

# *Лекции по курсу :*

## *Силовые преобразователи в электроснабжении*

*Кафедра электроснабжения  
промышленных предприятий  
Энергетический институт  
Томского политехнического  
университета*

## Составлено по следующим источникам:

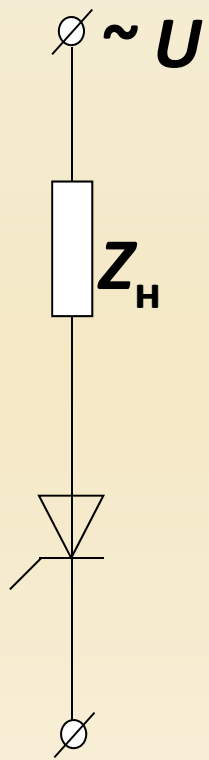
1. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Силовые преобразователи в электроснабжении. Учебное пособие. – Томск, Изд. ТПУ, 2006.
2. Чебовский О.Г. и др. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. – Ленинград, Энергия, 1985.
3. Руденко В.И. и др. Основы преобразовательной техники. Учебник для ВУЗов, 2-е издание М.: Высш. шк., 1980 – 286 с.
4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. Второе издание, стереотипное.-М.: ООО ИД «Альянс», 2008. -496 с., ил.

## Тема 2. Режимы работы силовых полупроводниковых приборов

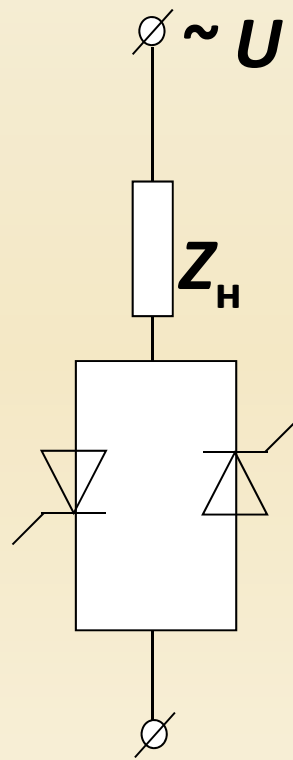
**Способы фазового регулирования тиристорных устройств.**

## Тиристорные коммутаторы

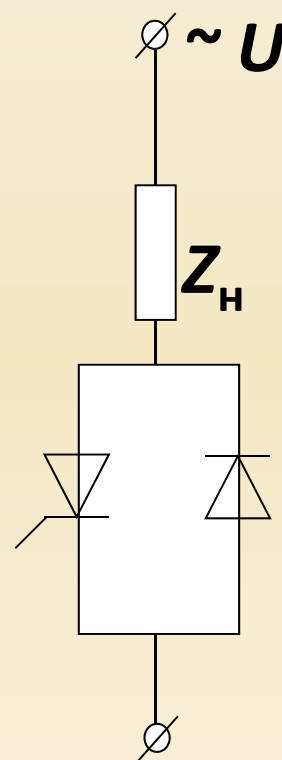
# Однофазные вентильные коммутаторы



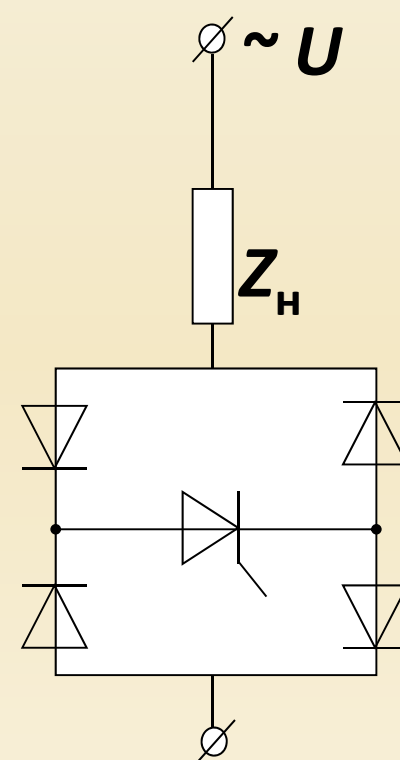
**a**



**б**



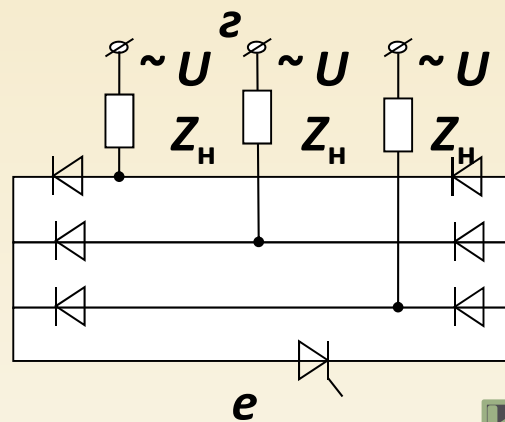
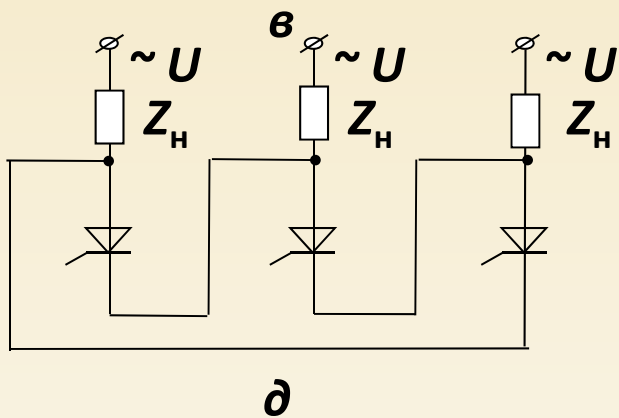
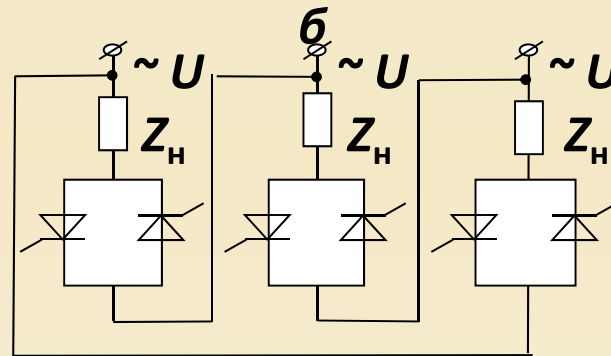
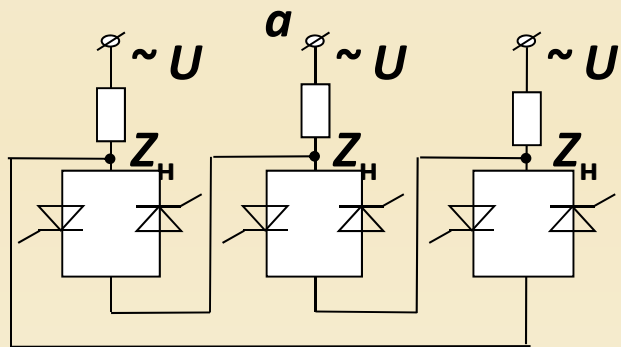
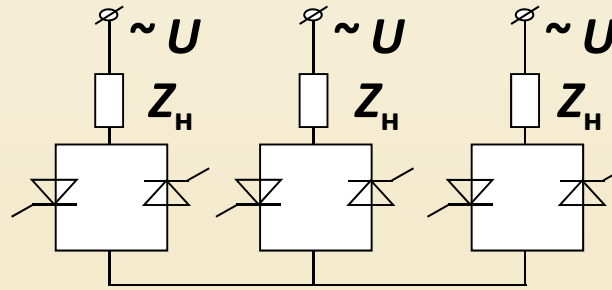
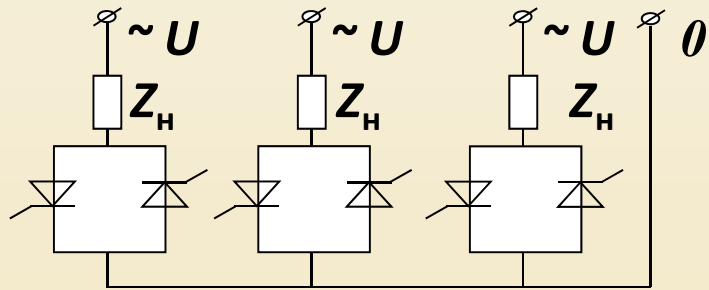
**в**



**г**

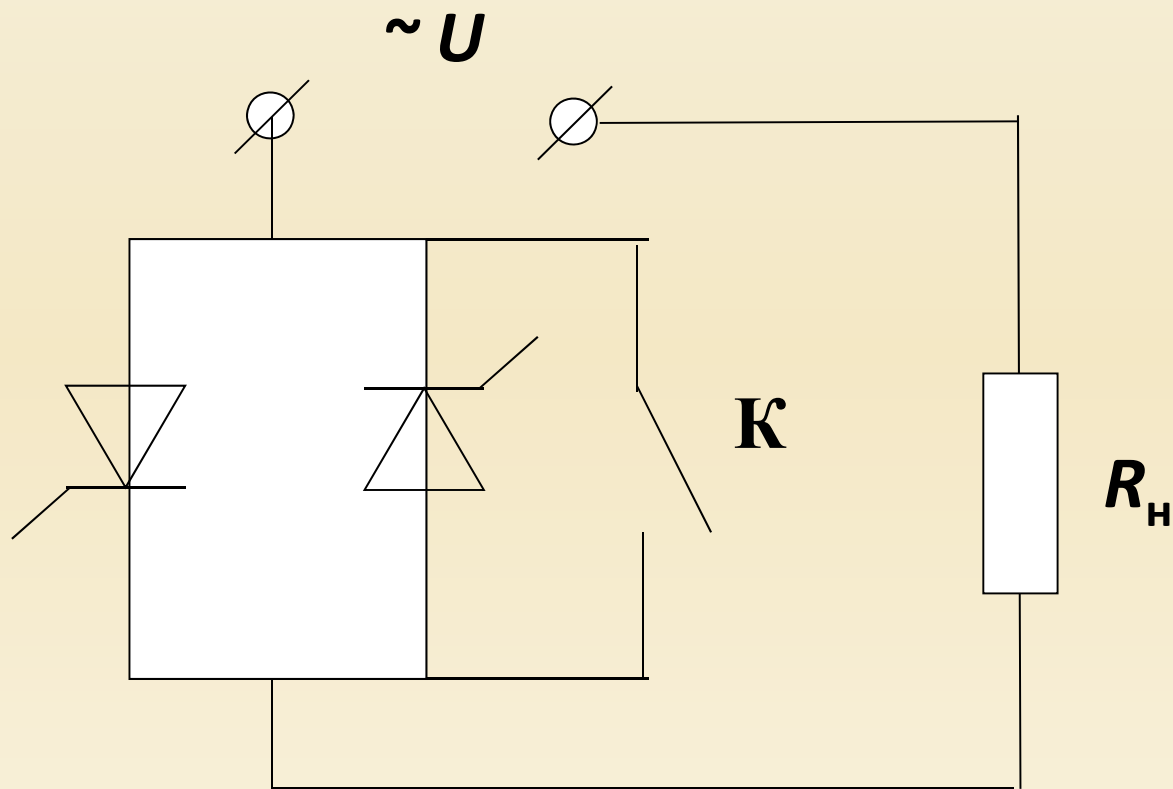
# Тиристорные коммутаторы

## Трехфазные вентильные коммутаторы



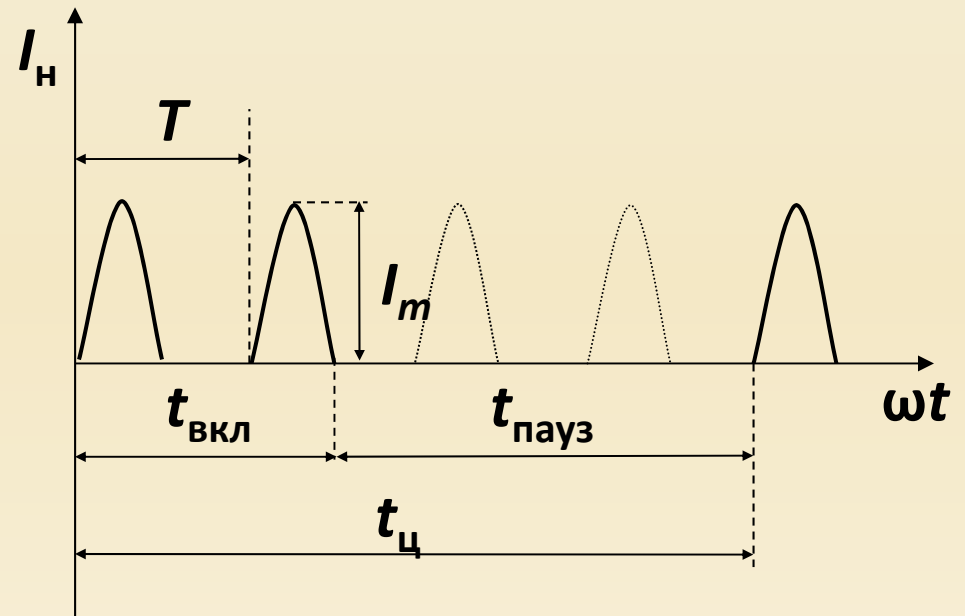
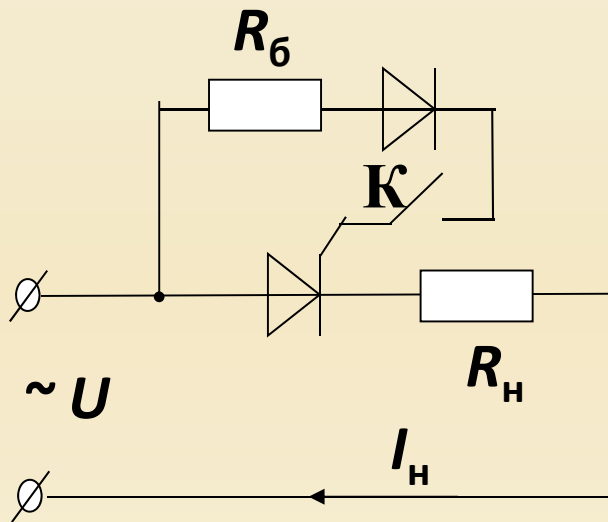
## Тиристорные коммутаторы

# Гибридный коммутатор



## Тиристорные усилители

# Тиристорный усилитель с широтно-импульсной модуляцией



## Тиристорные усилители

**Изменяя величину времени включенного состояния тиристора, можно регулировать среднее значение тока в нагрузке**

$$I_{\text{нсп}} = I_{\text{нсп0}} \frac{t_{\text{вкл}}}{t_{\text{ц}}}$$

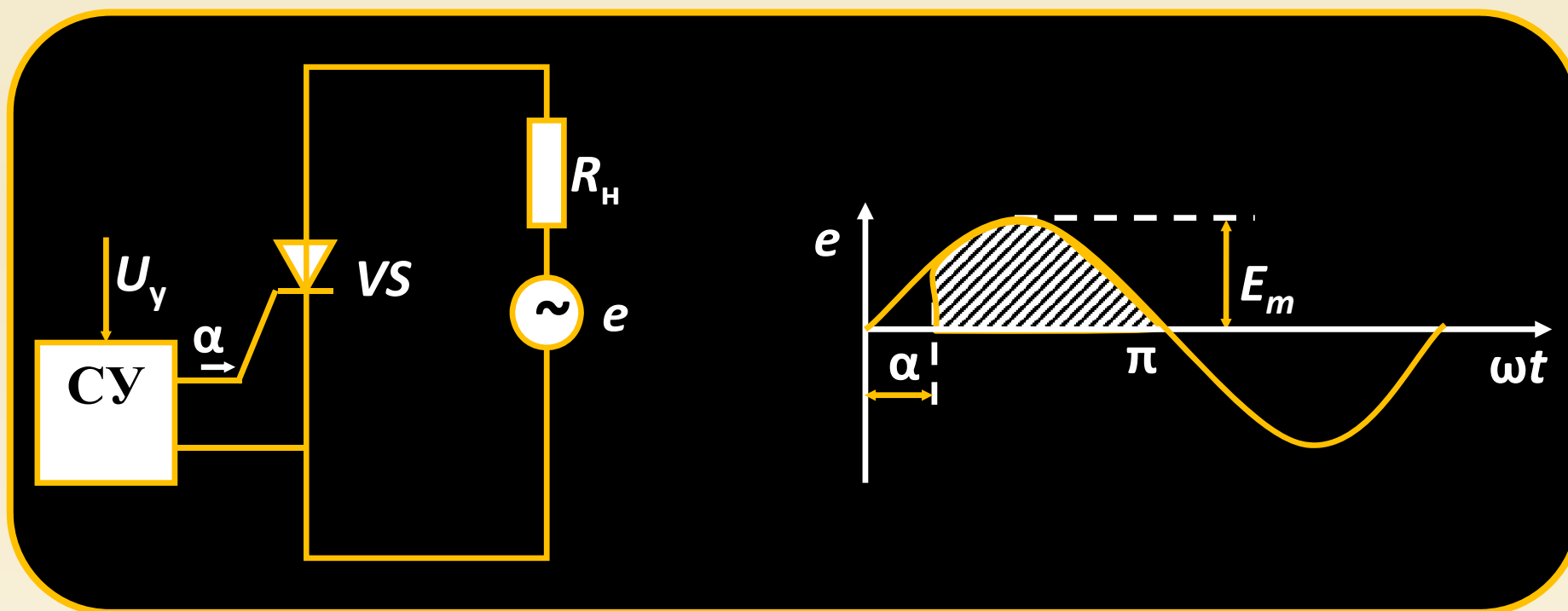
$$I_{\text{нсп0}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t \cdot dt = \frac{I_m}{\pi}$$



**Фазорегулируемые тиристорные усилители обеспечивают плавное регулирование выходных параметров.**

**Принцип действия простейшего усилителя поясняется рис.**

# Принцип действия фазорегулируемого тиристорного усилителя



## Способы фазового регулирования тиристорных устройств

Суть фазового регулирования угла управления тиристора состоит в задержке на угол  $\alpha$  момента отпирания тиристора относительно его точки естественной коммутации.

Эту задачу решает специальная система управления (СУ), работа которой синхронизирована с напряжением сети  $e$ .

Для рассматриваемого случая среднее значение напряжения на нагрузке равно

$$U_{\text{нсп}} = \frac{1}{T} \int_0^{\pi} U(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\alpha} 0 dt + \int_{\alpha}^{\pi} E_m \sin \omega t \cdot dt + \int_{\pi}^{2\pi} 0 dt \right] = U_{\text{нсп}}(\alpha)$$

Очевидно, что приращению угла управления  $\alpha$ , вызванного приращением управляющего напряжения  $\Delta U_y$ , соответствует некоторое изменение напряжения на нагрузке на величину  $\Delta u_{\text{нсп}}$ .

Следовательно, несмотря на практически бесконечно большую величину коэффициента усиления собственно тиристора (обычно такой параметр не рассматривается), фазорегулируемые тиристорные устройства обладают вполне конкретными значениями коэффициента усиления –

$$k_y = \Delta U_H / \Delta U_y$$

который определяется схемой управления СУ.

**Силовые схемы тиристорных усилителей переменного тока не отличаются от схем коммутаторов, приведенных ранее.**

**Разница между ними состоит лишь в способе управления тиристорами.**

**Практическое применение тиристорных усилителей переменного тока распространяется на пускорегулирующую аппаратуру для двигателей, регуляторы и стабилизаторы электрического напряжения, тока, мощности.**

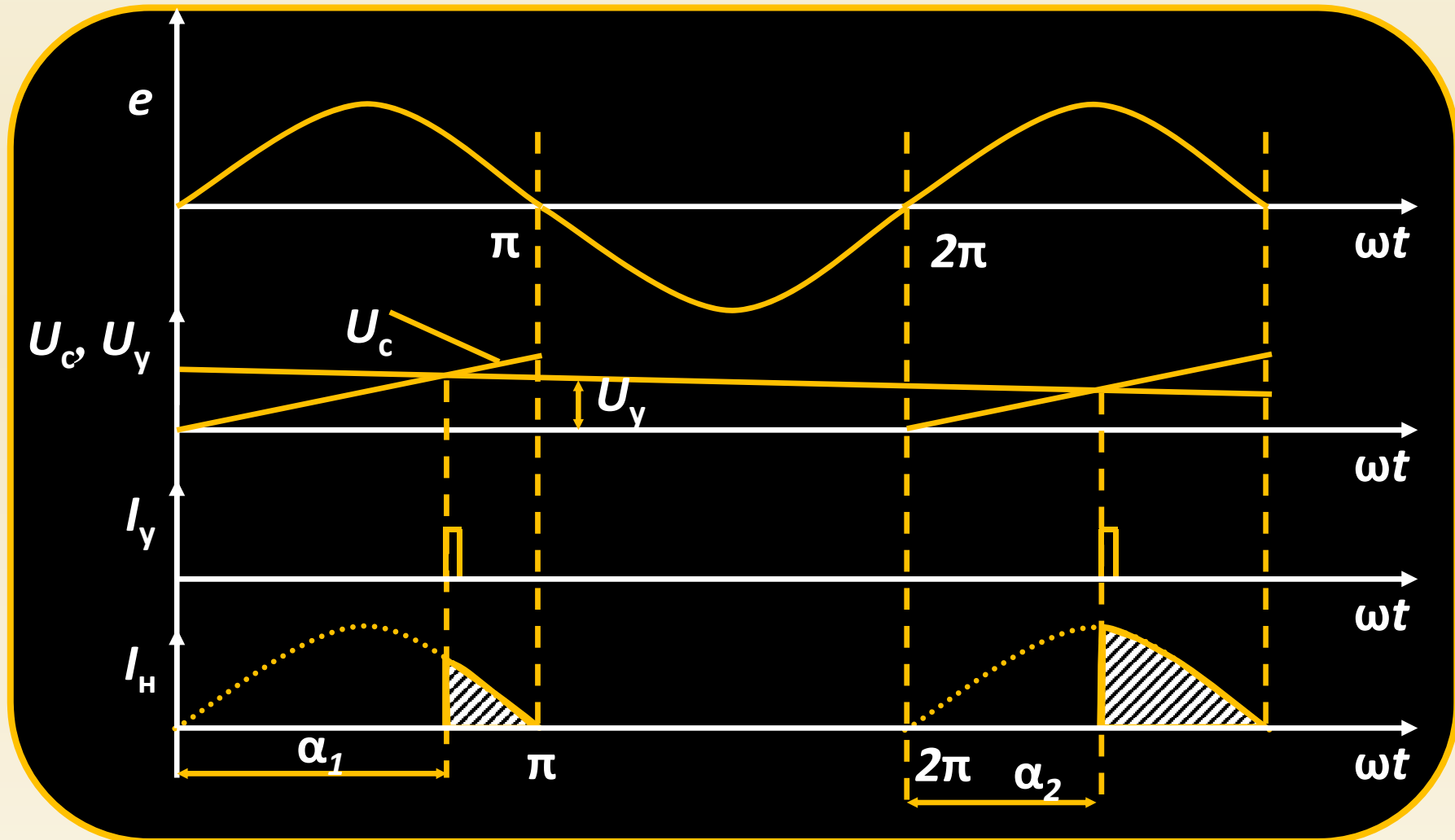
Рассмотрим основные способы фазового управления тиристорами.

Для регулирования угла включения тиристора необходимо управляющий сигнал сдвигать по фазе относительно напряжения питающей сети.

Системы управления, выполняющие эту функцию, называются **фазосдвигающими устройствами** (ФСУ).

По принципу действия ФСУ разделяются на ФСУ вертикального управления, ФСУ горизонтального управления и ФСУ тангенциального типа.

# Принцип действия ФСУ вертикального типа поясняется рис.



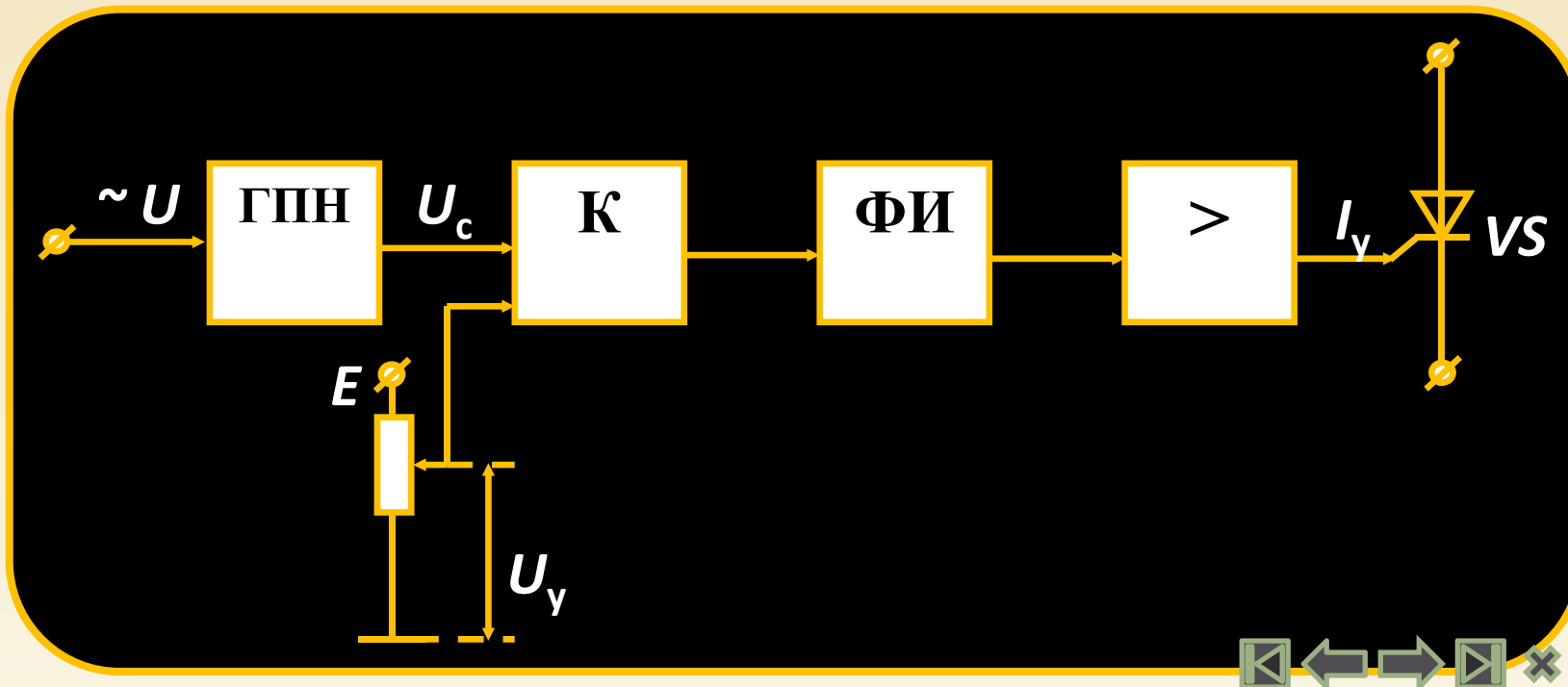


## Способы фазового регулирования тиристорных устройств

Импульс управления тиристором  $I_y$  формируется в момент равенства синхронизирующего напряжения пилообразной формы  $U_c$ , синфазного с напряжением сети, и управляющего напряжения  $U_y$ . При изменении величины  $U_y$ , т. е. смещении его по вертикали, происходит изменение величины угла управления тиристором  $\alpha$  и соответственно среднего значения тока нагрузки  $I_H$ .

## Способы фазового регулирования тиристорных устройств

Структурная схема **ФСУ** **вертикального типа** показана на рис. Схема состоит из следующих элементов: **ГПН** – генератор пилообразного напряжения, **К** – компаратор, формирователь импульсов **ФИ**, усилитель импульса управляющего тока **>**



**ФСУ горизонтального** типа используют принцип формирования импульса управления тиристором по углу фазового сдвига управляющего напряжения относительно сетевого напряжения.

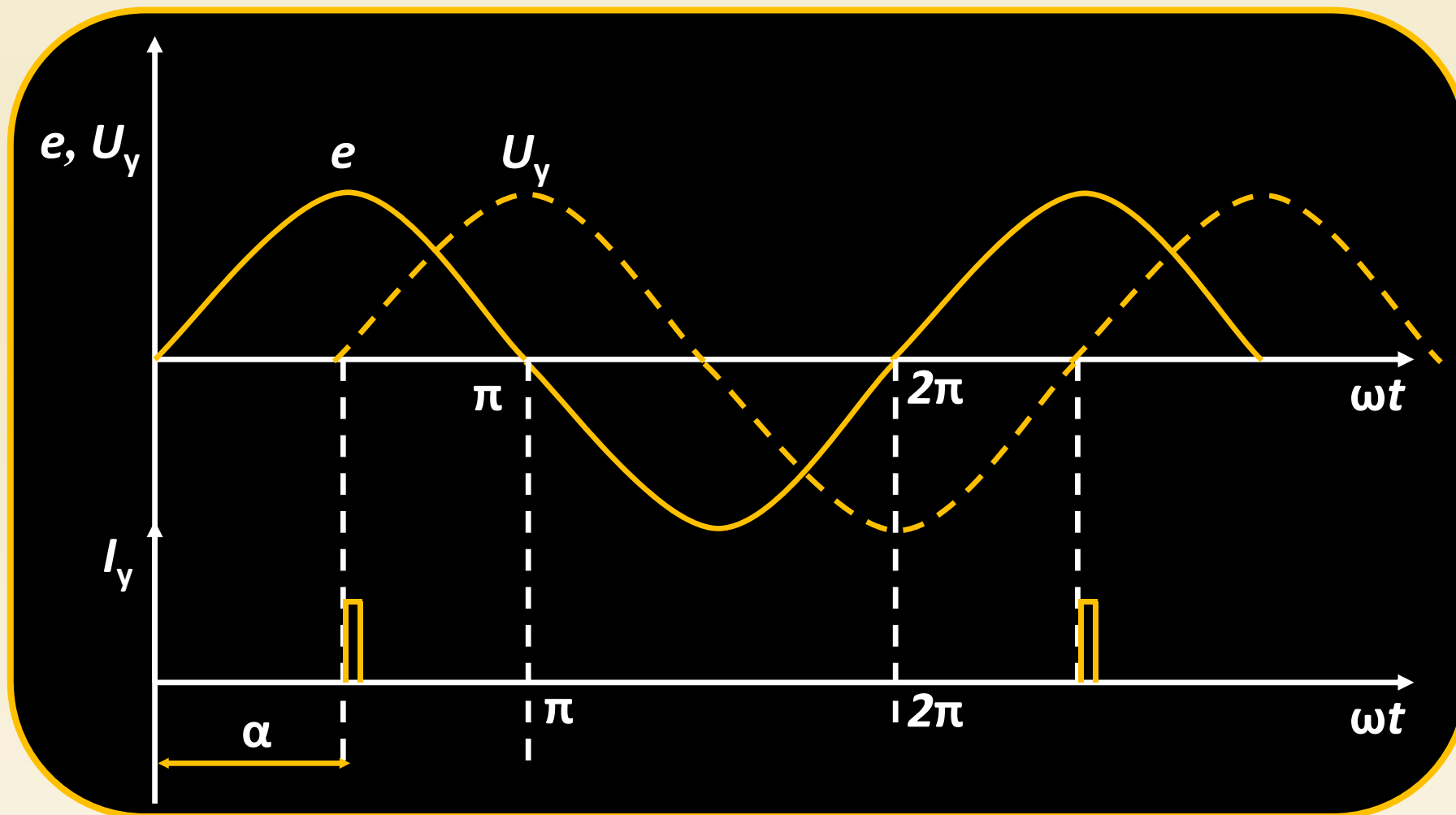
В качестве фазосдвигающих устройств используются фазорегуляторы, различные фазосдвигающие цепочки.

Временные диаграммы работы таких ФСУ показаны на рис.

Временные  
горизонтального типа

диаграммы

ФСУ

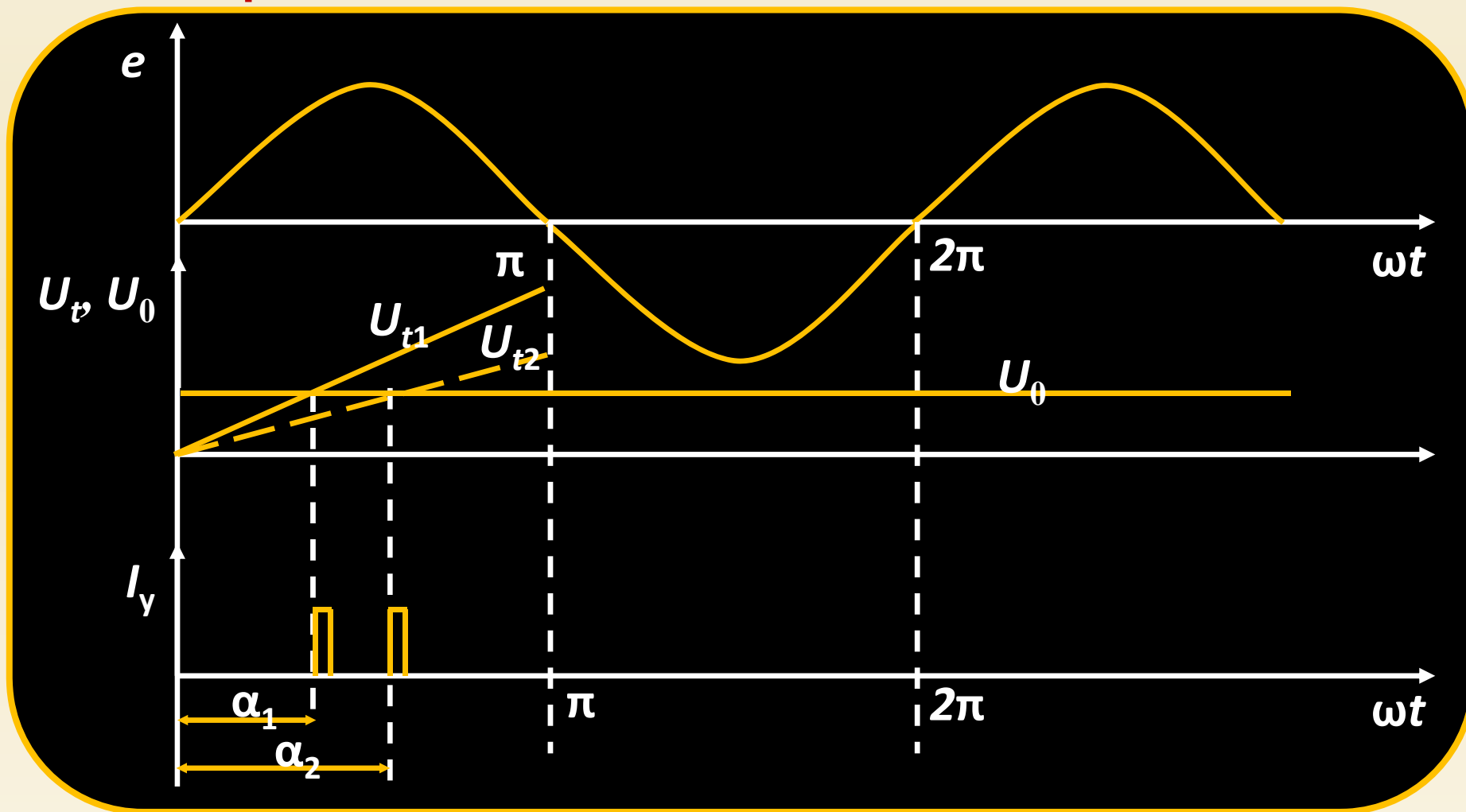


Обычно импульс управляющего тока  $I_y$  удобно формировать в момент перехода управляющего напряжения через 0.

**ФСУ тангенциального типа** отличаются от ФСУ вертикального управления тем, что фазонесущий сигнал заключается в угле наклона синхронизирующего напряжения.

Временные диаграммы, поясняющие принцип действия такого типа ФСУ, показаны на рис.

# Временные диаграммы работы ФСУ тангенциального типа



Импульс тока управления формируется в момент сравнения напряжения  $U_t$  с  $U_0 = \text{const.}$  Изменяя угол наклона  $U_t$ , синхронизированного с сетевым напряжением  $e$ , можно регулировать угол включения тиристора  $\alpha$ .

Обычно для формирования пилообразного напряжения с переменным углом наклона используются  $R-C$  – цепочки с регулируемой величиной постоянной времени заряда емкости. Удобнее для этой цели изменять величину активного сопротивления  $R$ .

**Тангенциальное управление тиристорными устройствами целесообразно использовать при работе от сети с изменяющейся частотой.**

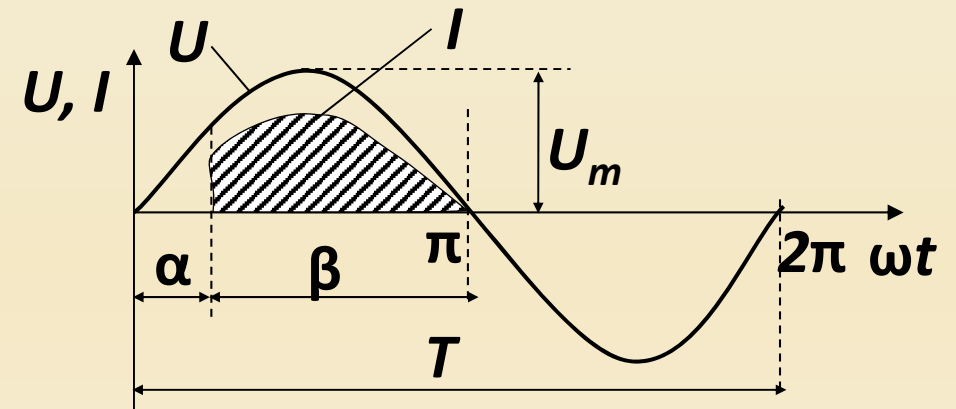
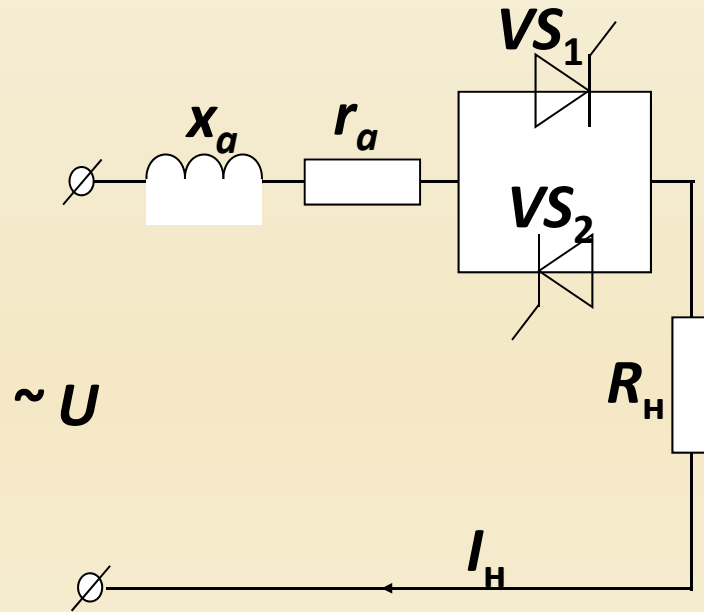
**Наибольшее распространение в преобразовательной технике получил способ**

**вертикального управления тиристорами**

**благодаря простоте схемных решений ФСУ при достаточной точности формирования угла  $\alpha$  и широком диапазоне его изменения.**



# Однофазный регулятор переменного тока



## Работа фазорегулируемых тиристорных усилителей

$$U_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_m}{\pi} \left( -\cos \omega t \right) \Big|_{\alpha}^{\pi} = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

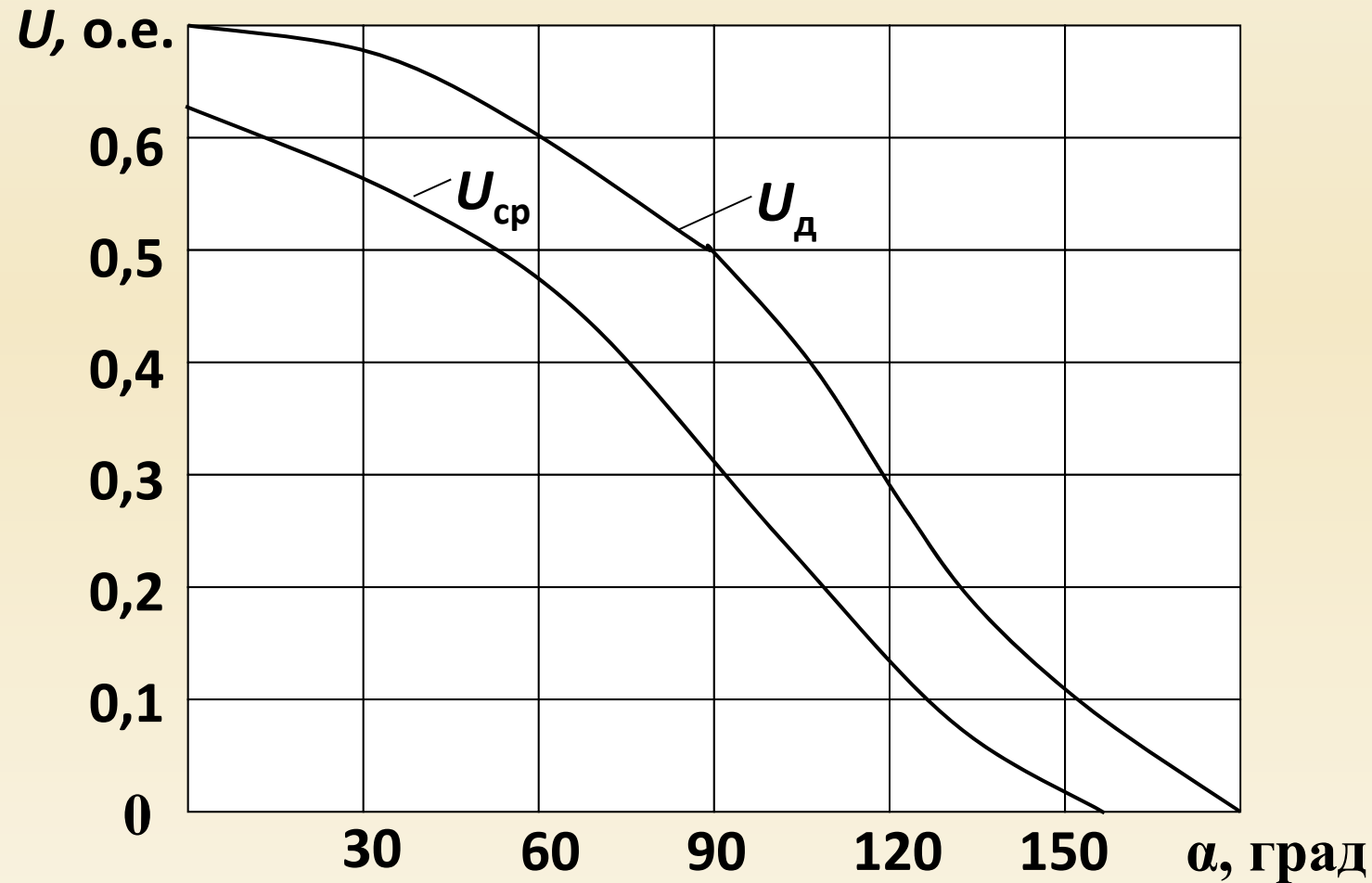
где  $\omega = 2\pi f$  круговая частота переменного тока питающей сети

$$I_{\text{ср}} = \frac{U_m}{\pi R_H} (1 + \cos \alpha)$$

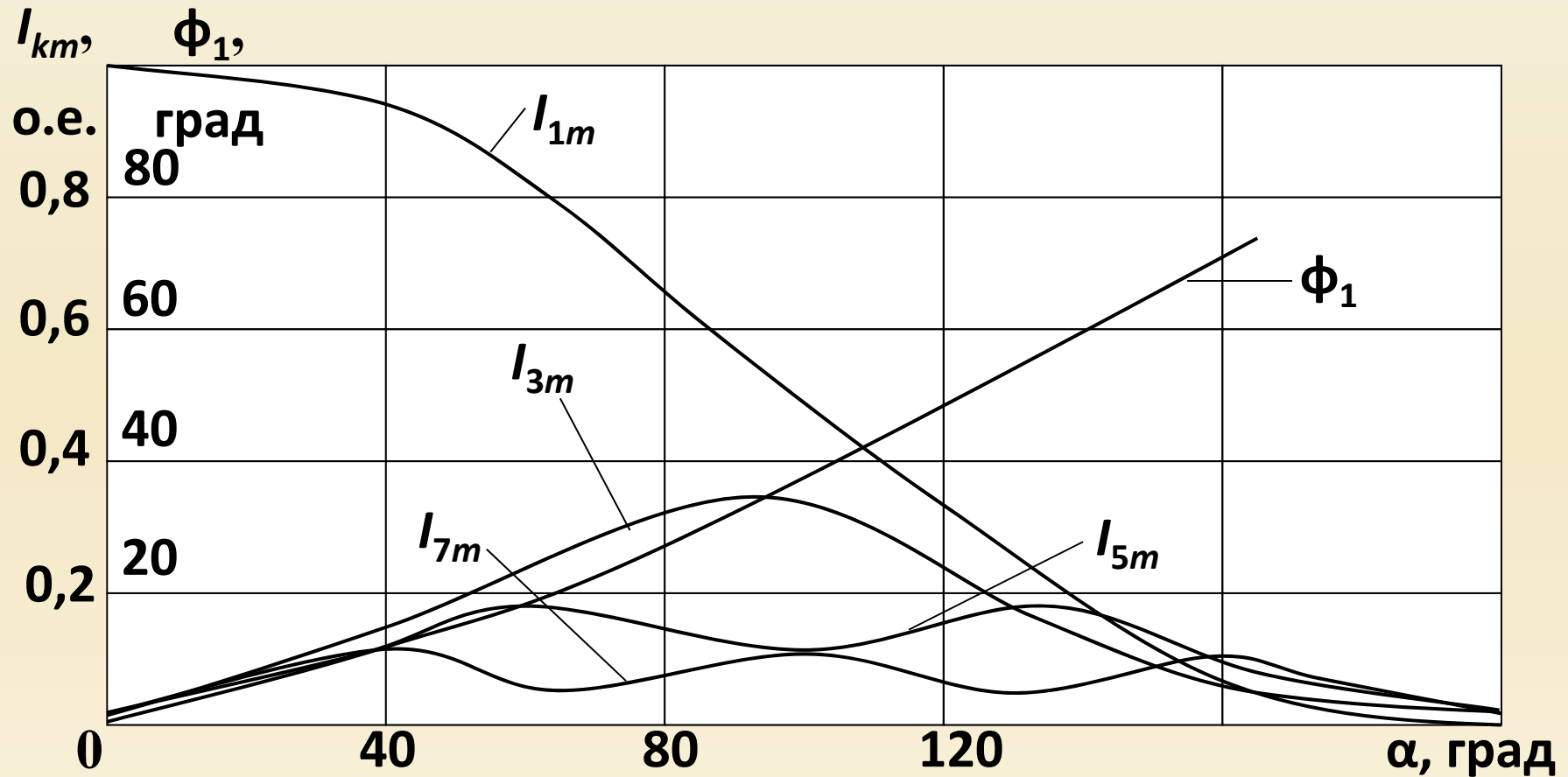
$$U_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} (U_m \sin \omega t)^2 dt + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} (U_m \sin \omega t)^2 dt \right]} = \frac{U_m}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}}$$

$$I_{\text{д}} = \frac{U_m}{R_H \sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}}$$

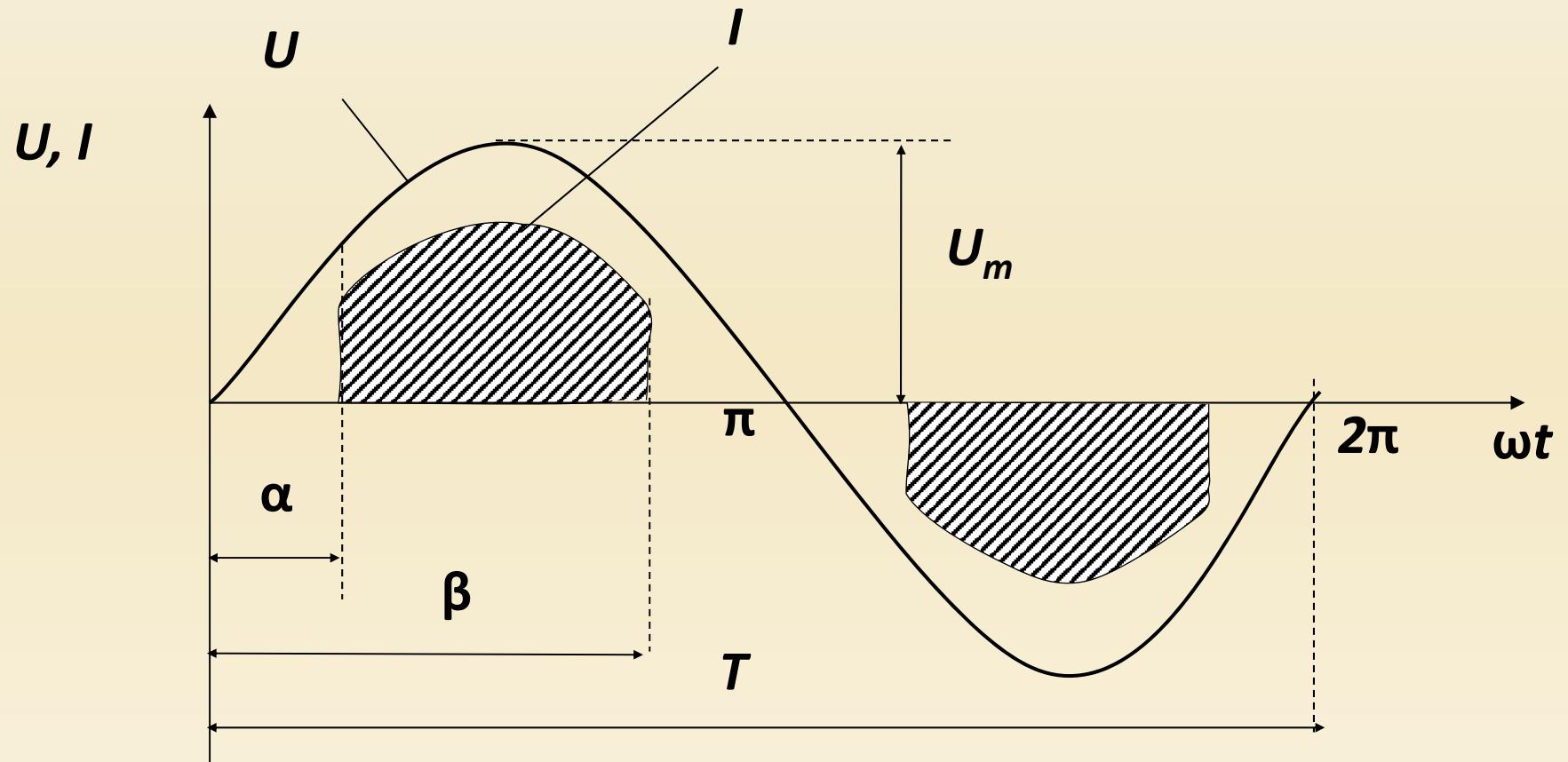
## Зависимости среднего $U_{\text{ср}}$ и действующего $U_{\text{д}}$ напряжения на нагрузке



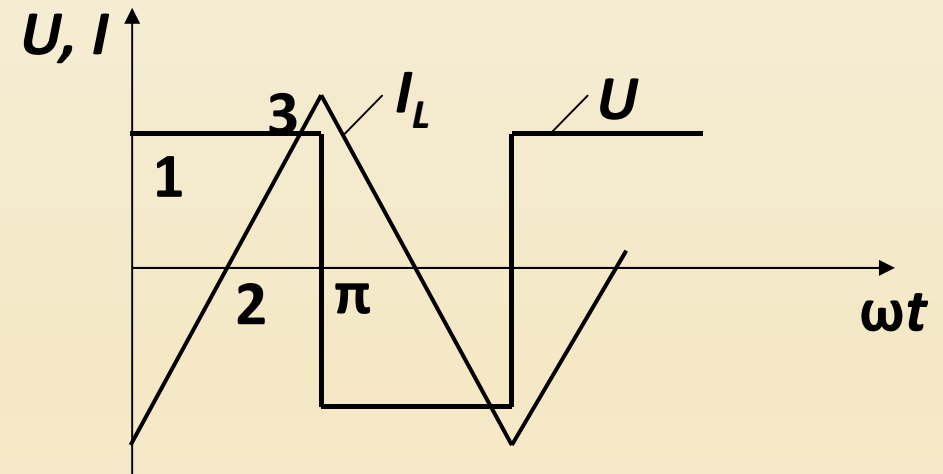
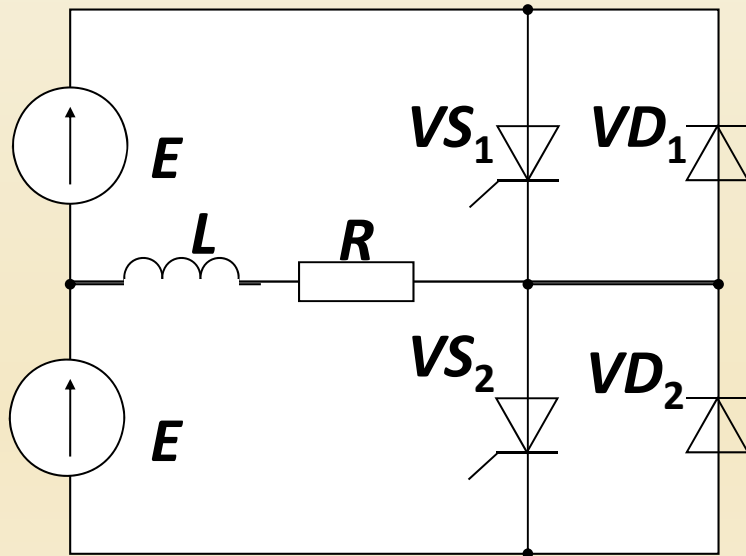
## Гармонический спектр тока в зависимости от $\alpha$



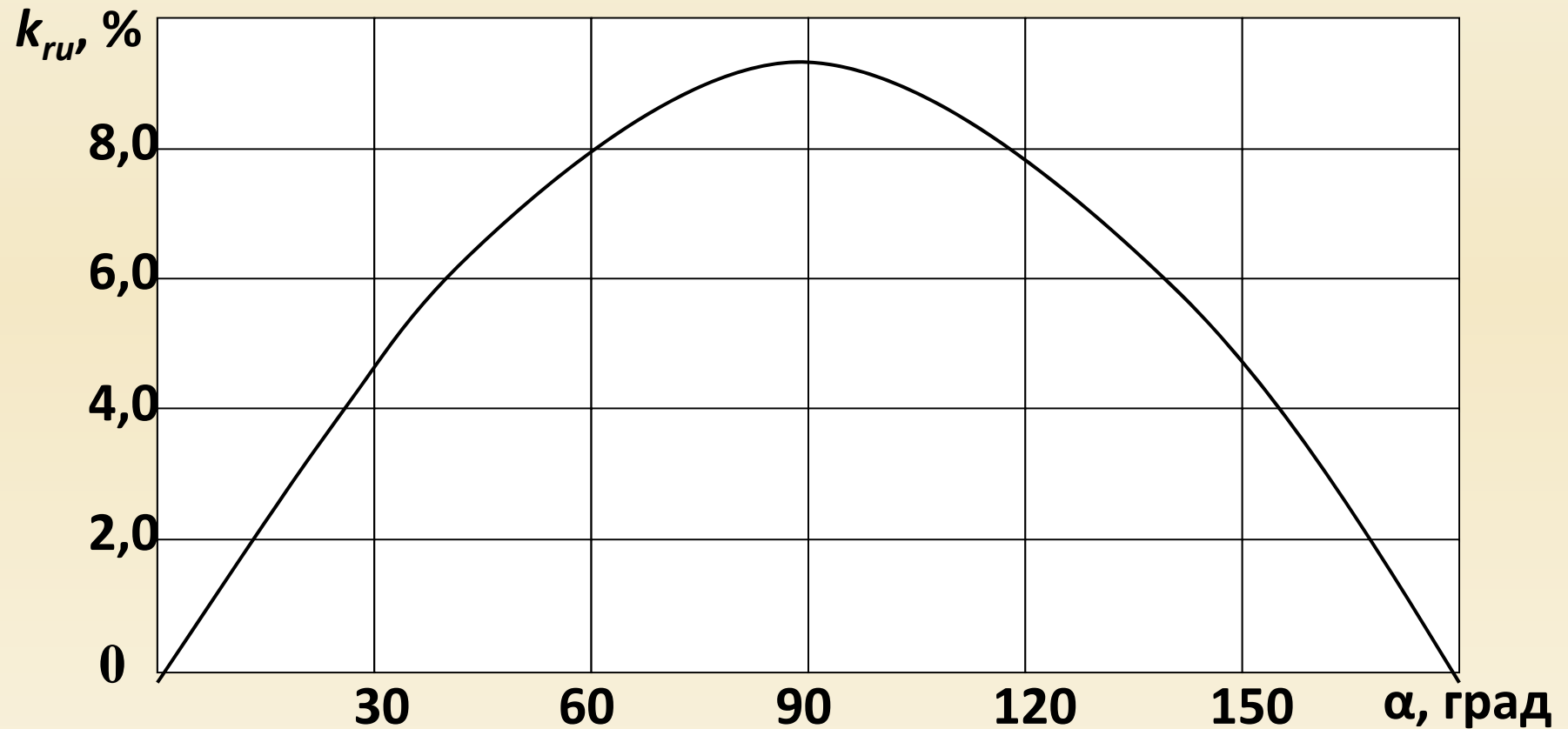
## Временные диаграммы регулятора с ИК



## Элементарный ТИРМ



## Искажения напряжения сети, питающей тиристорный регулятор



## Фазорегулируемый тиристорный усилитель без нулевого провода

Для схемы, показанной на рис. б, в зависимости от  $\alpha$  можно выделить три режима работы, соответствующих диапазонам изменения угла управления  $0 < \alpha < 60^\circ$ ;  $60^\circ < \alpha < 90^\circ$ ;  $90^\circ < \alpha < 150^\circ$ .

$$I_{\text{д}} = I_m \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \frac{3}{4} \left( \alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]}$$

$$0 < \alpha < 60^\circ$$

$$I_{\text{д}} = I_m \sqrt{\frac{3}{4} \pi \left( \frac{\pi}{3} + \frac{3}{4} \sin 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha \right)}$$

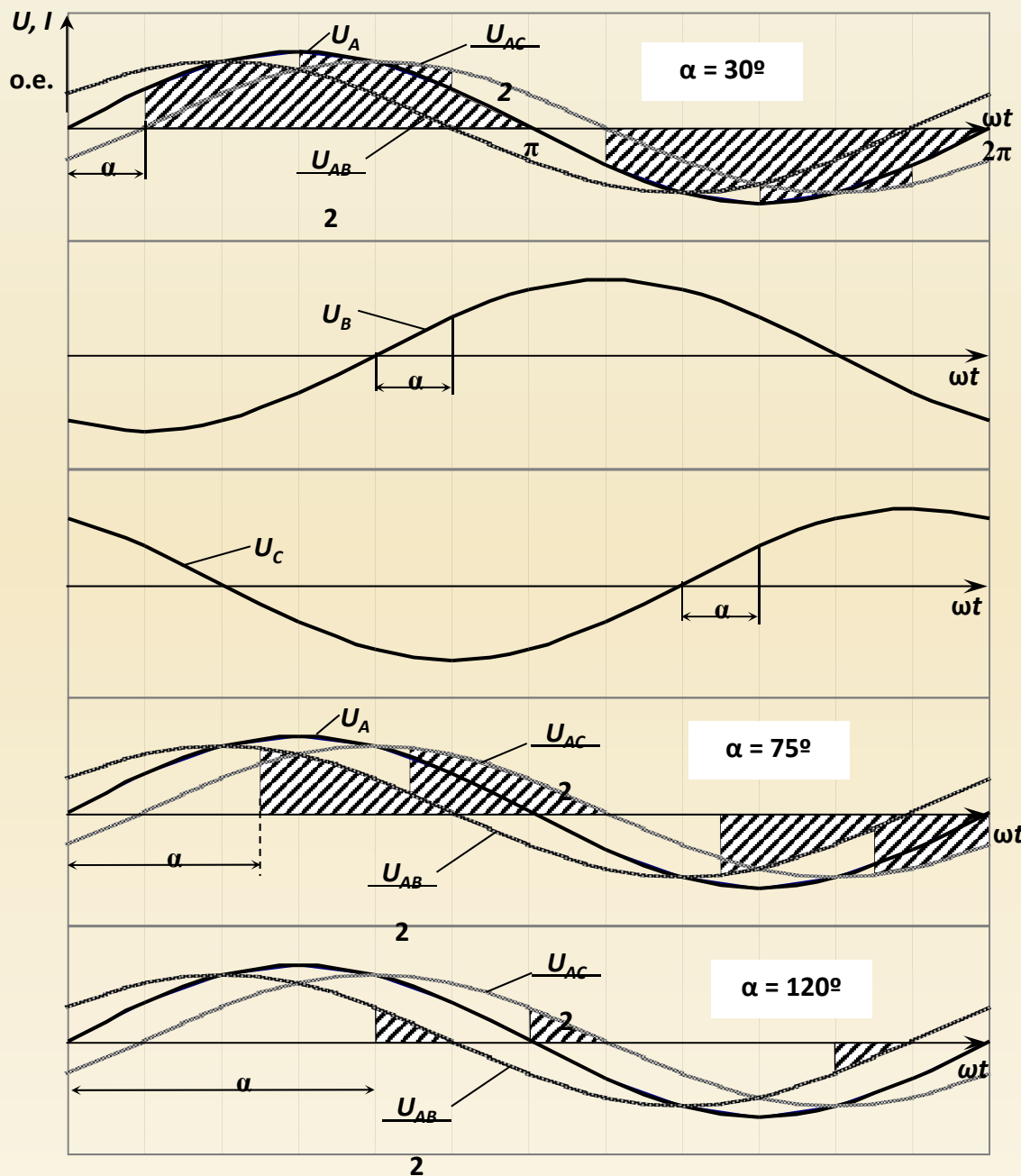
$$60^\circ < \alpha < 90^\circ$$

$$I_{\text{д}} = \frac{I_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \frac{5}{2} \pi - 3\alpha + \frac{3\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha + \frac{3 \sin 2\alpha}{4} \right)}$$

$$90^\circ < \alpha < 150^\circ$$



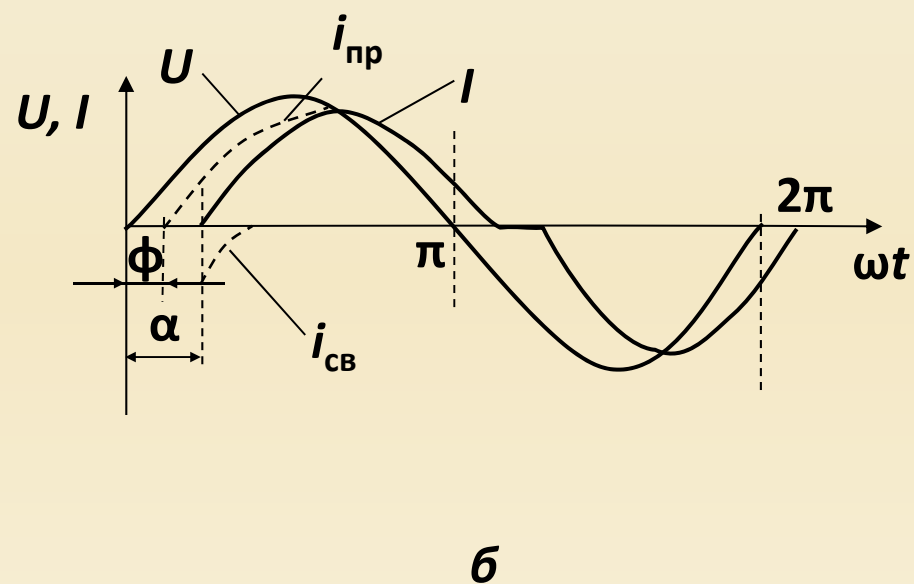
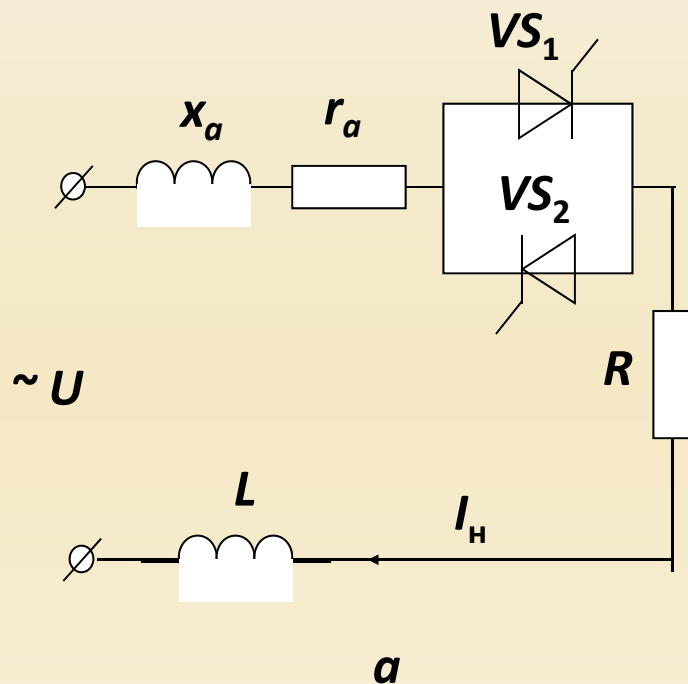
## Фазорегулируемый тиристорный усилитель без нулевого провода



Временные диаграммы напряжения на нагрузке в фазе А для  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 75^\circ$ ,  $\alpha = 120^\circ$

# Фазорегулируемые тиристорные усилители с активно-индуктивной нагрузкой

## Однофазный регулятор переменного тока с активно-индуктивной нагрузкой



## Фазорегулируемые тиристорные усилители с активно-индуктивной нагрузкой

При включении вентиля в момент  $\alpha$  в схеме начинается переходный процесс нарастания тока.

$$E_m \sin \omega t = iR + L \frac{di}{dt}$$

$$\alpha_{кр} = \varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}$$

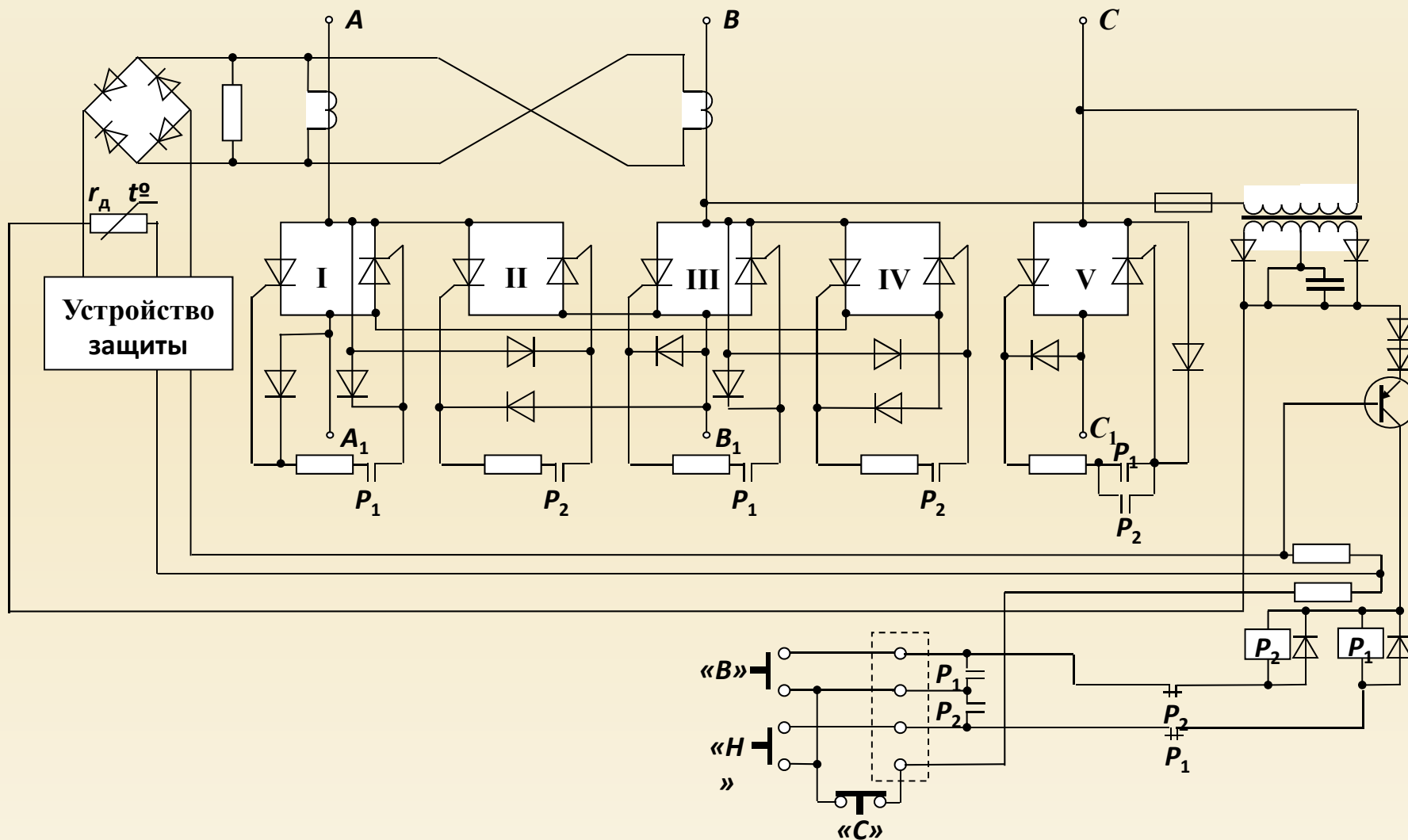
$$i = \frac{E_m}{R} \cdot \cos \varphi \left[ \sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega t - \alpha}{\operatorname{tg} \varphi}} \right]$$

$$i_{пр} = \frac{E_m}{R} \cdot \cos \varphi \sin(\omega t - \varphi)$$

$$i_{св} = -\frac{E_m}{R} \cdot \cos \varphi \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega t - \alpha}{\operatorname{tg} \varphi}}$$

# Примеры практического использования тиристорных коммутирующих и регулирующих устройств

## Реверсивный тиристорный пускатель серии ПТ



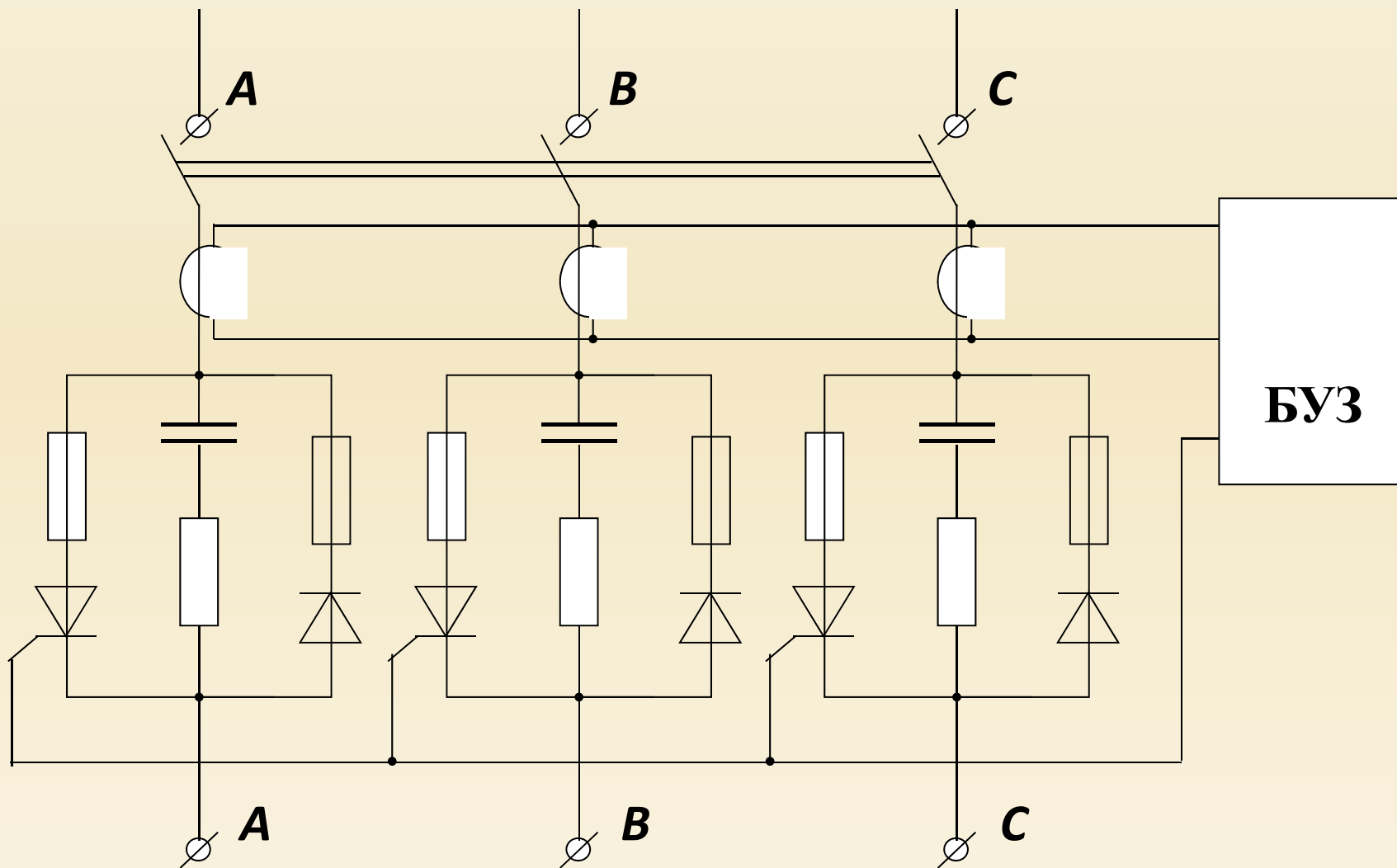
Примеры практического использования тиристорных коммутирующих и регулирующих устройств

## Внешний вид тиристорного коммутатора серии ТК



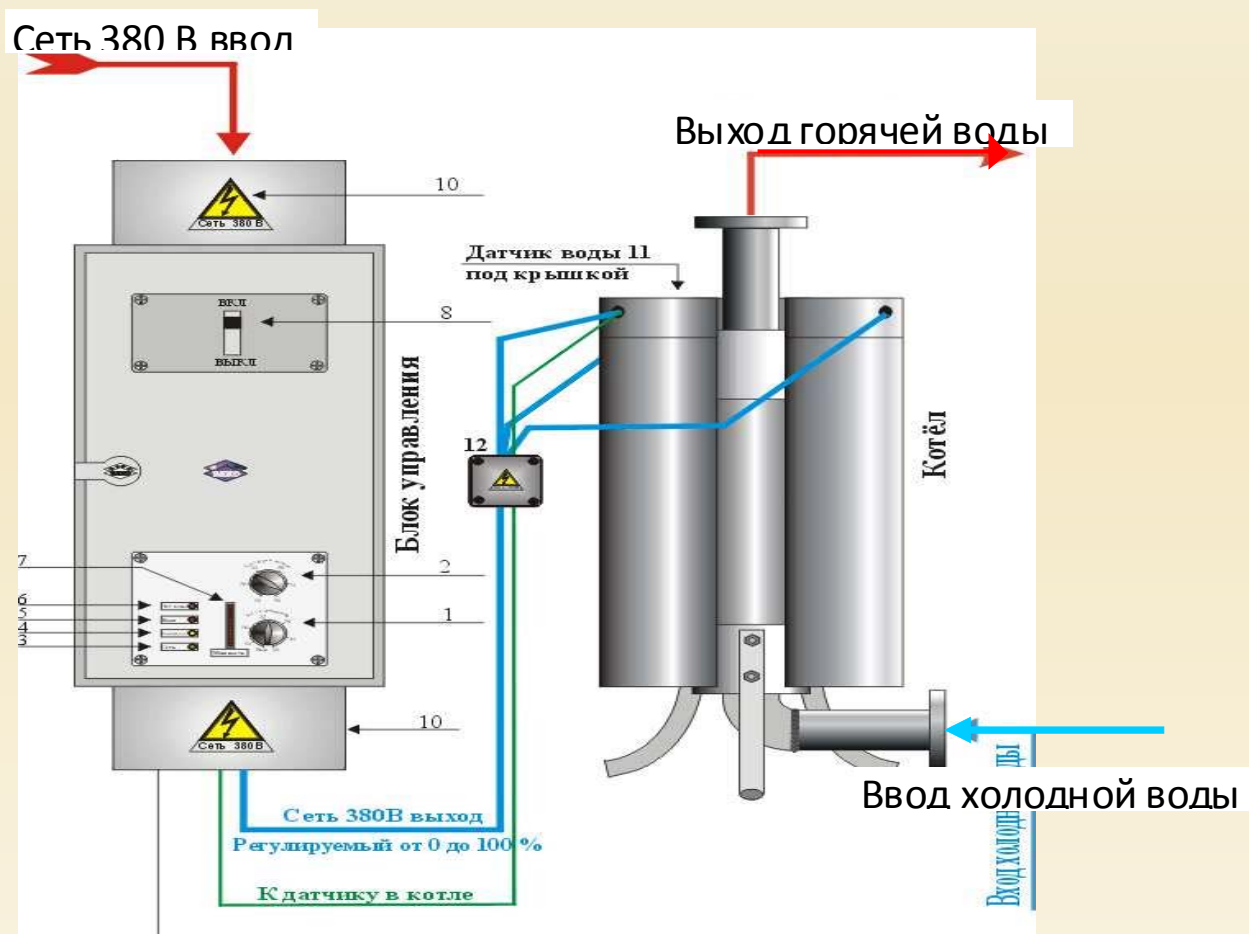
# Примеры практического использования тиристорных коммутирующих и регулирующих устройств

## Силовая схема регулятора мощности электропечей



# Примеры практического использования тиристорных коммутирующих и регулирующих устройств

## Тиристорная система регулировки мощности электродкотла



Примеры практического использования тиристорных коммутирующих и регулирующих устройств

## Конструктивное выполнение систем возбуждения турбогенераторов

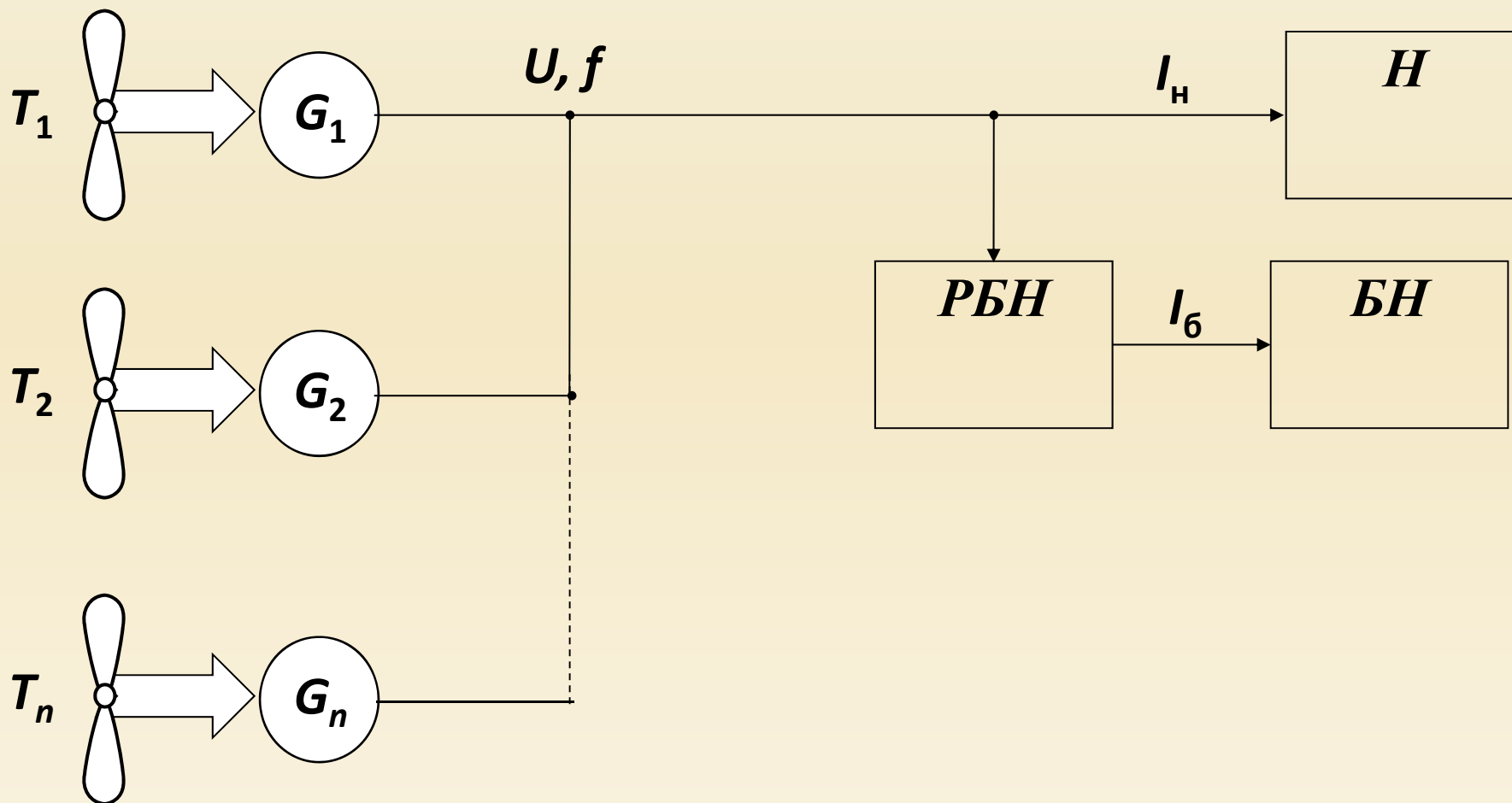






# Примеры практического использования тиристорных коммутирующих и регулирующих устройств

## АСЭС с вентильным регулированием режимов работы





***Кафедра***  
**Электроснабжение промышленных  
предприятий**