивление.

$$U_d = E_{d0} \cos \alpha - I_d \left( R_K + \underbrace{r_\phi}_{\text{на стороне переменного тока выпрямителя}} + \underbrace{R_\Phi}_{\text{на стороне постоянного тока выпрямителя}} \right)$$

Эту формулу применяют для практических расчётов.

$$R_K = \frac{m}{2\pi} X_\phi - (r_\phi + R_D) \frac{\gamma}{4\pi}$$

– эта формула для совсем точных расчётов. Активное сопротивление на постоянном токе уменьшается.

Уравнение (4.6) – статические характеристики. В статическом режиме  $\alpha$  и  $I$  не меняются. То что присутствует  $\gamma$  – его нужно исключить, решив уравнение относительно  $\gamma$

$U_d = F(\alpha, I_d)$  – можно рассматривать уравнение как функцию двух переменных.

$U_d = f(\alpha)$  при  $I_d = \text{const}$  – **регулируемые характеристики**. Почему во множественном числе? потому что для разных  $I_d$ .

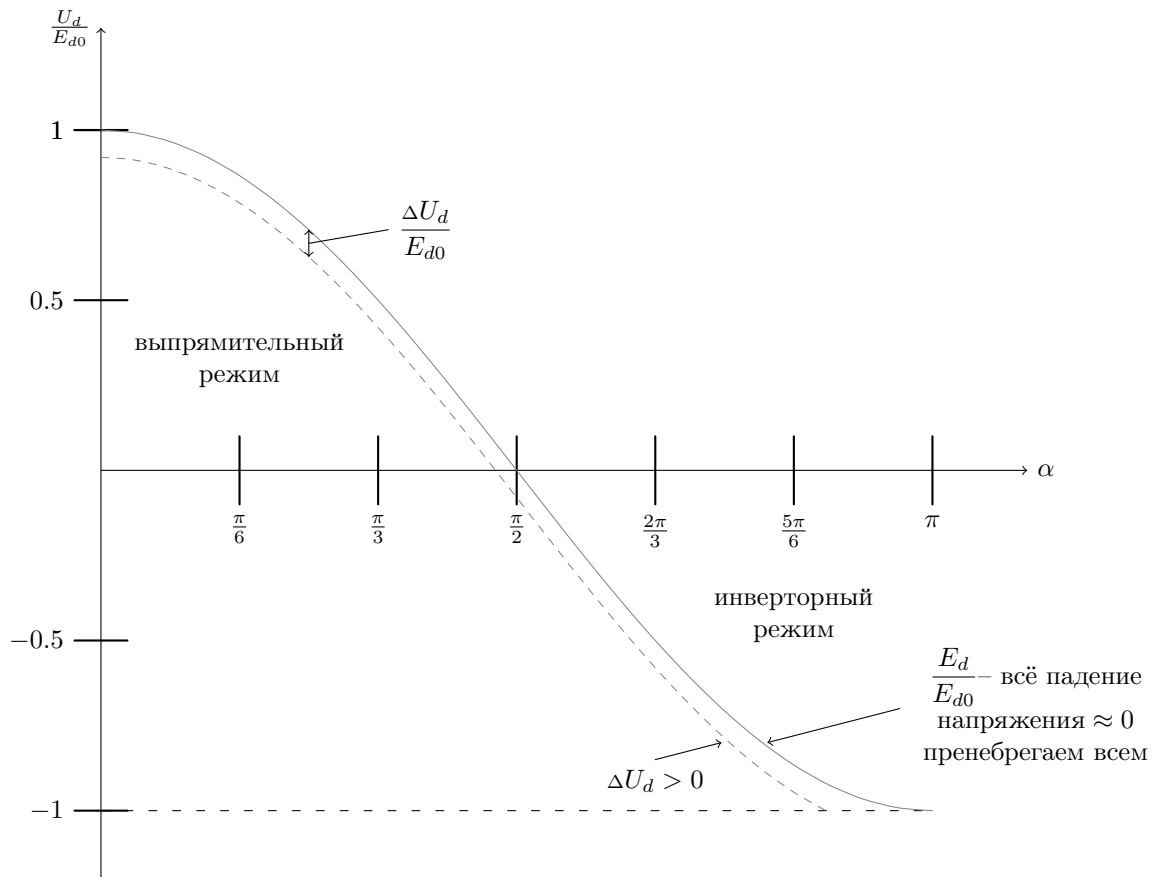
$U_d = f(I_d)$  при  $\alpha = \text{const}$  – **внешние характеристики**.

Как их строят? Строят семейство регулировочных характеристик и семейство внешних характеристик.

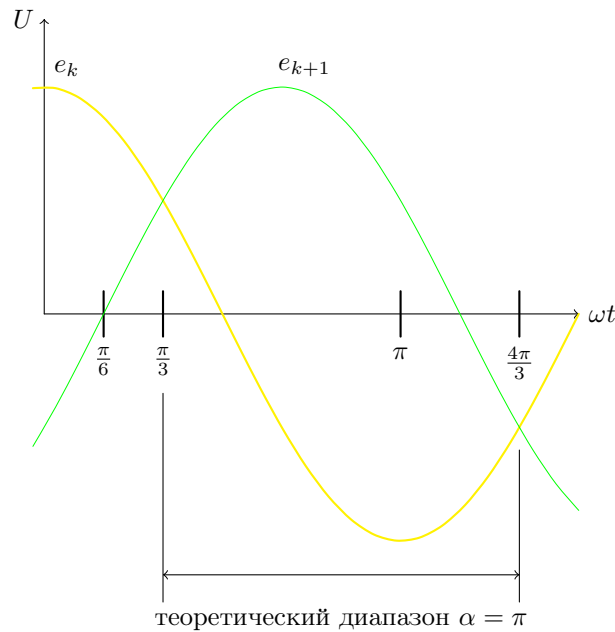
При  $I_d$  малых (пренебрегаем падением на внутренних элементах). Это одна из регулировочных характеристик, причём основная, а внешних – много.

#### 4.0.1 регулировочные характеристики

характеристики строятся в относительных единицах.



$\alpha \geq 0$ , потому что не сможем включить раньше. Какой теоретический



предел  $\alpha$

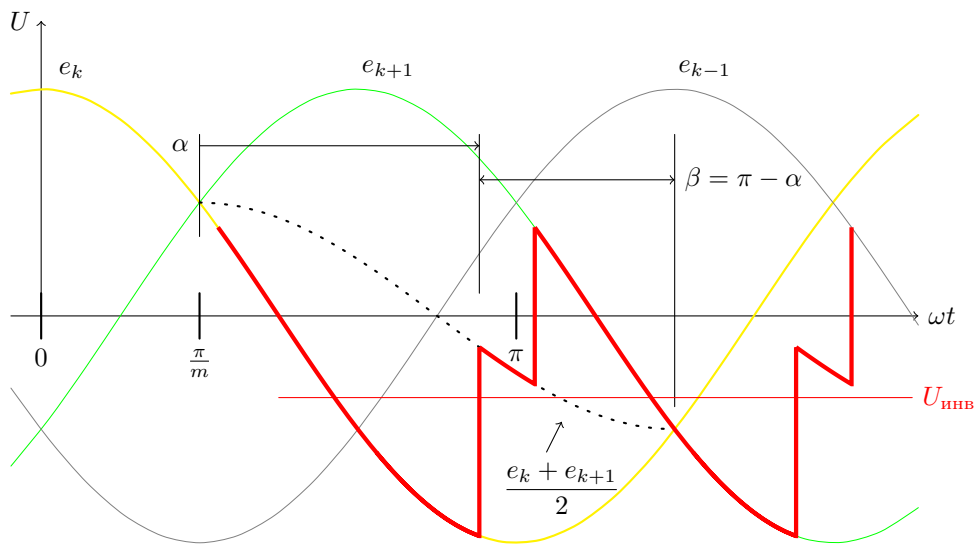
Обычно строят графики  $I_d \approx 0$  и  $I_d \approx I_{\text{номинальный}}$  (близко к номина-

лу). Падение  $\frac{\Delta U_d}{E_{d0}}$  – единицы процента, до 10%. 30% быть не может, поскольку, 15% падение на реактивных и 15% падение на активных сопротивлениях, а 15% потерь недопустимо для КПД выпрямителей. У выпрямителях КПД  $\approx 95\%$ .

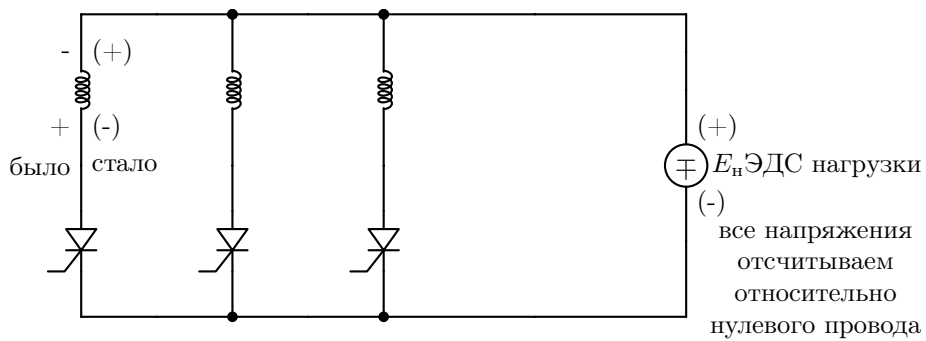
Выпрямленное напряжение становится меньше 0, как это понять?  $I > 0$  всегда. Это не диод,  $\alpha \neq 0$ , это тиристор.  $I \cdot U < 0$ , значит преобразователь преобразует в обратном направлении. И КПД  $\neq 95\%$ , потом поговорим об этом подробнее.

Когда  $U \approx 0$ , напряжение примерно 10% от номинала, КПД уменьшается не потому что увеличиваются потери, а потому что уменьшается мощность.

$P_d = U_d I_d < 0$  – инверторный режим. Инверторный режим преобразователя обычно имеет место когда  $E_d < 0$  и  $\alpha > 90^\circ$ .



За счет чего течёт ток?



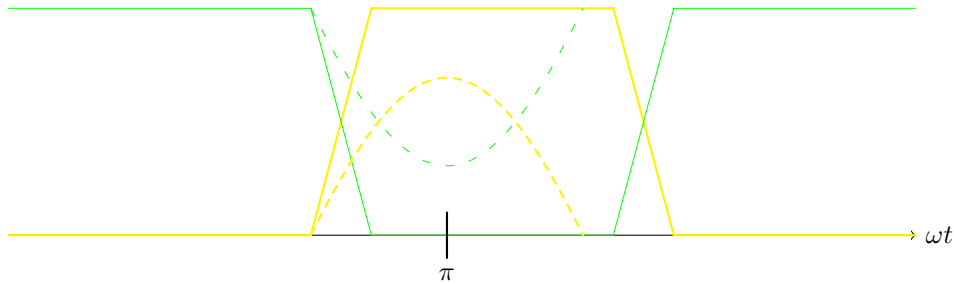
Все напряжения отсчитываются относительно нулевого провода и поэтому ток течёт за счёт ЭДС нагрузки!

$\alpha$  двигаем дальше, от этого положительная часть уменьшается, а отрицательная увеличивается. Если энергия течёт в сеть, значит  $\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} e_n$ .

Теперь рисуем картинку при  $\alpha > 90^\circ$  Введем угол  $\beta$ :

$$\beta = \pi - \alpha$$

$\alpha$  – угол запаздывания,  $\beta$  – угол опережения. Рисуем ток.



$\beta > 0$  Если не выключить  $k$ -й вентиль до точки пересечения, то он уже никогда не выключится. Если  $L$  большая, коммутация не кончится. Темп изменения тока пропорционален ЭДС. Но ЭДС, а значит и скорость нарастания тока уменьшаются, а дальше скорость станет отрицательной, а значит, коммутация не будет продолжаться.

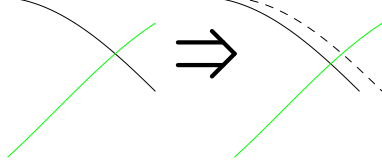
Коммутация вентиля должна закончиться до момента отсчета угла  $\beta$ . В противном случае переключения фаз не произойдёт.  $\beta$  не просто больше 0, а  $\beta > \gamma$ . Предположим, что разность  $\beta - \gamma$  мала. Сравним её со временем выключения вентиля. Вентиль может самопроизвольно включиться  $I \approx n$  носителей.  $I$  убывает, но рекомбинации носителей не произошло (вентиль не восстановился).  $\beta - \gamma >$  времени запираания тиристора.  $\omega t_{\text{выкл}} = \sigma$  – угол запираания или выключения вентиля.

$\beta > \gamma + \sigma$  – каждый раз условие увеличивается.

Практически, учитывается наличие несимметрии напряжения сети, несимметрии углов регулирования  $\alpha$  (несимметрия СИФУ), с учётом несинусоидальности и разброса параметров тиристора необходим запас по углу для устойчивой работы инвертора ( $\psi$  – угол запаса)

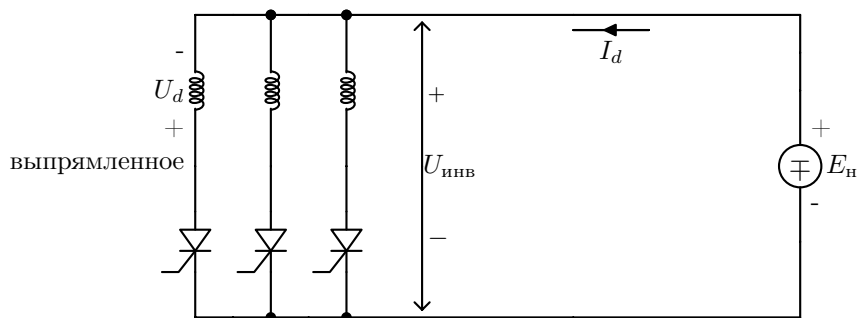
$$\beta \geq (\gamma + \beta + \psi) = \beta_{\min} \quad (4.13)$$

– условие устойчивой работы инвертора. отсюда,  $\alpha_{\max} = \pi - \beta_{\min}$



Если сместилась фаза,  $\beta$  тоже сместилась. Несимметрия СИФУ – средний угол 18,22. Там где не хватает  $\beta$ . Несинусоидальность фазы – опять приводит к необходимости увеличить  $\beta$ . От температуры, тока, который был, напряжение приложенное.  $\Delta\alpha + \Delta\phi$  – несимметрия сети +  $\Delta\phi$  – несинусоидальность +  $\Delta$  (разброс на углы включения). Эмпирически  $\beta_{\min} = 15...30^\circ$ ,  $\alpha_{\max} = 150, 165^\circ$  К чему приведет невыполнение (4.13)? Невыполнение (4.13) может привести к “опрокидыванию” инвертора: вместо инвертора получим выпрямительный режим – аварийный режим, связанный с переходом преобразователя в выпрямительный режим с резким возрастанием выпрямленного тока. Выпрямленный ток может возрастать до значений, близких к току

К.З, Иногда называют током “двойного” К.З., т.е. к К.З. одновременно и преобразователя и источника.



$$I_d = \frac{\overbrace{E_n}^{\text{согласно с током}} - \overbrace{|E_d|}^{\text{само отрицательно}}}{R_n + R_{\text{эквив}}}$$

Была разность ЭДС, а станет сумма.  $U_{\text{инв}}$  – аккумулятор, выпрямитель, солнечная батарея.  $R$  – маленькая,  $R_n - 5\%$  и если напряжение не в плюсе а в минусе, то в 19 раз вырастет ток. Получаем КЗ и для инвертора и для нагрузки. Не двойной ток, а “удвоение” явления. А ток  $I \approx I_{\text{К.З.}}/2$ .

Опрокидывание инвертора приводит к аварийному отключению преобразователя. А есть и электронные средства.

Инверторный режим принципиально менее надежен чем выпрямительный режим.

Опрокидывание инвертора может происходить в случае

- кратковременного исчезновения или резкого уменьшения напряжения питающей сети;
- в случае пропуска (даже одиночного) управляющего импульса.
- в случае ложного несвоевременного срабатывания (даже одиночного) какого-либо вентиля.

4 причины: 1) – невыполнение условий. пропустили импульс – пропал контакт. Ложное отпирание может произойти вследствие сбоя СИФУ – ток растет лавиной.

Где используется инверторный режим.

Солнечные батареи –  $\leftarrow$ ;  $=$ . Где инверторы крайне необходимы. Гидрогенераторы мощностью 100МВт возбуждаются с помощью 10МВт. Для управления генераторами а обмотке возбуждения гигантская магнитная энергия, её и нужно передать в сеть. Для включения-выключения генератора требуется форсировка в 5-8-14 раз. На синхронных компенсаторах в 10-13 раз, 1300В вместо 100в. И такая же скорость снижения должна быть.

Отключение линий. Разгон – выпрямительный режим, Самое экономное торможение – рекуперация,инверторный режим.

#### 4.0.2 Прерывистый режим работы преобразователя

Режим прерывистого выпрямленного тока. Ток нагрузки, правильный ток  $I_d$ . А если он(ток)  $I_d$  начинает прерываться – это прерывистый режим. Пульсация большая. 1й случай – это нонсенс. А вторая ситуация, когда ток маленький и ток сравним с пульсацией.

$$\frac{E_d - E_n}{R_\Sigma} = I_d$$

В этой формуле  $I_d$  – постоянный, варьируется за счет  $E_d - E_n$ .

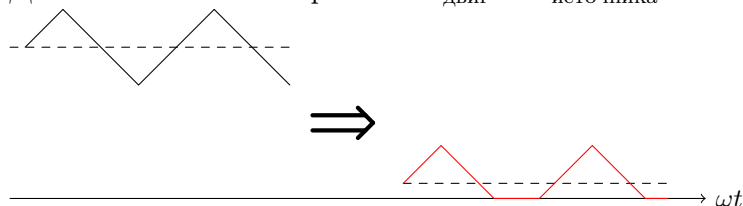
$$e_d = E_d + (e_d) = const$$

$\alpha$  не меняется.

$$\frac{(e_d)}{\text{переменная "Z"}} = const$$

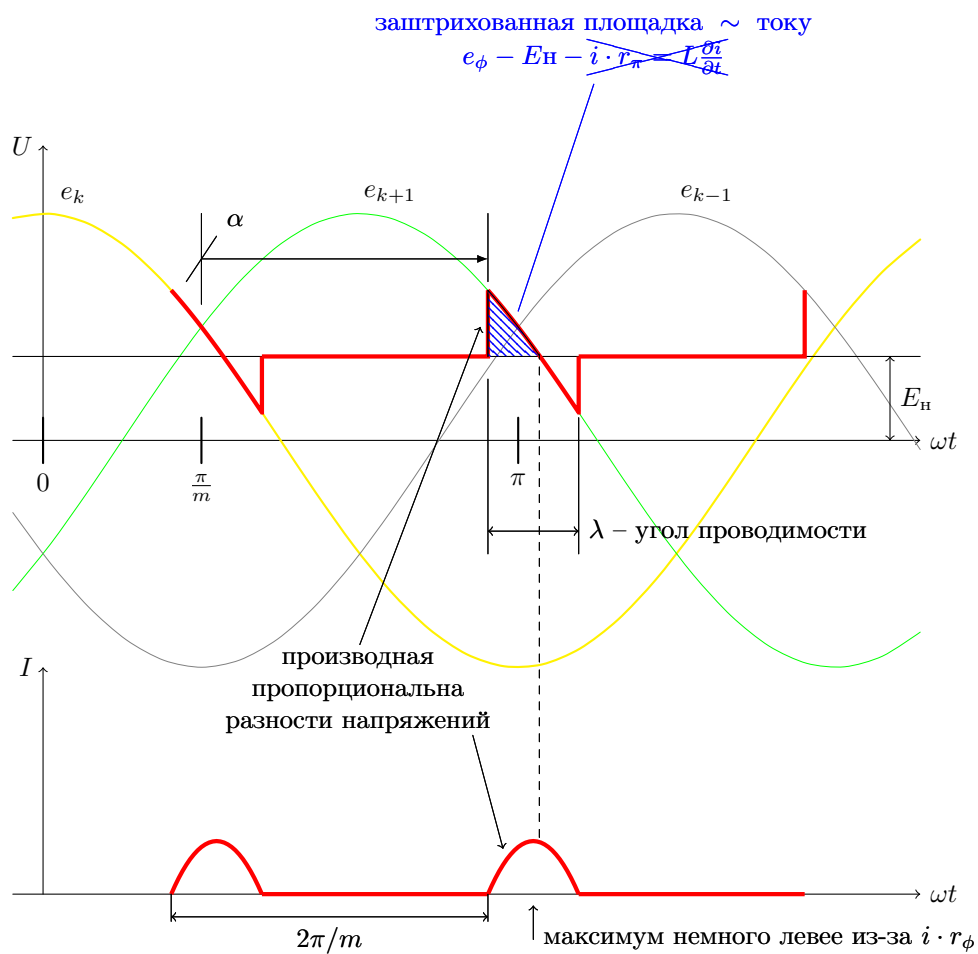
а ток разложить в ряд Фурье.

Двигатель в холостом режиме  $E_{\text{двиг}} \approx E_{\text{источника}}$



Пересечь “нуль” не может, потому что тиристоры не проводят ток в обратном направлении. Такая ситуация бывает в при работе двигателя режиме Х.Х. Ток плохой(маленький), но управлять двигателем нужно и в этом режиме. Для установок, например, для того чтобы вывести двигатель в нужную точку (позиционирование х,у), это может иметь важное значение.





Если бы не было  $i \cdot r_\phi$ , то максимум тока был бы где  $U = E_H$  (производная в точке максимума равна 0).

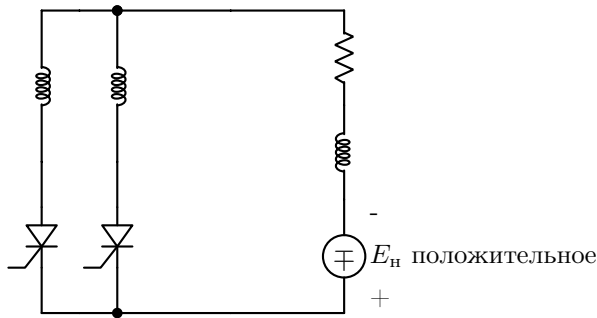
Угол проводимости  $\lambda$  – угол, в течении которого ток больше 0.

Никакого угла коммутации не будет. Ток проводит – пауза – проводит следующий вентиль.

Постоянная ЭДС нагрузки

$$\underbrace{E_d + (e_d)}_{\text{выпрямленное}} - E_H = \underbrace{L \frac{\partial i_d}{\partial t} + R_\Sigma i_d}_{\text{и нагрузка и преобразователь}}$$

$U_0$  включили в  $E_H$ . Разность  $E_d + (e_d) - E_H$  больше 0, чтобы протекал ток.



В паузе будет ЭДС нагрузки, все вентили выключены.

$$U_d = \frac{1}{2\pi/m} \left[ \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{-\frac{\pi}{m} + \alpha + \lambda} \sqrt{2} E_{2\phi} \cos(\omega t) d\omega t + E_n \left( \frac{2\pi}{m} - \lambda \right) \right] =$$

$\lambda < \frac{2\pi}{m}$  – означает, что ток прерывистый.

$\lambda > \frac{2\pi}{m} \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{m} + \gamma$  – режим непрерывного тока.

при  $\lambda = \frac{2\pi}{m}$  – граница, должны сливаться оба режима, сливаются на отрезке длиной  $\gamma = 0$ .

$$= \frac{m}{2\pi} \sqrt{2} E_{2\phi} \left[ \sin \left( -\frac{\pi}{m} + \alpha + \lambda \right) - \sin \left( -\frac{\pi}{m} + \alpha \right) \right] + E_n \left( 1 - \frac{\lambda m}{2\pi} \right) =$$

$$\frac{m}{2\pi} \sqrt{2} E_{2\phi} \sin \frac{\lambda}{2} \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{m} + \frac{\lambda}{2} \right) + E_n \left( 1 - \frac{\lambda m}{2\pi} \right) =$$

$$U_d = E_{d0} \frac{\sin \frac{\lambda}{2}}{\sin \frac{\pi}{m}} \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{m} + \frac{\lambda}{2} \right) + E_n \left( 1 - \frac{\lambda m}{2\pi} \right)$$

$\lambda = \frac{2\pi}{m}$  – граничный режим  $\frac{\pi}{m}$ ?

Частный случай режима работы управляемого преобразователя на чисто активную нагрузку.

$$= \int_{-\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{\pi}{2}}$$

а если  $\alpha = 0$  – тогда не будет прерывистого режима. Прерывистый режим будет в случае когда  $\alpha > 0$

$$\underbrace{\frac{\pi}{m} + \alpha}_{\text{момент включения}}$$

$$> \frac{\pi}{2}$$

следующей фазы

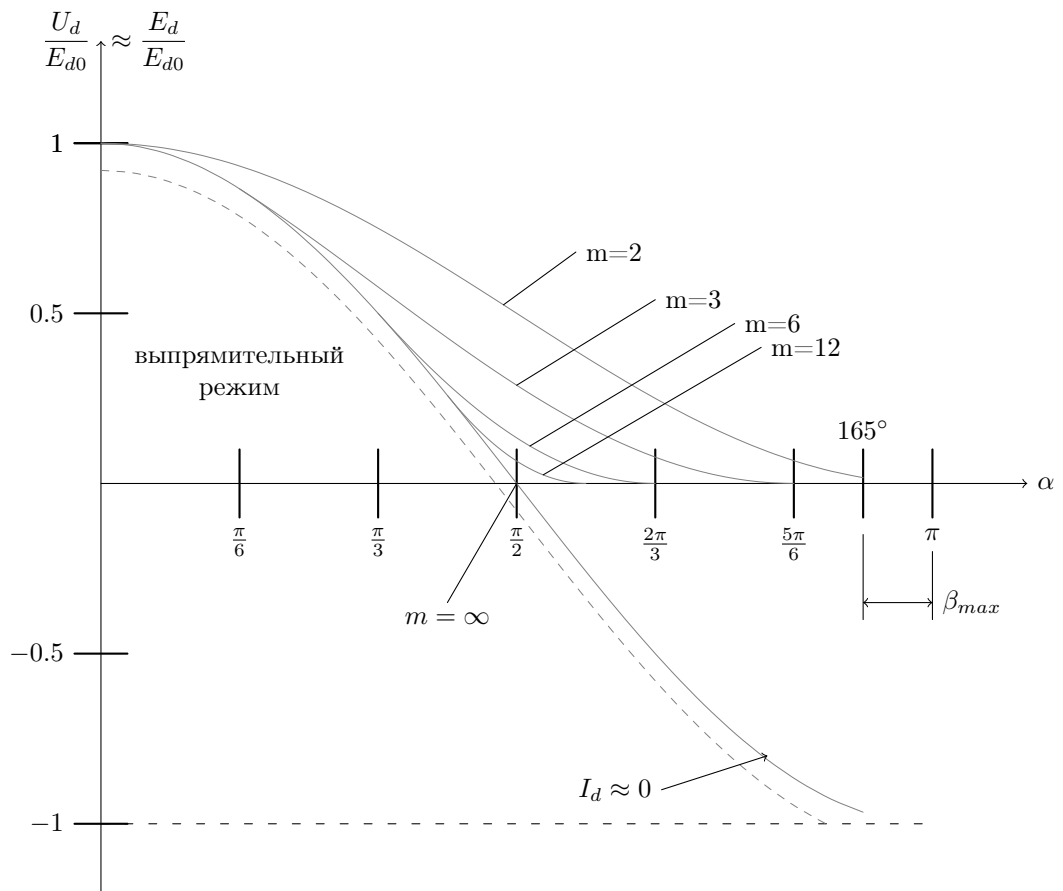
Должно выполняться неравенство, иначе нет прерывистого режима.

$$\frac{m}{2\pi} \sqrt{2} E_{2\phi} \left[ 1 - \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{m} \right) \right] = E_{d0} \frac{1 - \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{m} \right)}{2 \sin \frac{\pi}{m}} \quad (4.14)$$

$$\alpha > \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$$

$$\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} < \alpha < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} \quad (4.15)$$

для разных  $m$  разные неравенства (4.15)

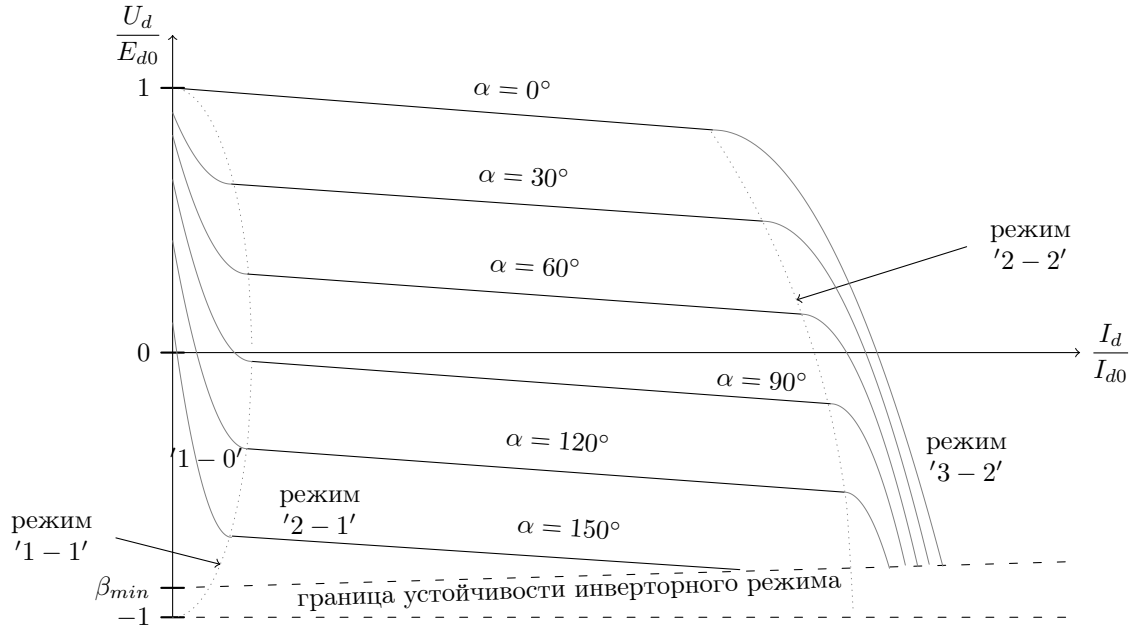


Если  $\alpha < \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$  тогда это непрерывный режим. При  $m = 2$  прерывистый режим начинается как только  $\alpha > 0$ .

$$m = 2 \quad E_d = \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$m = 3 \quad \text{до } 30^\circ \text{ справедлива синусоида, затем } E_d = 1 - \sin(\alpha)$$

#### 4.0.3 Внешние характеристики $\alpha = const$



$$\beta_{min} = \gamma + \delta + \psi$$

Если тока нет, то нет  $\gamma$  и  $\delta$ , остается одна  $\psi$ . С ростом тока  $I$  растет  $\gamma$  и  $\delta$ . Максимальные пульсации  $U$  при  $\alpha = 0$ . На границе прерывистого режима среднее напряжение примерно равно пульсациям.  $\lambda = \frac{2\pi}{m}$  – граничный режим. Справа справедливо уравнение (3) Кривые близки к прямой линии до прерывистого, граничного режима. Режим “1-0”  $0 < \lambda < \frac{2\pi}{m}$  – прерывистый режим, проводит один вентиль “1”, затем он выключается “-0” – никто из вентилях не проводит.

$$\begin{aligned} \text{“1-1”} \quad \lambda &= \frac{2\pi}{m} && \text{– граничный режим} \\ \text{“1-2”} \quad \frac{4\pi}{m} > \lambda > \frac{2\pi}{m} && \text{– двухвентильная коммутация} \end{aligned}$$

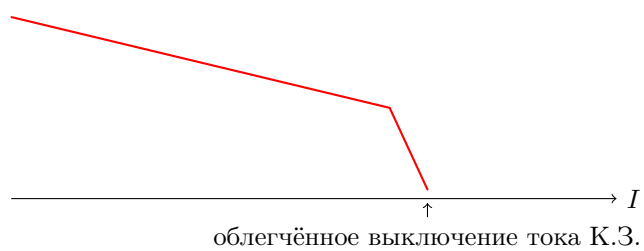
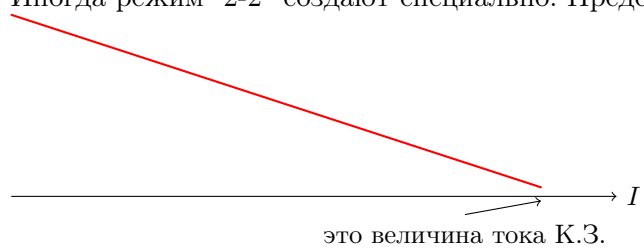
Рассмотрим общий случай многофазного  $m \geq 6$  преобразователя. Основной режим – режим двухвентильной коммутации. При больших токах и больших  $L$

$$\text{“2-2”} - \lambda = \frac{4\pi}{m};$$

$$\text{“2-3”} - \frac{4\pi}{m} < \lambda < \frac{6\pi}{m};$$

Это были характеристики для нулевых схем. В мостовых схемах происходит коммутация: одна половина моста взаимодействует с другой половиной моста.

Иногда режим “2-2” создают специально. Представим К.З.



## Глава 5

# Реверсивные преобразователи

### 5.0.1 реверсивные преобразователи

Ток только справа, отрицательного тока быть не может.

	$U \cdot I$	$\omega \cdot M$
отрицательная	электрическая	механическая
	мощность	мощность

Двигатель постоянного тока:

$$E_{\phi} = \omega C_{\phi}$$

$$M_{\text{эм}} = C_{\phi} I$$

$$C_{\phi} = \frac{pN}{2\pi a}$$

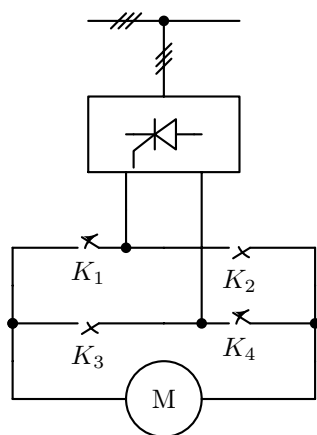
здесь  $p$  – количество полюсов,  $N$  – число активных...,  $a$  – число параллельных ветвей.

Положительный ток, отрицательный момент. Не дай бог двигатель постоянного тока потеряет возбуждение  $\Phi \downarrow \omega \uparrow$  Если  $\Phi \downarrow$  10-кратное форсирование в 10 раз дороже. Применялось при ртутных вентилях, с 20В падением в дуге, и охлаждением. С реверсом поля якоря тогда пытались <сделать> реверсивный поток. Лучше сделаем отрицательный ток.

## 5.0.2 классификация реверсивных тиристорных преобразователей



## 5.0.3 Контактный реверсор



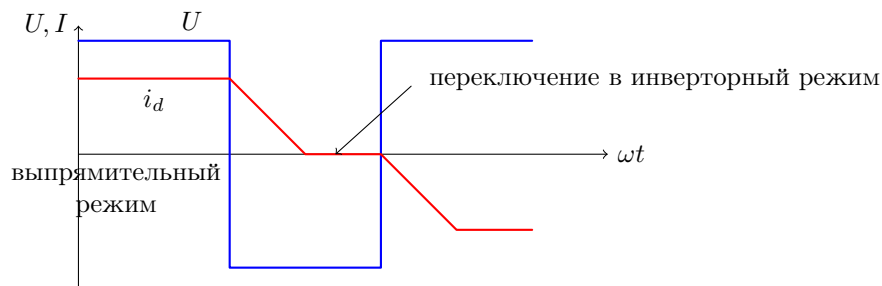
Если включены  $K_2$  и  $K_3$ , ток течет через двигатель справа налево  $\Leftarrow$ ,  
 Если включены  $K_1$  и  $K_4$ , ток течет через двигатель слева направо  $\Rightarrow$ .

Как разорвать, возникает дуга. На переменном токе энергия  $\uparrow\downarrow$ . Дуга затухает, когда переменный ток перейдет через 0.

Для преобразователя уменьшим средний ток до 0, и в этот момент перебросим контакты.

Переключение инверторов





#### 5.0.4 бесконтактный ключ

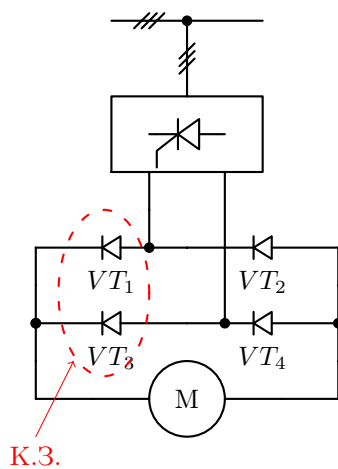


Схема включения ключей аналогична контактному реверсору.  $VT_1$ – $VT_4$  и  $VT_2$ – $VT_3$ . Необходимо сделать паузу чтобы не были включены одновременно  $VT_1$  и  $VT_3$  иначе произойдет короткое замыкание. Недостатки – сэкономил 1 тиристор, а купил 4. Схема применяется для малой мощности, для возбуждителей, для гальваники. В гальванике технологически требуется снять-нанести покрытие. Тренировка аккумуляторов. В линиях постоянного тока происходит реверс мощности а не реверс тока.

Под реверсией понимают изменение чего-либо на противоположное. Если иметь ввиду двигатель, то реверс означает вращение в другую сторону. Напряжение реверсируется даже в нереверсивном преобразователе. Для того чтобы ток был реверсивным нужно как минимум два комплекта вентиляй. В классификации реверсивных преобразователей в первом классе были преобразователи с одной группой вентиляй. Переключение тока происходило посредством переключения полюсов нагрузки с полюсами питания. В истинно реверсивных преобразователях существуют две группы вентиляй.

### 5.0.5 перекрестная схема

исторически самая первая.

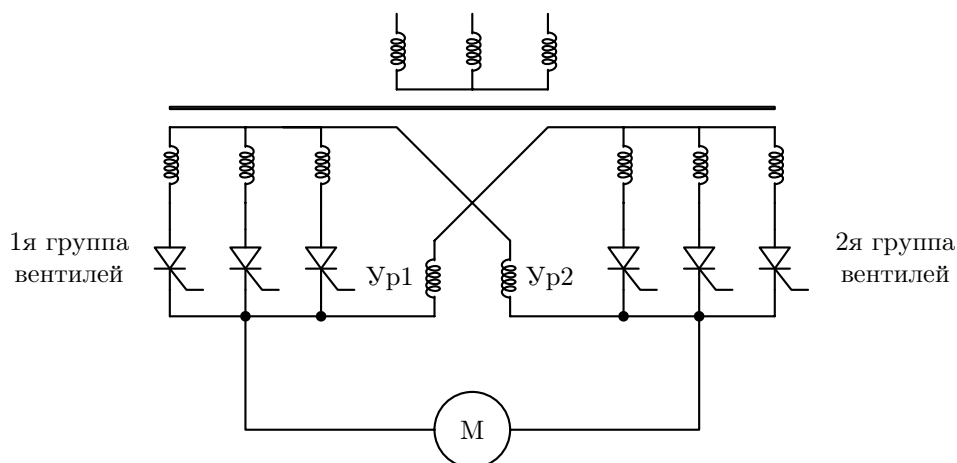
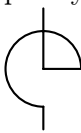
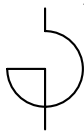


Рис. 5.1: перекрестная схема реверсивного преобразователя

$У_{р1}$  и  $У_{р2}$  – уравнильные реакторы. Силовые индуктивности ри-

суются как  или как 

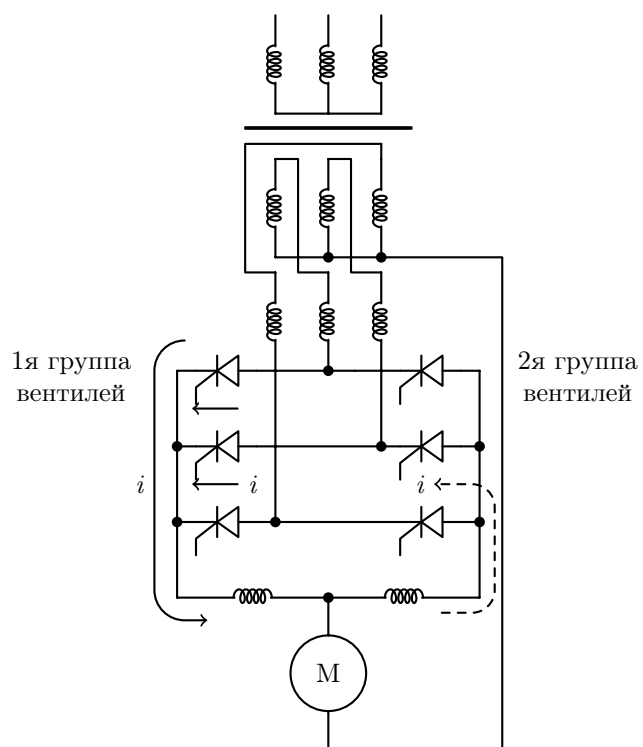


Рис. 5.2: встречно-параллельная схема

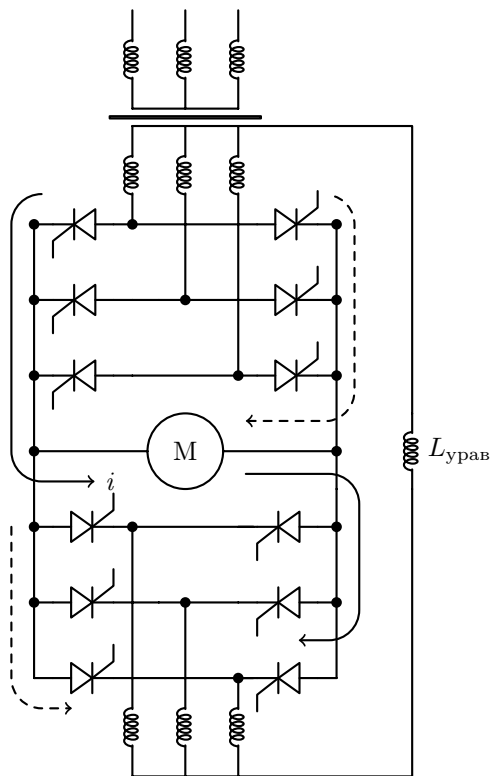


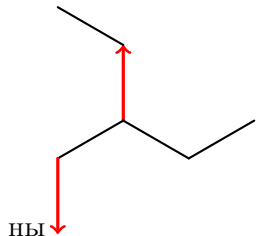
Рис. 5.3: Н-схема

Все схемы изображены для случая трёхфазной нулевой схемы. На примере одной схемы разберём как различаются схемы по признакам классификации. Перекрестная схема состоит из двух групп вентиляей, каждая из которых питается от 3х индивидуальных обмоток трехфазного трансформатора. Вторая схема. Если управлять вентилями с одинаковым  $\alpha$  то получим К.З. на индуктивность. Первая группа вентиляей проводит сверху вниз, другая группа вентиляей проводит снизу вверх. Питается от одного комплекта вентиляных обмоток.

Всякий раз когда появляется нулевая схема вентиляей трансформаторные обмотки соединяются в зигзаг во избежание вынужденного намагничивания трансформатора.

Возвращаясь к первой схеме реверс это реверс тока, не обязательно реверс скорости, но обязательно реверс момента. Если нужно реверсировать момент, то нужно применять реверсивный преобразователь. Прокатные станы производят металлический лист для автомобилей. Нужно регулировать скорость, нужно регулируемое торможение. Ток идет по первой группе вентиляей, затем по мотору, затем через  $U_{p2}$ . Вторая обмотка не работает! В трансформаторе ток течет в одну сторону, подмагничивает сердечник постоянным током. Если есть 3-х фазный трансформатор с 3мя штыревыми сердечниками на каждом сердечнике ток

течёт в одну сторону. Как преодолеть подмагничивание трансформатора? Рассмотрим схему 2. Ток дотёк до трансформатора и разделяется на 2 обмотки. Ток протекает по обмоткам создавая МДС в обе сторо-



ны. 2 обмотки зигзага работают в разные стороны. Для преобразователя малой мощности можно использовать схемы звезда или треугольник. Для преобразователя большой мощности используют зигзаг. Есть альтернатива для того чтобы избежать подмагничивания: можно увеличить количество железа в трансформаторе, а можно увеличить

количество меди соединив обмотки в зигзаг. Векторное сложение МДС даст  $\sqrt{3}$  при соединении обмоток в зигзаг, а если соединить по-



следовательно получилось бы увеличение в 2 раза. В зигзаге получил примерно 15% снижение возможного напряжения. Меди намотал на 200вольт, а получил 173вольта. Одним из условий борьбы с вынужденным намагничиванием, чтобы ток протекал в обе стороны. Из-за этого МДС будет направлена в разные стороны.

3-я схема. Ток протекает как нарисовано на схеме. Обмотки можно



перевернуть как в зигзаге можно не переворачивать. Реактор здесь один –  $L$ . Если ток течёт слева направо то половина вентилялей не работает. Вентильная группа ВГ<sub>2</sub> обеспечивает протекание тока в другую сторону. Ток по обмоткам трансформатора будет протекать в том же направлении. В обратную сторону протекает ток обозначенный штриховкой.

1я схема) 2 набора обмоток и две вентильные группы. Каждый набор обмоток на свою вентильную группу.

2я схема) Один набор обмоток на две группы вентилялей.

3я схема)

1й набор обмоток → 1я группа вентилялей  
2й набор обмоток → 2я группа вентилялей



Первая схема применялась с ионными вентилями. В то время при-

Если считать что в каждом направлении машина работает 50 мин - 1 час, то считается что машина работает долго. Габариты удваиваются  $\frac{S_1 + S_2}{2}$ . В длительном режиме суммарная мощность трансформатора увеличивается в полтора раза. Соцность обмотки определяет расход меди. Первичная обмотка всегда входит с коэффициентом 100%.

$$S_{\text{трансформатора}} = \frac{S_1 + S_2}{2}$$

$[S] = VA(kVA)$ , а мощность нагрузки киловатты  $S_{\text{трансформатора}} = 1.5kP_{\text{нагрузки}}$ , где  $k$  зависит от коэффициента мощности и от ... (коэффициента формы?)

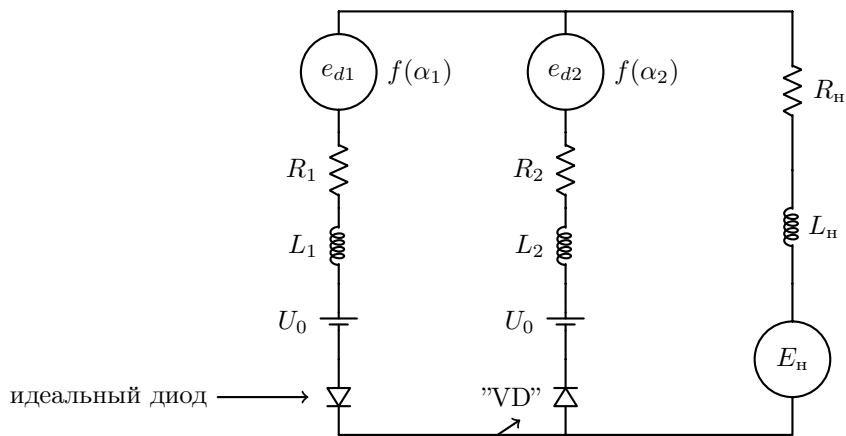
среднеквадратичное включение  $\frac{1}{\sqrt{2}}$

$$S_{\text{трансформатора}} = \frac{1 + 2 \frac{1}{\sqrt{2}}}{2} \approx 1.205 kP_{\text{нагрузки}}$$

Классификация по способу управления – совместное управление группами вентилей и раздельное управление группами вентилей. Рассмотрим схему два. Ток не будет протекать справа – раздельное управление. По реализации оно сложнее. Включается инверторный режим, возникает опрокидывание.

$$\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2?$$

### 5.0.6 Эквивалентная схема замещения реверсивного тиристорного преобразователя



все его параметры вошли в элементы выше выше

Вторая вентиляльная группа  $U_0, L_2, R_2$

Предполагаем

$$L_1 = L_2 = L$$

$$R_1 = R_2 = R$$

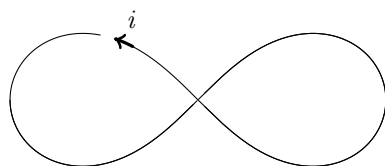
$$\underbrace{e_{d1}}_{\text{мгновенное значение}} = \underbrace{E_{d0} \cos \alpha_1}_{\substack{\text{среднее значение} \\ \text{выпрямленного ЭДС}}} + \underbrace{e_{d1\sim}}_{\text{добавили пульсации}}$$

$$e_{d2} = E_{d0} \cos \alpha_2 + e_{d2\sim}$$

Чему равны  $E_{d01}$  и  $E_{d02}$  в первой схеме? Мы полагаем, что если  $\alpha$  неодинаковые, то пульсации неодинаковые.

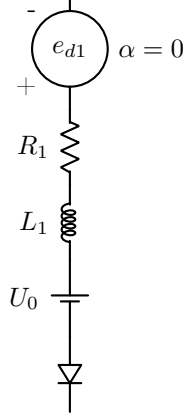
Если раздельное управление?

А почему  $\alpha$  разные.



В первой схеме протекает уравнитель-

ный ток, нежелательный, может быть неприемлемо большой, аварийно-опасный.



Условие отсутствия уравнивающего тока  $e_{d1} + e_{d2} \leq 0$  при пренебрежении  $U_0$ .

$$e_{d1} + e_{d2} \leq 2U_0$$

$$E_{d0}(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) + e_{\text{уравнивающее}} \leq 2U_0$$

Где  $e_{\text{уравнивающее}} = e_{d1\sim} + e_{d2\sim}$

Можно записать отдельно условия отсутствия уравнивающего тока:

Переменная составляющая уравнивающего тока должна быть  $\leq 2U_0$

и постоянная составляющая уравнивающего тока должна быть  $\leq 2U_0$ .

Для постоянной составляющей

$$E_{d0}(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) \leq 2U_0 \Rightarrow \cos\alpha_1 + \cos\alpha_2 \leq \frac{2U_0}{E_{d0}}$$

Если  $\frac{2U_0}{E_{d0}} \approx 0$  тогда пишем для случая равенства 0:

$$2\cos\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cdot \cos\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \leq 0$$

$$\begin{aligned} 0 < \alpha_1 < \pi - \cancel{\beta_{\text{min}}} \\ 0 < \alpha_2 < \pi - \cancel{\beta_{\text{min}}} \end{aligned}$$

но  $\cos\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \neq 0$  никогда не равно нулю на всем диапазоне.

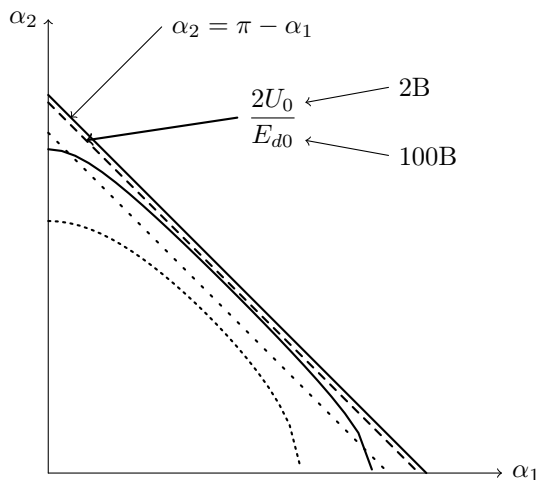
$$\cos\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \leq 0 \quad (5.1)$$

$$E_{d0}(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) \leq 2U_0$$

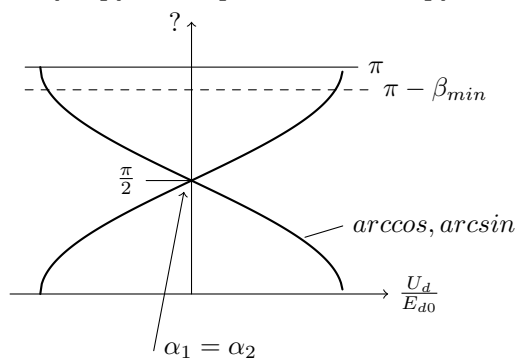
$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 + \alpha_2 \geq \pi \\ \cos\alpha_1 + \cos\alpha_2 \leq \frac{2U_0}{E_{d0}} \end{array} \right. \quad \left( \text{при } \frac{U_0}{E_{d0}} = 0 \right) \quad (5.2)$$



Условия (5.2) являются условиями совместного управления.  $\alpha_1$  меняется, чтобы вторая группа не мешала  $\alpha_1 = \pi - \alpha_2$



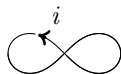
Регулируем напряжение на нагрузке.



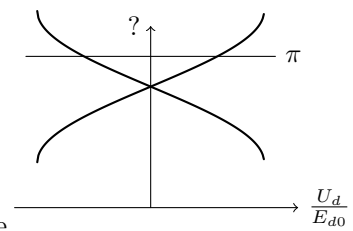
Получили соотношение для постоянных составляющих при совместном управлении.

$$e_{d1\sim} + e_{d2\sim} = U_{yp} \leq 0$$

Корректно ли ставить такую задачу? переменная составляющая на самом деле – знакопеременная. Уравнительный ток останется. Если ток переменный, то его можно ограничить индуктивностью до заранее выбранного значения.



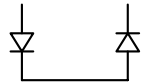
– переменная составляющая 50-70%. Что можно сделать?



Иногда делают навстречу постоянное напряжение

Для ограничения уравнивающего тока обусловленного переменной составляющей уравнивающего тока используются уравнивающие реакторы.

Схему иногда называют "восьмеркой". Как рассчитать реакторы? Существуют графики, можно определить зависимость от одного угла, либо от выпрямленного напряжения. Ток переменный или постоянный. Пойдёт ток как в однополупериодной схеме.



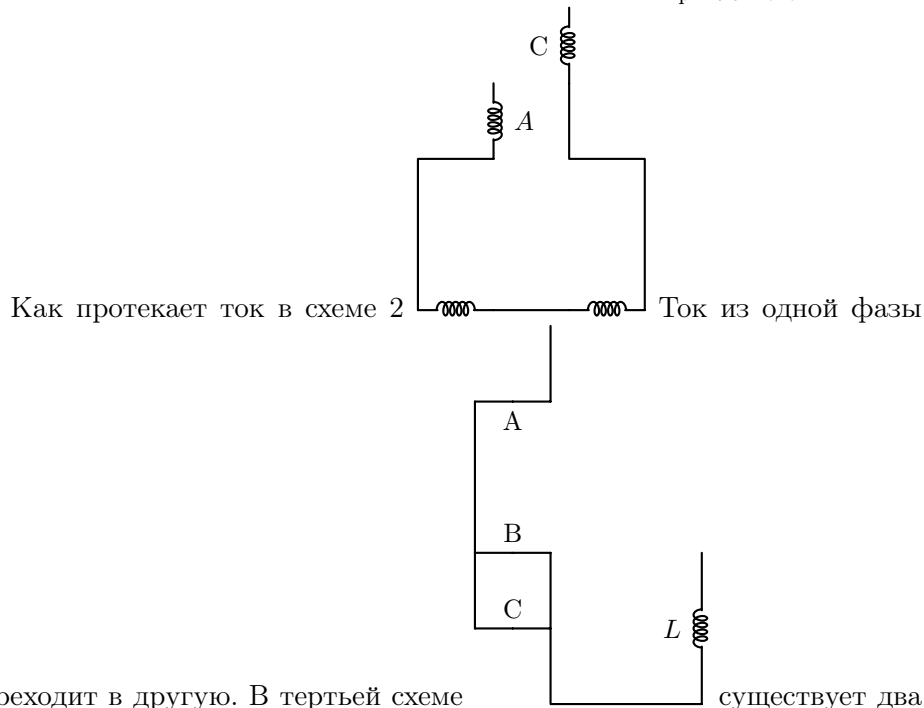
– однополупериодная схема.

Если ток течёт без перерыва, то падение напряжения  $U = 0$ .  $I_{\text{малый ток}}$ .

$r_{\text{проводов}}$  – величина второго порядка малости если обеспечен  $I_{\text{малый ток}}$ .

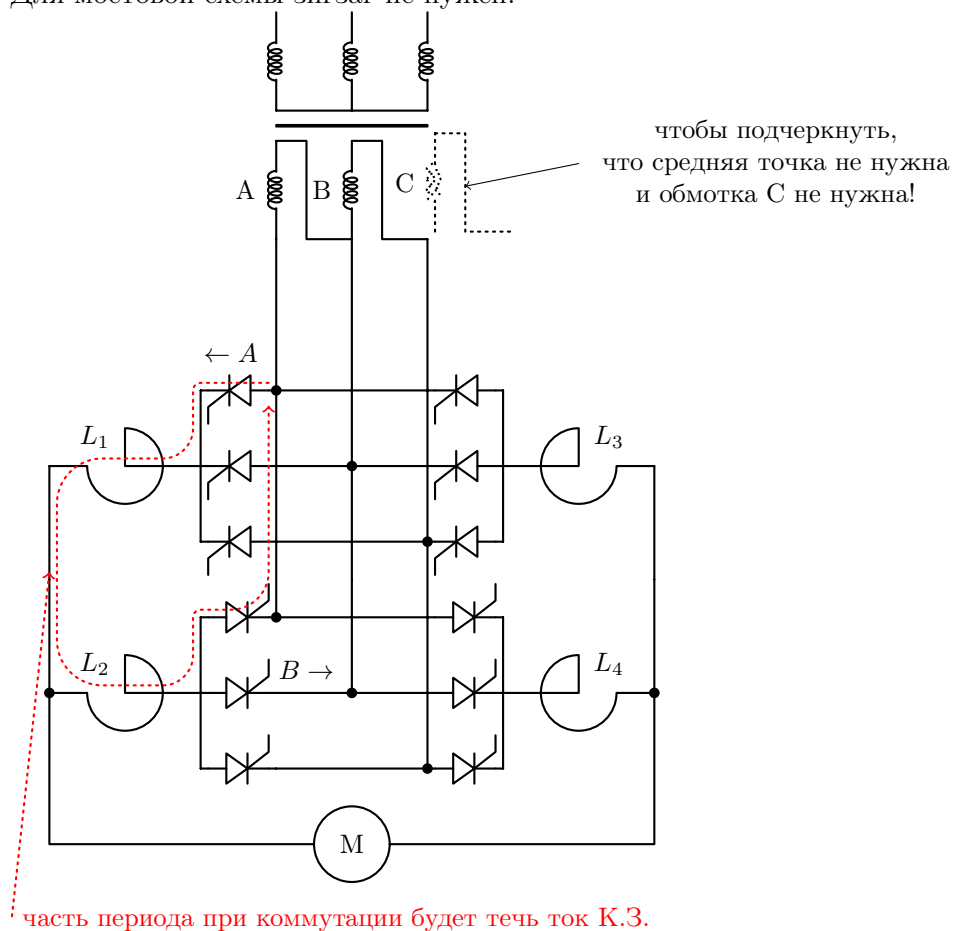
Зависимость  $U_{\text{выпрямленного}}$  от  $\alpha$ .

Задавшись максимальным уравнивающим током  $\Rightarrow$  зададимся индуктивностью. Ток загружает вентили, загружает трансформатор. Используемые уравнивающие реакторы выбираются по максимальному значению  $U_{\text{ур.}}$ , зависящему от соотношения углов  $\alpha$ . Обычно величина  $I_{\text{ур.}}$  ограничивается на 10% меньше от номинального  $I_{\text{выпрямленного}}$

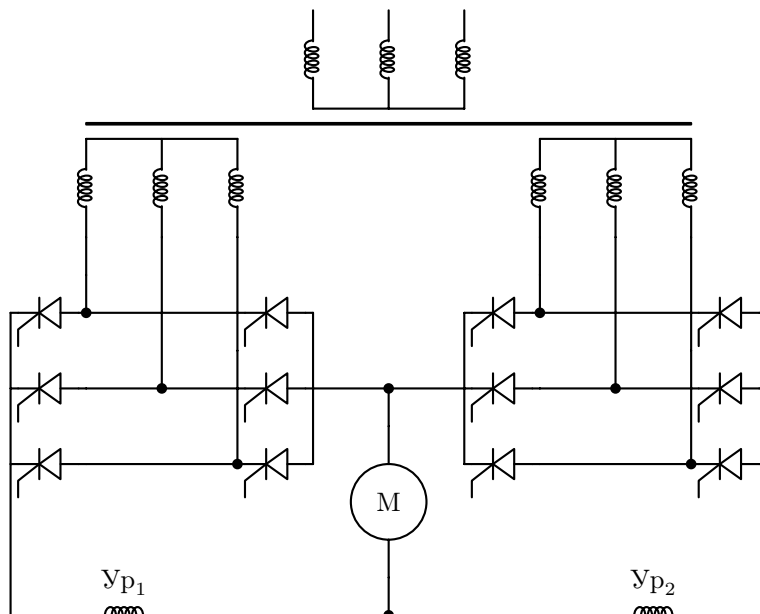


контура уравнивающего тока, а реактор один для двух контуров тока. Н-схема – средняя. Вторая схема самая хорошая. Фирмы-производители не часто использовали Н-схему.

Для мостовой схемы зигзаг не нужен.



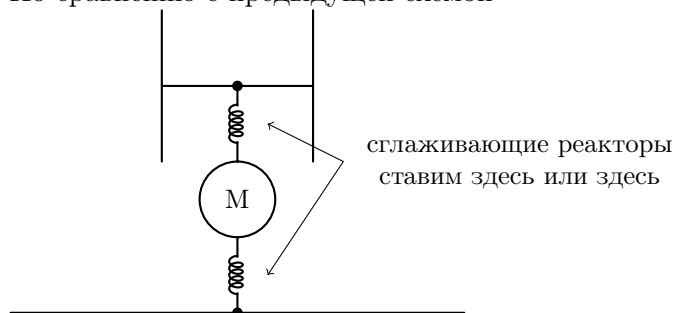
Куда включить реакторы? Сначала включим по самой сложной/полной схеме. Потом будем выбрасывать.  $L_2/L_3$  – можно убрать два реактора, только симметрично. Могут использоваться 2 реактора или все четыре. Наличие двух контуров уравнивающего тока с большой составляющей переменного напряжения является главным недостатком встречно-параллельной схемы.



Выбор уравнивающего напряжения – по амплитуде. 6-ти пульсная схема + 6-ти пульсная = пульсации меньше. А в предыдущей схеме 3-х пульсная (4 реактора, мощность на большую амплитуду и низкую частоту) H-схема имеет преимущество, потому что один реактор.

При раздельном управлении импульсы поступают на одну ... Необходимость использования уравнивающих реакторов отсутствует. По этому признаку можем отличить раздельное управление.

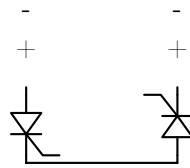
По сравнению с предыдущей схемой



Отсутствие уравнивающих токов и отсутствие реакторов является главным достоинством раздельного способа управления.

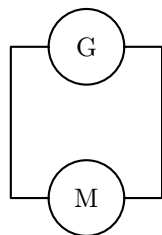
Если один выпрямитель а другой инвертор сумма углов 180.

$$\begin{array}{ll} \alpha = 60 & \alpha = 120 \\ \cos = \frac{1}{2} & \cos = -\frac{1}{2} \end{array}$$



В схеме замещения: напряжение  $\frac{1}{2}$  и  $\frac{1}{2}$

А как протекает ток? нагрузка выбирает куда течь току. Возникает полная аналогия с системой Леонардо (генератор+двигатель)



противо ЭДС

Двигатель выбирает направление тока.

Обмоткой возбуждения можно заставить ...

Недостаток раздельного управления ... ток не протекает ... но из-за управл.

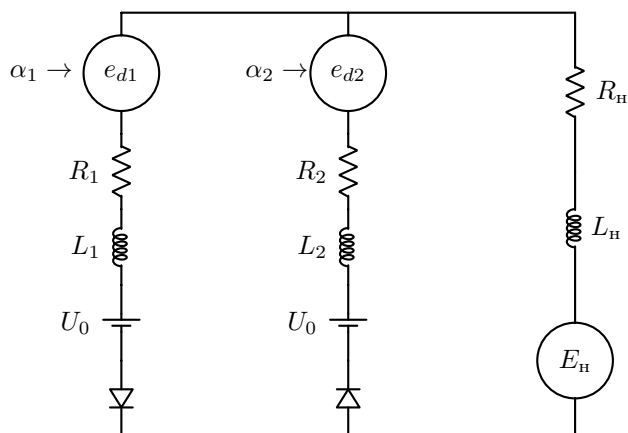
Плохо, что всегда есть инвертор. потому что принципиально инвертор ненадежен. Инверторный двигатель не в состоянии выбрать направление.

Второй недостаток схемы совместного?? управления – всегда имеет инверторный режим. Достоинство = полная идентичность с системой двигатель+генератор

А при раздельном управлении нужно соответствующее управление.

Как реализовать раздельное управление?

### 5.0.7 Принципы построения раздельной системы управления



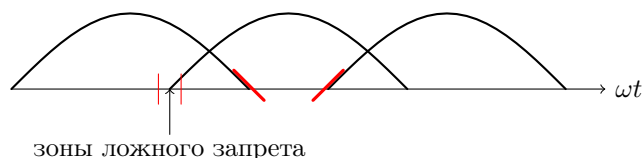
При переходе к разделённому управлению технологи не торопились снимать уравнильные реакторы. Инерционность реакторов помогала защите.

При переключении вентильных групп

- а) вначале выключаются импульсы одной вентильной группы, затем включаются на другой;
- б) отключать можно в тот момент когда ток равен нулю. Потому что пока есть ток есть инверторный режим нельзя включать. Включение при нулевом токе в нагрузке.
- в) после того как ток спал до нуля, но включать только после паузы превышающей время выключения вентиля
- а) вначале отключили, потом включили
- б) отключение после того как ток  $I = 0$
- в) выключение спустя  $\Delta t > t_{\text{выключение тиристора}}$ . Есть дополнительное условие: нельзя отключать импульсы в момент формирования импульсов
- г) тиристор открылся а датчик не смог ... определить что ток есть. Запрет отключения в момент когда импульс сформировался.
- д) (замена второго пункта, вариант) Вместо контроля за током используется контроль состояния всех тиристоров(вентилей)

$10kA$ , чтобы гарантировать что тиристоры выключились,  $I < I_{\text{удержания}}$ , 100-200mA. Покажет ток утечки тиристоров, а этот ток может быть большим, потому что используется несколько тиристоров. Ток утечки 18 закрытых тиристоров может быть больше чем ток удержания одного тиристора. Определив ток, не знаем что это за ток: ток удержания одного тиристора или ток утечки всех.

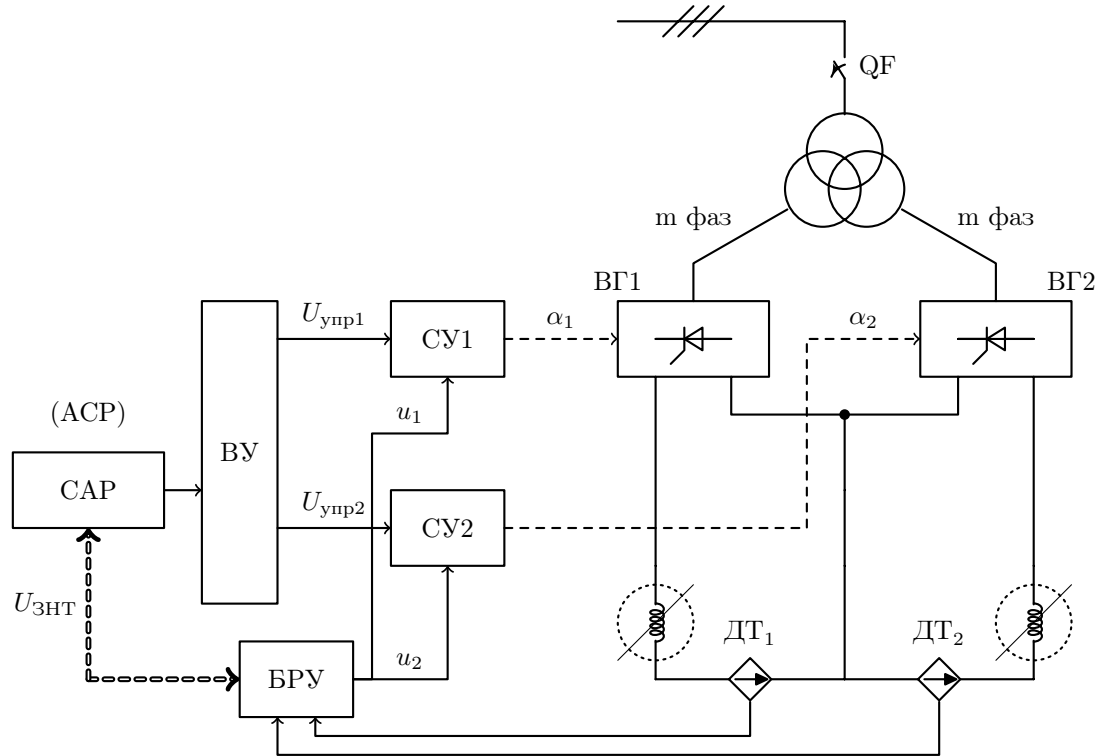
Датчики ДЗВ (запирания вентилей). Будем контролировать  $\Delta U_{\text{тиристора}}$ . 15 вольт – гарантия что тиристор заперт. На каждом больше 15 вольт – точно заперт



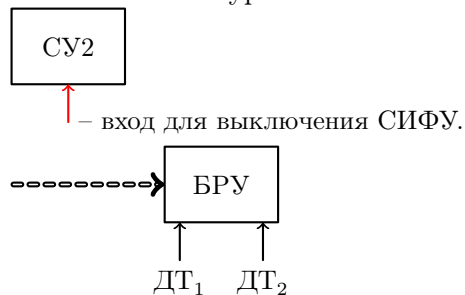
Тиристор открыт – на нем нулевое напряжение. Лучше ложный запрет чем ложное разрешение.

НПЧ – непосредственный преобразователь частоты.

### 5.0.8 Функциональная схема раздельного управления



Трансформатор имеет особенность преобразовывать число фаз. У каждой вентильной группы (ВГ) своя система управления СИФУ (СУ) или система управления вентилями (СУВ). Каждая  $SU_N$  генерирует сигналы с углом  $\alpha_N$ . Импульсов должно быть  $m$ . Уравнительные реакторы используются только в случае совместного управления. На схеме уравнительные реакторы обведены кружками, чтобы подчеркнуть, что в раздельном управлении они не обязательны. При совместном управлении должно выполняться условие  $\alpha_1 + \alpha_2 > \pi$ , в противном случае протекает большой уравнительный ток.



БРУ – блок раздельного управления. Токи управления от датчиков тока ДТ<sub>1</sub> и ДТ<sub>2</sub> (10-100mA, max 10-15V). БРУ  $\equiv$  ЛПУ – он же логическое переключающее устройство. Стрелкой  $\dashrightarrow$  обозначен сигнал иницирующий работу (вначале отключить, затем включить после паузы).

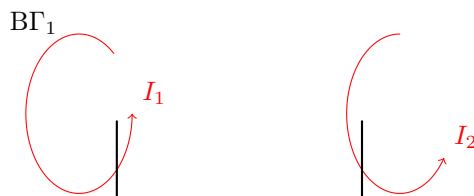


Рис. 5.4: направление тока

Одновременно токи  $I_1$  и  $I_2$  не могут существовать, должна быть пауза, чтобы тиристоры выключились.

Для измерения переменного тока существует трансформатор тока, изолированный от силовой цепи. Существуют “трансформатор постоянного тока” построенный на принципе подмагничивания. Чаще всего используется токоизменительный шунт. Исторически шунты рассчитывались на протекание тока  $45mV$ , в настоящее время рассчитываются на  $75mV$ . С помощью шунта превратили сигнал тока в напряжение. Чтобы не было ошибок в динамике нужно чтобы шунт был безиндуктивный. Представим, что через преобразователь проходит ток  $10kA$ , или  $1000A$ , тогда даже милливольты превращаются в большее ватты.

Заострим проблему: Сумма токов утечек например 10 включенных параллельно вентилей может превысить ток удержания. Выключаются вентили последовательно, и наконец остается один последний вентиль в котором

$$\begin{array}{rcl} 10kA & - & 75mV \\ 10mA & - & \end{array}$$

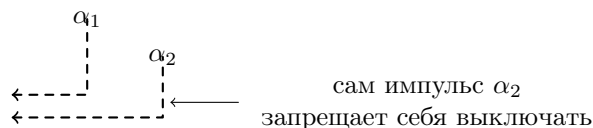
величина может превысить порог чувствительности для удержания одного.

(АСР) – автоматическая система регулирования по ГОСТу. (САР) – система автоматического регулирования.



– сигнал заданного направления тока, тоже логический (0 или

1) Отключать можно тогда, когда  $I = 0$ . Увеличиваем  $\alpha$ , ток  $I$  падает до нуля, в этот момент БРУ отключает импульсы, и это же побудительный момент для перемены направления тока. Не показаны выдержки времени. Кроме того есть запрет на переключения в момент формирования импульсов



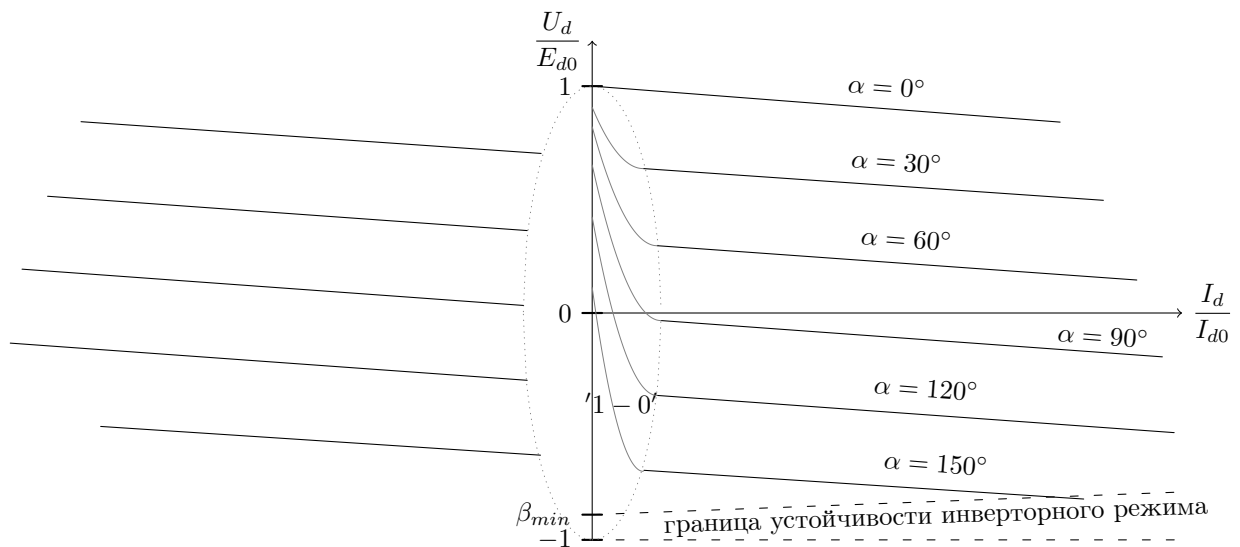
функция необязательная но часто используемая. Ненадежность токовой логики шунта с усилителем. Возникает проблема: ток перегрузки



двигателя 250% номинала. Контролируемый ток 1/1000 доля номинала. Вместо датчика тока используются датчики напряжения 1-2...4В – падение напряжения в открытом состоянии. Вместо датчика тока используются датчик запертого состояния тиристора. Бывает, что датчик говорить “0”, но это может оказаться переменный ток проходящий через нуль. Схемы управления бывают аналоговыми, цифроаналоговыми. Когда система управления реализуется аппаратно нужны ли две системы управления. У трансформатора не работает. Убрали уравнивательные реакторы, для этого и была нужна система раздельного управления, чтобы оптимизировать. Зачем два СИФУ? Аппаратно и программно алгоритм может быть выполнен с одной СУ. Тогда вместо двух систем импульсов(включения и выключения) используется переключатель между двумя СИФУ. Если СИФУ одно,  $\alpha_1 \downarrow \alpha_2 \uparrow$  (переключение и на выходе и на входе). Обязательно должен предусмотреть переключение на входе.

### 5.0.9 Внешние характеристики реверсивных преобразователей

До этого рисовали внешние характеристики в 2х квадрантах, сейчас нарисуем в 4х квадрантах



Говорили, что область внутри эллипса это область прерывистого тока. По умолчанию все углы в радианах.  $\beta_{min}(\gamma, \delta, \psi)$ ,  $\alpha_{max} = 150^\circ - 160^\circ$ . Забыли про правую полуплоскость. На левой – другой преобразователь. По отношению к нагрузке этот преобразователь включён “наоборот”?

Симметрично относительно начала координат внешние характеристики реверсивных преобразователей с раздельным управлением.

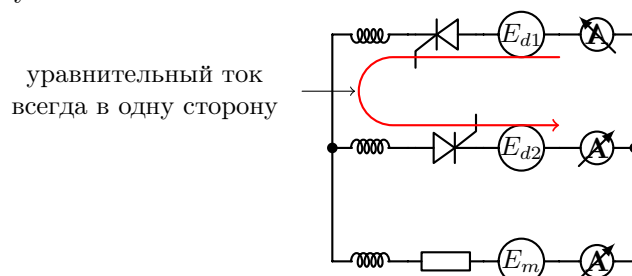
А что с совместным управлением?  $\alpha_1 + \alpha_2 > 180^\circ$ . Не учёл падение от активных сопротивлений и  $U_0$  и не рисуем область многовентильной

коммутации.

При совместном управлении различают два способа управления:

- совместное согласованное  $\alpha_1 + \alpha_2 \approx \pi$  с максимально доступной точностью.
- совместное несогласованное, когда  $\alpha_1 + \alpha_2 > \pi$

В инженерном плане равенство  $= \pi$  невозможно точно измерить и оно легко может нарушиться из-за нестабильности. Если же заведомо не стремиться к равенству нулю, тогда будет заведомо большой уравни-  
тельный ток. <Если импульсы не отключаются то правая ЭДС присутствует слева?>



Уравни- тельный ток всегда идет минуя нагрузку. Рассмотрим пример

60A ←  
80A →  
20A ←

Какой уравни- тельный ток? Уравни- тельный ток равен 60A

350A ←  
90A →  
260A →

Меньший из двух вентильных токов – уравни- тельный. А разность есть ток нагрузки. Увеличили угол значит падение напряжения на вен- тидлях уменьшились? Уравни- тельный ток большой, значит углы раз- двигаются.

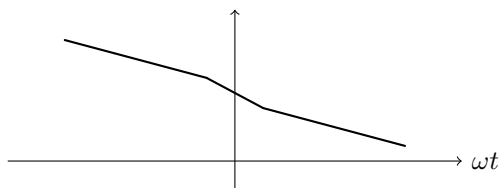
Совместное управление не миф, а может быть реализовано достаточ- но точно.

На графике изображен ток в нагрузке, но есть уравни- тельный ток.

Для реверсивного преобразователя  
но в вентильной группе.

Внутри эллипса ток собствен- но в вентильной группе.

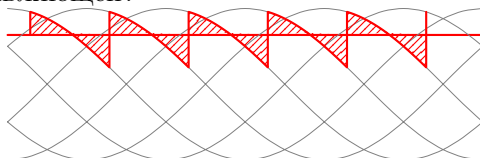
Поэтому характеристики спрямляются



Дадим оценку тому что прошли: совместное управление мы его обругали, но есть спрямление характеристик в области малых токов. В теории автоматического управления электроприводами. Нужен измеритель уравнительного тока. В одной вентильной группе сумма уравнительного тока плюс нагрузка, в другом только уравнильный ток. Спрявление характеристик – достоинство совместного управления.

### 5.0.10 Пульсации выпрямленного напряжения и тока

Выпрямленное с дефектами, пульсациями. Нужно количественно оценить амплитуду пульсаций. Как определить амплитуду переменной составляющей?



Можно представить рядом Фурье m-пульсаций.

$$f_{\text{гармоники}} = k(mf_c)$$

где  $k = 1...k...$ ,  $f_c$  – частота сети

Найдем  $U_k$  гармоники.

При  $m = 6$ ,  $f_c = 50\text{Гц}$

$$\begin{aligned} f_{\text{гармоники}} &= 300 \\ &600 \\ &900 \\ &1200 \end{aligned}$$

Допустим, мы знаем как выбрать фильтр? Нам нужно фильтровать гармоники тока, а не гармоники  $U$ . Зная  $U_k$  найти  $I_k$ , затем сложить. Неблагодарная задача. Обычно берут первую гармонику, учитывают с коэффициентом запаса.

$$E_{dkm} = \frac{\sqrt{2}E_{d0}}{(km)^2 - 1} \sqrt{\cos^2 \alpha + (km \sin \alpha)^2}$$

Чем больше  $\alpha$  гармоника возрастает. Максимальная величина гармоники при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , Это понятно из графика и из формулы

$$(E_{dkm})_{max} = \frac{km}{(km)^2 - 1} \sqrt{2} E_{d0}$$

С ростом  $m$  гармоники убывают.

Можно считать, что гармоники обратно пропорционально частоте.

$$E_{\sim} = \frac{m}{(m)^2 - 1} \sqrt{2} E_{d0}$$

$$f = m f_c$$

С коэффициентом запаса 10-20%. Если  $\alpha$  не доходит до  $90^\circ$ , тогда считают для максимального  $\alpha$ .

Ток возбуждения  $I_{min}$ , нулём никогда не бывает. По заданному току

$$I_{\sim} = \frac{E_{\sim}}{\omega L_{\Sigma}} =$$

$L_{\Sigma}$  по всей цепи и постоянного и переменного тока

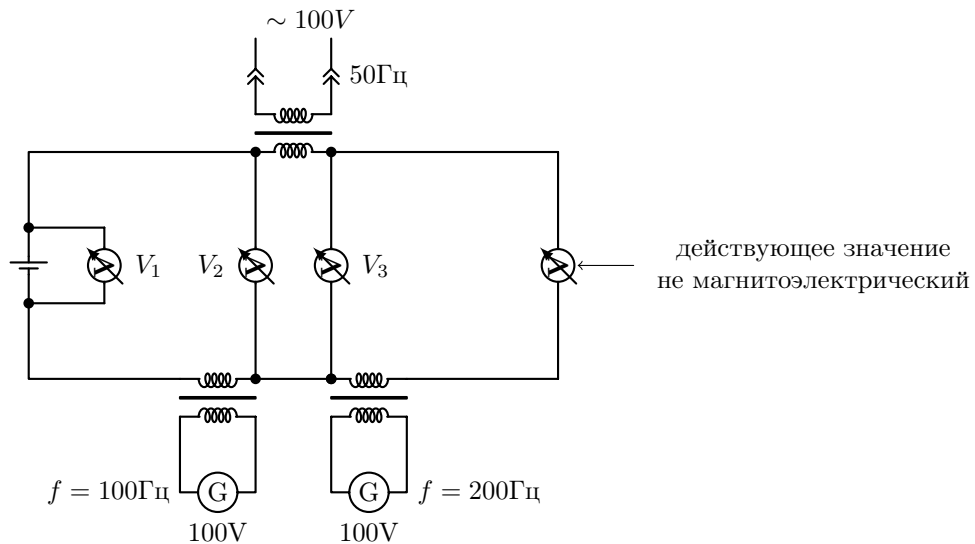
$$= \frac{\mu \sqrt{2} E_{d0}}{(m^2 - 1) 2\pi \mu F_c L_{\Sigma}} (m \text{ можно сократить})$$

$$L_{\Sigma} = L_{\phi} + L_{н} + L_{\Phi}$$

Возникает задача. Если нужно ограничить до заданной величины.

Рассмотрим другой способ решения, нравится больше, но тоже приближенный.

Рассмотрим небольшую задачу:



Если частоты не одинаковы, то действующее значение равно квадратному корню из суммы квадратов.

Оценим

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

Не учтен угол коммутации в формуле. При больших  $\alpha$  угол  $\gamma$  уменьшается.  $\gamma$  вызван индуктивностью, для высших гармоник это сопротивление – гармоники будут уменьшаться. Должен учитывать худший случай. Поэтому сейчас угол коммутации игнорируем. Найдём среднеквадратичную составляющую:

$$\sqrt{2}E_{2\phi} = \frac{E_{d0}}{\frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}}$$

из формулы (1)

$$E_{\text{дср.кв.}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi/m} \int \frac{\text{от квадрата}}{\text{мгновенного значения}} dt} =$$

$E_{\text{дср.кв.}}$  – это на активную нагрузку (физический смысл)

$$= \sqrt{\frac{1}{2\pi/m} \int_{-\frac{\pi}{m}+\alpha}^{\frac{\pi}{m}+\alpha} \frac{E_{d0}}{\frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}} \cos \omega t dt} = \frac{E_{d0}}{\sqrt{2} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}} \sqrt{1 + \frac{m}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{m} \cos 2\alpha}$$

$$E_{d\nu} = \sqrt{E_{\text{дср.кв.}}^2 - E_d^2} =$$

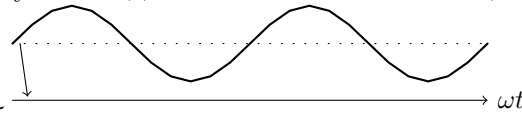
$E_{d\nu}$  – действующее значение всех гармоник на стороне постоянного тока.  $E_d - E_{\text{дср.кв.}}$

$$= E_{2\phi} \sqrt{1 - \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \left[ 2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} (\cos \alpha)^2 - \cos \frac{\pi}{m} \cos 2\alpha \right]}$$

Вместо  $E_{2\phi}$  можно подставить  $\frac{E_{d0}}{\sqrt{2} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}}$ , можно преобразовать, в разной форме можно записать, но эта форма понятнее.

Напряжение может интересовать только при чисто активной нагрузке.

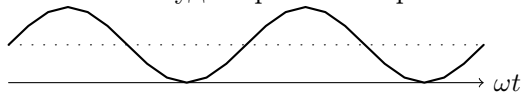
Наибольшие пульсации имеет граничный режим, который можно понимать как случай когда постоянная составляющая равна пульсациям



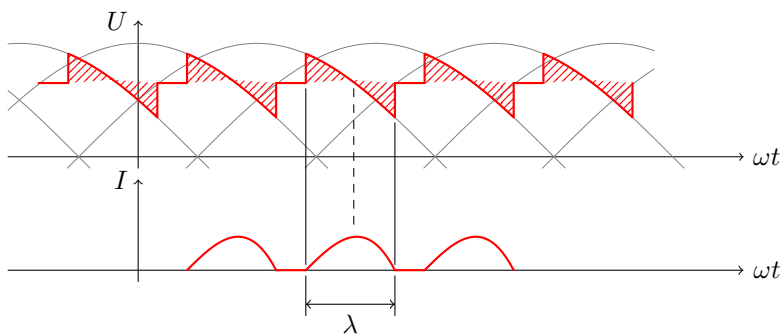
если среднее будет уменьшаться

Переменная составляющая не влияет на постоянную. Зависит от  $\alpha$ , но зависит ещё от ЭДС нагрузки. если среднее будет уменьшаться то это никак не отразится на переменной составляющей.

Прерывистый режим начнётся, когда переменная составляющая коснётся 0. Это и будет граничный режим.



6-ти пульсная кривая.



Знаю, что ток маленький  $R_\phi, R_D, R_\Phi, I_{\text{малое}}, R_\Sigma$ , много меньше ЭДС синусоиды

$$\begin{array}{c} \text{ЭДС нагрузки} + \cancel{\text{синусоида}} \\ \uparrow \\ \text{непренебрежимо} \end{array}$$

Есть ЭДС нагрузки плюс индуктивность.

$$e_d - E_n = L_\Sigma \frac{\partial i_d}{\partial t} + \cancel{i_d R_\Sigma}$$

Член  $i_d R_\Sigma$  демонстративно зачёркнут, потому что второго порядка малости. Даже при номинальном токе составляет несколько процентов.

$i_d$  это и есть  $i_{\text{фазы}}$ .

Проинтегрировав эту разность  $i_d = f(\omega t)$ , а потом возьмём интеграл

$$I_{d\text{среднее}} = \int i_d d(\omega t) =$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{m} - \text{граничный режим.}$$

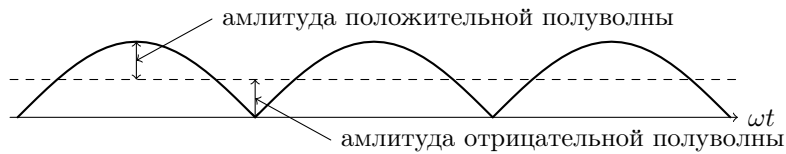
$$\frac{1}{2\pi/m} \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{\frac{\pi}{m} + \alpha} i_d d(\omega t)$$

– среднее значение граничного тока.

$$I_{d\text{гр}} = f(m, \alpha) = I(\sim)$$

– амплитуда пульсаций выпрямленного тока.

Полагая, что  $I_{\text{среднее}} = I_{\text{амплитуда пульсаций выпрямленного тока}}$ , получим зависимость максимальных пульсаций с учётом гармонического состава. Этот способ учитывает реальную кривую без разложения её в ряд Фурье. Чему равна амплитуда тока?



Можно ли считать полную амплитуду удвоением амплитуды нижней полуволны. Точного расчёта пульсаций тока не существует.

Размах колебаний  $(A_+ + A_-)$ .

Зачем ограничивать пульсации тока. Каким образом выбирать ограничения. Ограничивают, потому что потери на  $R$  чем меньше тем лучше. Но ноль не может быть. Граница прерывистого режима плохо. Чем меньше граница тем лучше.

Хороший критерий был – электропривод постоянного тока. Но коллектор – слабое место. Коллектор–пластины–искрение, меняется магнитный поток. Нужно постараться, чтобы тока в этот момент не было. ЭДС движения... Сумма ЭДС должна быть равна 0.  $I_{\text{якоря}}$  максимум – ограничивают.

$n_{\text{оборотов}} - \frac{\partial i}{\partial t}$  тем больше искрение. Переменная составляющая тока. Добавил пульсации – возникло искрение  $L \frac{\partial i}{\partial t}$  – от переменной составляющей. А от частоты зависит переменная составляющая? Принято считать, что не зависит, 2% от номинального для крупных машин. Станина – литая сталь, поковка, литьё. Наборные пластины – дорого. Если поток добавочных полюсов должен компенсировать  $I_{\text{якоря}}$  Якорь шихтованный – нет намагничивающих токов и поток не запаздывает, а в станине эти эффекты ограничивают 2% Станина тоже из стали: из шихтованной стали 20% пульсации

$\Delta I = I_{\text{ном}}^2 R$  несколько процентов 3-2%. КПД 96.5 - 3,4% – потери стали, меди, механические.

Добавилась пульсация 5%

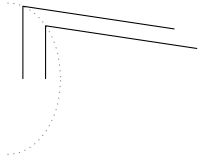
$$I = \sqrt{I_{\text{пост}}^2 + I_{\text{перем}}^2} R$$

Выражение граничного тока:

$$I_{\text{дгран}} = \frac{E_{d0}}{\omega L} \left[ 1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \right] \sin \alpha$$

где,  $\omega$  – питающей сети.  $\omega_{\text{сети}} = 2\pi f_{\text{сети}}$  Максимум при  $\alpha = 90^\circ$ , очевидно, зависит от числа фаз.

Это выражение даст эллипс





## Глава 6

# Энергетические характеристики тиристорных преобразователей

### 6.0.1 Энергетические характеристики тиристорных преобразователей

КПД  $\eta = f(U_d)$ , при  $I_d = const$ . Зависимость от напряжения и тока,  $\alpha$  – управления.

Электрические машины:

- постоянного тока (генераторы, моторы)
- синхронные
- асинхронные
- трансформаторы

Напряжение сети =  $const$ , от  $\cos \phi$

В электрических машинах  $\eta = f(\frac{I}{I_{ном}})$  или  $f(\frac{S}{S_{ном}})$  или  $f(\frac{P}{P_{ном}})$ ,  
 $\cos \phi$

У синхронных генераторов зависимость от  $\phi$  нагрузки.

Когда я меняю напряжение интересует что будет с  $\cos \phi$

КМ( $\lambda$ ) – коэффициент мощности, есть отношение активной мощности к полной.

$$\text{КПД} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{входа}}}$$

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

где,  $P$  – активная мощность,  $S$  – полная мощность.

Коэффициент мощности  $= \cos \phi$  – неверно в общем случае. Так можно говорить, если напряжение симметрично, синусоидально, и одной частоты. В нашем случае разные частоты.

Допущение: сеть симметрична и синусоидальна.

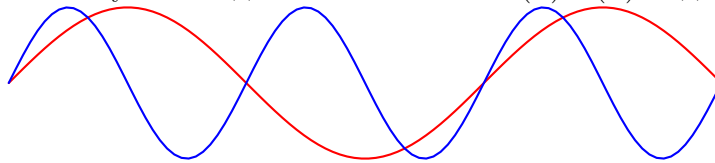
$$\lambda = \frac{S_{(1)}}{S} \cdot \frac{P}{S_{(1)}}$$

$S$  – полная мощность  $U \cdot I$  формальное произведение.

$S_{(1)} = U_{(1)} \cdot I_{(1)}$  – если однофазная система.

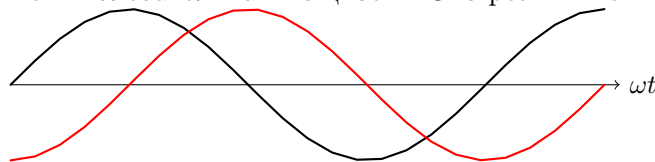
$$S = \underbrace{U_{\text{средне квадратичное}}}_{\text{по допущению } U_1} \cdot I_{\text{средне квадратичное}}$$

А ток – это наш ток и мы знаем, что он несинусоидальный. Если включу на активное сопротивление последовательно 100V и 100V, получу 200V. А если включить на активно-индуктивную нагрузку. У нас было 50Гц, А в токе разные частоты. Другие частоты в токе несут ли активную и реактивную мощность? Несут токи одинаковой частоты  $U(\omega) \cdot I(\omega)$  – одинаковой частоты.



наковой частоты.

Есть колебательная мощность. Это реактивная? нет



Знаки разные(в этом смысле похоже на предыдущий случай), но не совсем. <могу поставить <C> и скомпенсировать>

$$\begin{aligned} P \text{ [Вт]} &= UI_{\text{актив}} \\ Q \text{ [вар]} &= UI_{\text{реактив}} \\ S \text{ [ВА]} &= S = \sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned}$$

Эти соотношения для одинаковых частот.

Если частоты разные, то это мощность искажения

$$\lambda = \frac{S_1}{S} \frac{P}{S_1} = \nu \cos \phi$$

, где  $S_1 = U_1 \cdot I_1$

Нелинейные нагрузки искажают форму тока, портят стандарты, требуют принятия мер для качества напряжения. Несинусоидальность не больше столько-то %.

Пренебрегаем влиянием внешних.

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$$

$$\lambda = \frac{S_1}{S} \frac{P}{S_1} = \nu \cos \phi$$

Наша специальность самая энергетическая.

$$\text{вых} = U_d I_d$$

$$\text{вх} = \text{вых} + \Delta P_{\Sigma}$$

, где  $P_{\Sigma}$  – потери, то что преобразовалось в тепло, электромагнитную волну, звук, свет.

Представим, что мы регулируем напряжение.

$$\eta = \text{КПД} = \frac{U_d I_d}{U_d I_d + \Delta P_{\Sigma}}$$

$\Delta P_{\Sigma}$  на активных элементах:  $I_d^2 r_{\Sigma \text{эквив}} + \dots + I_d k_0 U_0 + \Delta P_{xx}$ , где  $k_0 U_0$  может быть несколько вентилях. Ток в вентилях меняется пропорционально  $I_d$ ,  $I_{\phi}$  – в обмотке трансформатора.  $I_{\phi} \div I_d$  (ток в обмотке трансформатора пропорционален  $I_d$ , в два раза увеличилось  $I_{\phi}$ , значит в два раза увеличилось  $I_d$ , т.е. есть составляющая пропорциональная  $I_d$ )

А если выключено, потери не зависят от  $I_d$  (система управления, лампочки)

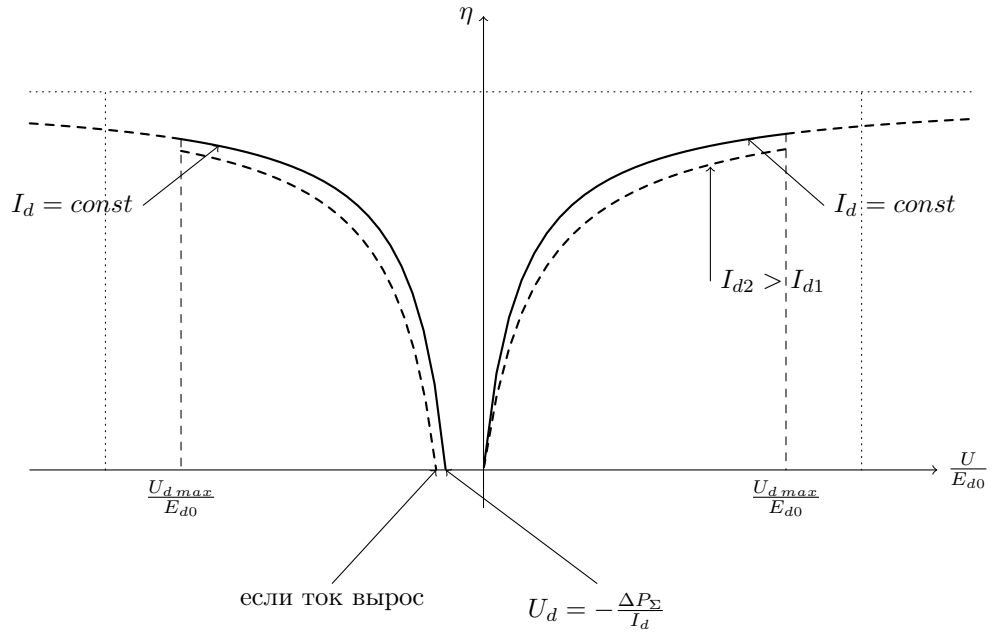
$$= a I_d^2 + b I_d^1 + c I_d^0$$

$$\eta = (\text{добавил и вычел } \pm \Delta P_{\Sigma}) = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{U_d I_d + \Delta P_{\Sigma}} =$$

Выражение(6.0.1) меньше единицы когда и  $U_d$  и  $I_d$  одного знака.  $I_d > 0$  всегда больше нуля. значит  $0 < U_d < 0$  (может быть и больше и меньше нуля)

$$= 1 - \frac{\frac{\Delta P_{\Sigma}}{U_d I_d}}{1 + \frac{\Delta P_{\Sigma}}{U_d I_d}}$$

Сейчас будем рассматривать  $I_d = \text{const}$  при бесконечном увеличении  $U_d \rightarrow 1$  Но  $U_d$  не больше чем  $U_{d \max}$



$P_{\text{вых}}$ . При отрицательном  $\eta$  поменялись местами выход и вход. То, что было  $\eta_{\text{выпрямителя}}$  при  $(U_d > 0)$  стало при  $U_d < 0$

$$\eta_{\text{инвертора}} = \frac{U_d I_d + \Delta P_{\Sigma}}{U_d I_d} = 1 + \underbrace{\frac{\Delta P_{\Sigma}}{U_d I_d}}_{\substack{\text{отрицательно} \\ \text{эта дробь} \\ \text{станет равна -1}}}$$

при  $u_d = -\frac{\Delta P_{\Sigma}}{I_d}$  – КПД упадёт до 0 и обратно пропорционально току.

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{a I_d^2}{I_d}$$

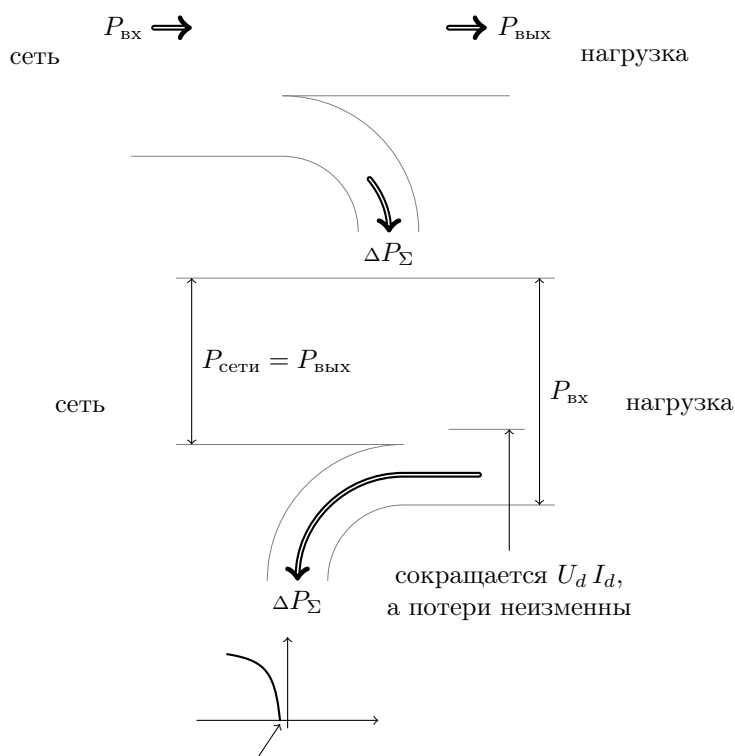
$\eta_{\text{граничное}} = 0!$  при  $U_d > 0$

$\eta_{\text{граничное}}$  при  $U_d < U_{d_{\text{граничное}}} = -\frac{\Delta P_{\Sigma}}{I_d}$

Осталось понять чему равен  $\eta$  при  $U_{d_{\text{граничное}}} < U_d < 0$ :

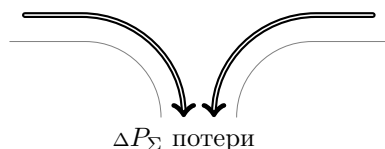
$\eta$  по определению равен нулю потому что  $P_{\text{вых}} = 0$ .

## 6.0.2 Энергетические реки:



Нагрузка едва покрывает потери

Нагрузка отдает, а до сети ничего не доходит.



Нагрузка не выпрямительный режим, но и не инверторный. Получают только потери.

А если  $I_d$  изменится:  $I_d$  вырос в два раза, числитель вырастет в два раза, но и  $\Delta P_{\Sigma}$  тоже вырастет. Всё зависит от коэффициента(-тов).

Реально, КПД упадет.

слева, при большом токе вырастет  $\gamma$

## 6.0.3 Коэффициент мощности

$\nu$  – коэффициент искажения  $\cos \phi$  – коэффициент угла сдвига тока, численно равен коэф мощности, когда напряжение и ток синусоидальны.

$$\cos \phi = \frac{P}{S}$$

$S$  всегда положительна,  $P$  бывает и положительна и отрицательна.  
 $Q > 0$  – индуктивность, так принято. Преобладают нагрузки, которые потребляют положительную реактивную мощность. В воздушной линии  $C \sim \frac{S}{d}$  В кабельных линиях – емкости.

$C$  генерирует в сеть реактивную мощность.

$\phi$  положительный, когда ток отстает от напряжения.

$\sin \phi < 0 \Rightarrow Q < 0$

$\cos$  может быть и положительным и отрицательным.

$$\frac{P}{S} = |I| \cdot |U| \cdot \cos \phi$$

$\cos \phi = -0.5$  Инвертор работает с углом  $\sim 60^\circ$ .

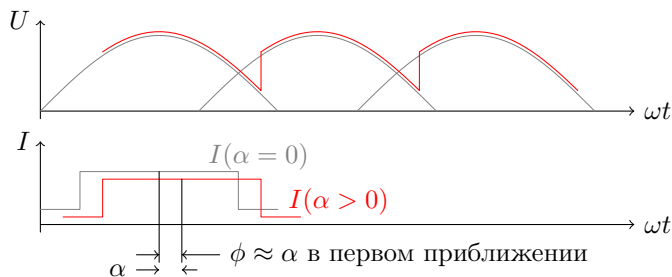
Реактивная мощность не передаёт балластную мощность. Из-за реактивных токов приходится увеличивать мощность <приборов, трансформаторов>

Ток, который создаёт магнитное поле

$$L = \frac{\Phi}{i}$$

У синхронных машин магнитное поле создаётся обмоткой возбуждения. У асинхронных двигателей создаётся реактивным током.

$\alpha$  сдвинул на  $90^\circ$  – я принудительно сдвинул начало генерации тока.



$\alpha = 0$  – фаза тока совпадает с фазой напряжения.  $\phi = \alpha$  в первом приближении.

Насколько сдвинулись гармоники тока? Но это никак не связано с энергией!

$I_d = \text{const}$  будем рассматривать для всех энергетических характеристик.

$$P = U_d I_d \quad (\neq P_s)$$

равенство буду считать хотя бы примерно (пока не буду считать потери)

Поддерживая  $I_d = \text{const}$   $S$  будет оставаться неизменной.  $S_1 \cong \text{const}$ , потому что  $I_d \cong \text{const}$

$$\cos \phi = \frac{P}{S_{(1)}} \approx U_d \approx \cos \alpha$$

$$\begin{matrix} \parallel \\ const \end{matrix} \quad \parallel \quad U_d = E_{d0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}$$

При  $\alpha = 0 \quad \gamma = 0 \quad U_d = E_{d0}$

Чисто активная мощность, значит ...

При  $\alpha = 0 \quad \gamma = 0 \quad U_d = E_{d0}, \quad P = S_1$

$$P \Big|_{\alpha=0} = S_1 = E_{d0} I_d$$

$\gamma=0$   
при  $P$ , которое я регулирую

$$\frac{P}{S} = \frac{E_d I_d \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}}{E_d I_d}$$

отсюда

$$\cos \phi = \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}$$

достаточно точно, угол  $\phi$  пропорционален  $\alpha$ .

Мы рассматривали энергетические характеристики тиристорных преобразователей, зависящих от сети. Рассматривали КПД.

Напомним коэффициент мощности, который определялся как

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

при допущении: Напряжение <на первичной стороне> синусоидальное.

$U = U_{(1)}$  – напряжение равно напряжению первой гармоники.

Если сеть трехфазная, то  $S = 3U_{\phi}I$ . Формула написана для фазного напряжения, если рассматривать линейное, то добавим  $\sqrt{3}$ .  $I$  синусоидальным считать нельзя.

$$I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}$$

$$k = \frac{f_{\text{гармоники}}}{f_{\text{сети}}} = m, m \pm 1$$

грубо  $\frac{I_{(k)}}{I_{(1)}} \simeq \frac{1}{k}$  – так можно считать для малых  $k$ .

при  $m = 6$   $k = 5, 7, 11, 13, 17, 19$  ‘Это соотношение выполняется для первых  $m$ . Выполняется тем более точно, чем меньше угол коммутации  $\gamma = 0$ , А угол  $\alpha = 0$ . Эти условия выполняются в том случае если ток мал и индуктивность мала, или и то и другое.

Если подставить значение  $S$  и  $P$ .

Активная мощность передается током и напряжением одинаковых частот.

$$P = U \cdot I_{(1)} \cos \phi$$

~~(X)~~ – но могу и не писать

Напряжение и токи разных частот не передают ни активной ни реактивной мощности. Активную и реактивную мощность передают  $U$  и  $I$  одинаковых частот.

Это допущение. На самом деле сеть не бесконечной мощности, ток будет падать на сопротивлениях и напряжение тоже будет иметь гармоники, но по допущению гармоник напряжения нет.

$$Q = U \cdot I_{(1)} \sin \phi = 3U_{\phi}I_{(1)} \sin \phi$$

$$\lambda = U \cdot I(1) \cos \phi = \frac{3U_{\phi}I_{(1)} \cos \phi}{3U_{\phi}I} = \frac{I_{(1)}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}} \cos \phi = \nu \cdot \cos \phi$$

$$\lambda = \nu \cdot \cos \phi \quad (6.1)$$



Что такое  $\nu$ ? Это коэффициент несинусоидальности. Ю лучше назвать коэффициент искажения тока.  $\nu < 1$ , А насколько.

Пренебрегая углом коммутации

$$\nu \cong \frac{3}{\pi} = 0.955$$

С ростом гармоник амплитуда  $I_{(k)}$  падает. Первые гармоники вносят наибольший вклад в  $I = \sqrt{\sum I_k^2}$ .

Продолжим равенство

$$= \frac{I_1}{\sqrt{I_{(k)}^2 + \sum_{k>1} I_k^2}} = \frac{I_{(1)}}{\sqrt{I_1^2 + I_\nu^2}}$$

Все  $I$  в формуле – действующие значения, и  $\nu = \frac{\sum_{k>1} I_k^2}{I_1^2}$

Коэффициент  $\lambda$  равен  $\cos\phi$  только в случае если есть только первая гармоника, а если нет, то напомним

$$\cos\phi = \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}$$

Если  $\gamma$  мало, то  $\cos\phi = \cos\alpha$ . Часто используют приближение  $\cos\phi = \cos(\phi + \frac{\gamma}{2})$ . Если знаете  $\alpha$  и  $\gamma$ , то зачем пользоваться приближенным, если есть точное.

Если  $\cos\phi$  мал, то это плохо, потому что  $Q \sim \sin\phi$ . Так что надо повышать, говорят что до 0.95.

Если я возьму катушку, это плохо, но важна еще мощность, сила тока. Если  $\cos\phi = 0.1$  это не плохо, если полная мощность 10ватт.

У трансформаторов на холостом ходу очень низкий  $\cos\phi$ , но при холостом ходе течёт малый ток.

Когда говорят о коэффициенте мощности тиристорного преобразователя, то ...

$$P = 3U_\phi I_{(1)} \cos\phi_{(1)} \simeq U_d I_d$$

$$Q = 3U_\phi I_{(1)} \sin\phi_{(1)} \simeq \sqrt{1 - \left(\frac{P}{E_d I_d}\right)^2}$$

Почему так. Вернулись к  $S$  полной мощности.

$$S = 3U_\phi \sqrt{I_{(1)}^2 + I_{(\nu)}^2} = \sqrt{\left(3U_\phi I_{(1)}\right)^2 + \left(3U_\phi I_{(\nu)}\right)^2} = \sqrt{S_{(1)}^2 + S_\nu^2}$$

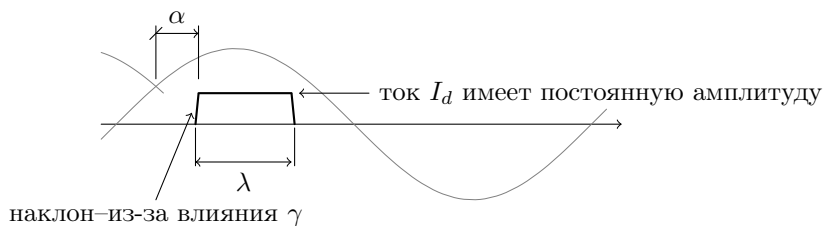
$S_{(1)}$  – так обозначили по аналогии с током.  $S_{(\nu)}$  – полная мощность остальных гармоник, мощность искажения по аналогии с током искажения.

Для первой гармоники справедливо

$$\begin{aligned} S_{(1)} &= \sqrt{P^2 + Q^2} \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2 + S_\nu^2} \end{aligned} \quad (6.2)$$

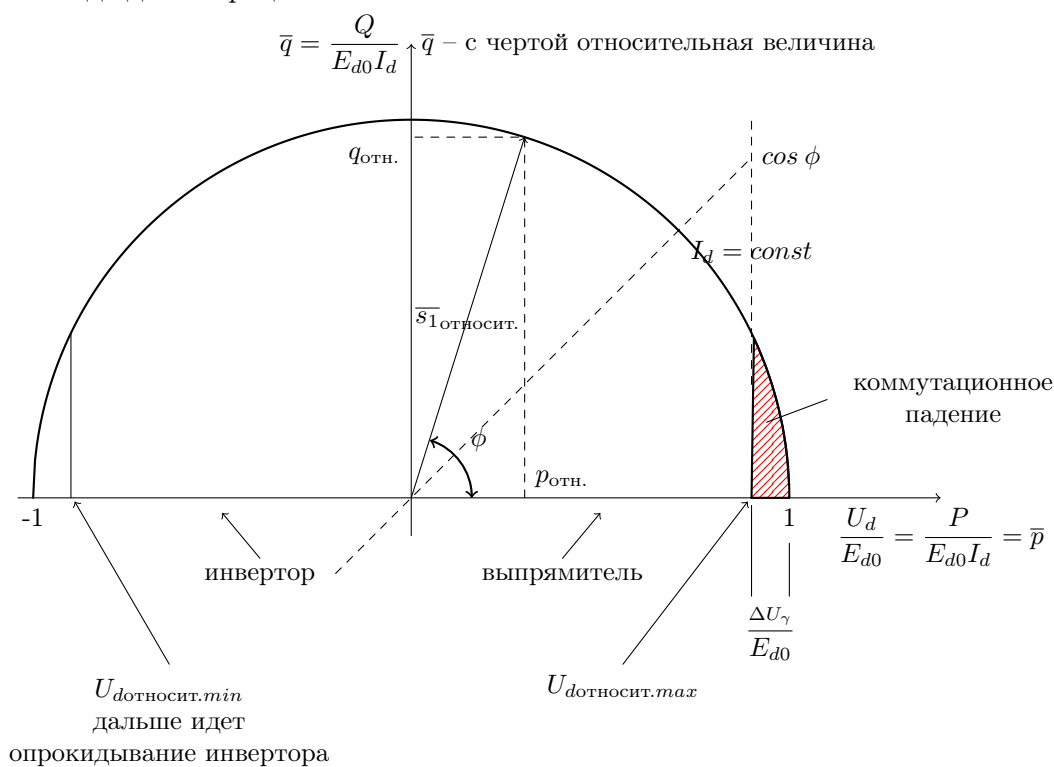
$$S_{(1)} = 3U_\phi I_{(1)} \simeq const$$

Рассматриваем, как меняется  $S$ , меняя  $\alpha$  при  $I_d = const$



Ток  $I_d$  имеет постоянную амплитуду,  $\lambda$  примерно одной ширины. Влияние  $\gamma$  мало. Значит действующее значение не меняется.

При постоянстве выпрямленного тока  $I_d$  и изменении угла  $\alpha$  величина 1-й гармоники сетевого тока сохраняется практически неизменной с точностью до долей процента!



$$S_1 \text{ (в относительных единицах)} = \frac{S_1}{E_{d0}I_d} \approx 1 \quad (6.3)$$

Академически не точно, но с точностью доли процента.

При  $\alpha = 0$ , при отсутствии  $\gamma$ ,  $\cos\phi = 1$ , значит, полная мощность равна активной мощности.

$$S_{1max} \approx E_{d0}I_d \quad (6.4)$$

значит  $\alpha = 0$ ,  $\gamma = 0$ .  $S_1$  с достаточно большой точностью можно считать равным  $E_{d0}I_d$ .

$$(\bar{q})^2 + (\bar{p})^2 = (\bar{s}_1)^2 = 1 \text{ в относительных единицах.}$$

Провели окружность, но пользоваться с осторожностью. Например, если  $I_d$  номинал, два номинала. Коммутационное  $U_{d\text{коммутационное}}$  зависит от  $I$

$$\bar{p} = \text{численно равно} = \cos\phi$$

Круговая диаграмма более информативна.

Представим  $\cos\phi = 0$ , но если ток номинальный  $Q = 100\%$ .

Низкое значение(большое значение)  $\cos\phi$  при глубоком регулировании выпрямленного напряжения, или, точнее, большое значение реактивной мощности является главным недостатком тиристорных преобразователей.

Второй главный недостаток – это сравнительно большая величина высших гармоник, потребляемых из сети тока.

Достоинство – высокий КПД

<Провели линию  $\cos\phi$ > Что такое отрицательный  $\cos\phi$ ? Это...

$m = 6$ ,  $k = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25$

$$\nu \approx \frac{3}{\pi} = 0.955 = \frac{I_\nu}{I}$$

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_\nu^2}$$

Хочу найти в абсолютных единицах чему равно  $I_\nu$ .  $I_{\nu max} \approx 0.3I$  – высшие гармоники 30%. Это доказывает, что высших гармоник достаточно много.

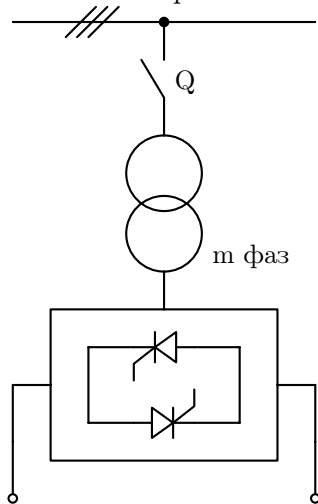
## Глава 7

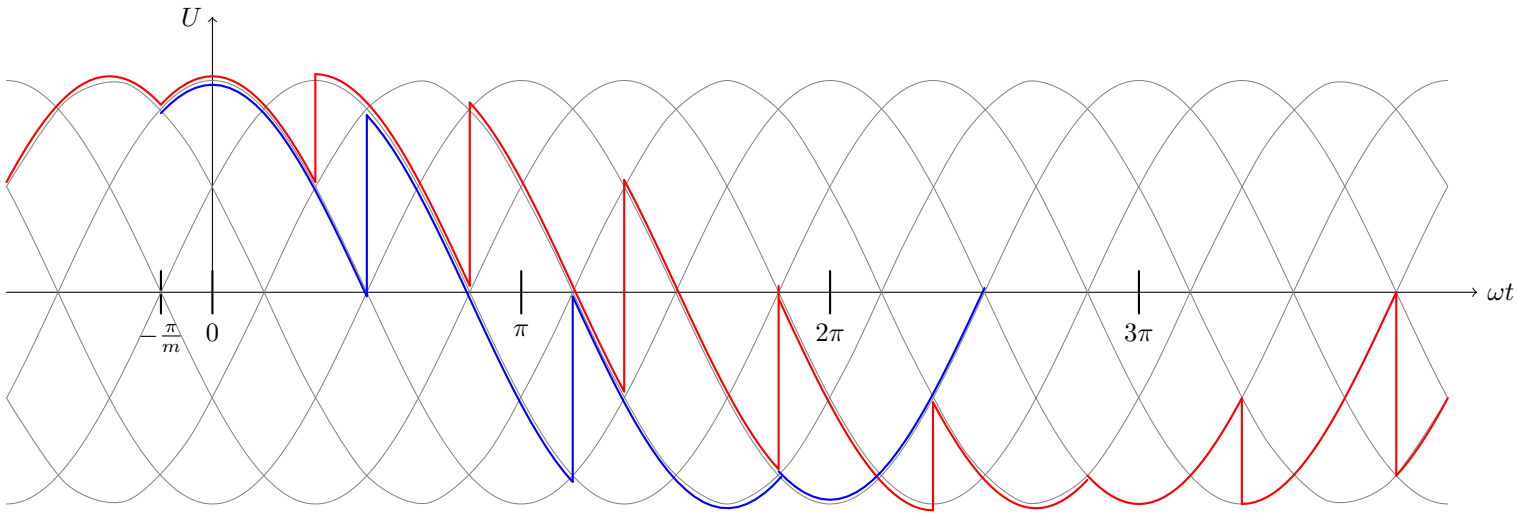
# Непосредственные преобразователи частоты

### 7.0.1 Непосредственные преобразователи частоты

правильное наименование – с непосредственной связью, без звена постоянного тока.

НПЧ представляет собой реверсивный тиристорный преобразователь, выпрямленное значение которого изменяется с заданной частотой. Выпрямленное напряжение изменяется по величине и знаку.





$\alpha$  изменяется периодически  $\alpha = f(t)$ .

Было

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha \quad (7.1)$$

,  $\alpha = f(t)$

$$E_d = E_m \cos (\phi_{\text{нач.}} + w_{\text{вых.}} t) \quad (7.2)$$

где,  $w_{\text{вых.}} = 2\pi f_{\text{вых.}}$

Приравняв 7.1 и 7.2 находим:

$$\cos \alpha = \frac{E_m}{E_{d0}} \cos (\phi_{\text{нач.}} + w_{\text{вых.}} t)$$

$$\alpha = \arccos \left[ \frac{E_m}{E_{d0}} \cos (\phi_{\text{нач.}} + w_{\text{вых.}} t) \right] \quad (7.3)$$

Частный случай, при  $E_m = E_{d0}$

$$\alpha = \phi_{\text{нач.}} + w_{\text{вых.}} t \quad (7.4)$$

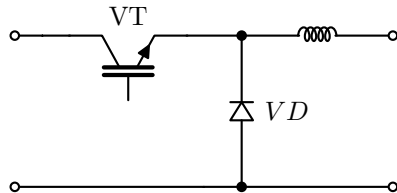
Это объясняет, почему были сделаны равные приращения на рисунке выше.

Принцип работы при любом числе фаз.

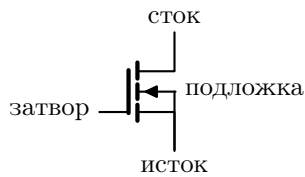
Было написано  $U$ , а использую  $E$ , потому что не учитываем падение на вентилях.

На выходе <было рассмотрено> однофазное напряжение. Но нужно трехфазное. Поэтому такие НПЧ содержат три реверсивных преобразователя.

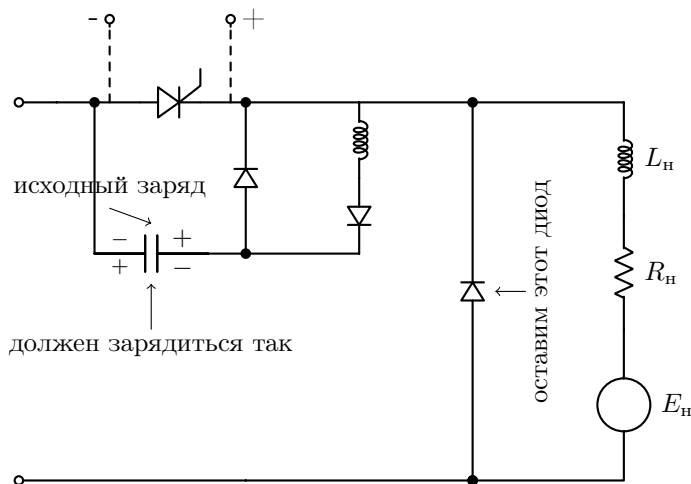
Рассматривали ИППН, классификацию ИППН, классификация в основном по квадрантам. Рассматривали одно-квадрантные, двух-квадрантные, четырех-квадрантные.



Замечание: может стоять IGBT-транзистор, может стоять мосфет,

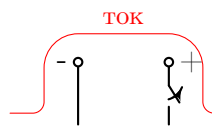


а может стоять обычный тиристор с углом искусственной коммутации:



Искусственная коммутация  $\cong$  принудительная коммутация  $\cong$  ёмкостная коммутация. Искусственная коммутация и принудительная коммутация – синонимы.

– Кратковременно подключить, искусственно включить, принудительно включить источник. Чаще всего таким источником является заряженный конденсатор.

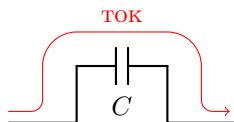


– источник перехватывает ток нагрузки. Но главная задача – отключить нагрузку.

Это делается в два этапа:

- запереть тиристор

- отключить нагрузку



– конденсатор идеально подходит для обоих этапов. Конденсатор перезаряжается и перехватывает энергию. Ёмкостная коммутация – частный случай искусственной коммутации, когда источником является конденсатор.

Можем использовать импульсный трансформатор.

*Учебное издание*

Латышко Владимир Данилович  
Прокшин Артем Николаевич

## **СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

Конспект лекций по дисциплине

«Силовая электроника»

Редактор

Подписано в печать 01.09.16. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.  
Печать цифровая. Гарнитура «Computer Modern Roman». Печ. л. 3.9  
Тираж 1 экз.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5