



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ» (КНИТУ – КАИ)

Преобразователи электрической энергии

Лекция 5 – Преобразователи с сетевой коммутацией

5.1. Общие сведения

5.2. Выпрямители

5.3. Инверторы ведомые сетью

5.4. Прямые преобразователи частоты с естественной коммутацией тиристоров

5.5. Тиристорные регуляторы напряжения переменного тока с естественной коммутацией

5.1. Общие сведения

5.2. Выпрямители

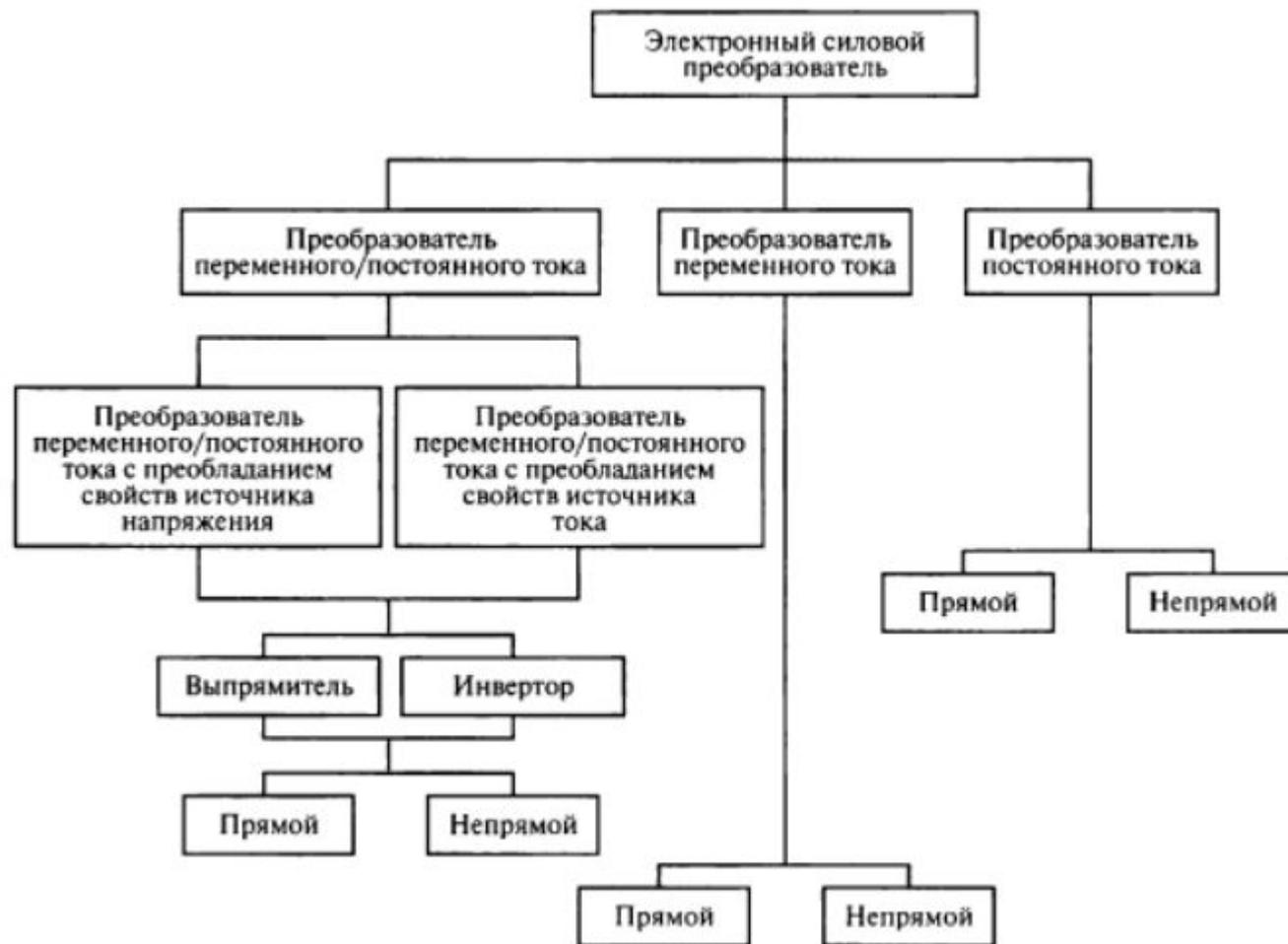
5.3. Инверторы ведомые сетью

5.4. Прямые преобразователи частоты с естественной коммутацией тиристором

5.5. Тиристорные регуляторы напряжения переменного тока с естественной коммутацией

5.1 Основные сведения

Классификация преобразователей. Основными силовыми электронными устройствами являются преобразователи, осуществляющие преобразование электроэнергии, т.е. изменение одного или нескольких ее параметров (напряжение, частота, число фаз и т.п.) посредством электронных силовых приборов, без существенных потерь мощности (МЭК 551-11-02).



5.1 Основные сведения



Иногда преобразователи классифицируются по следующим признакам:

- номинальной мощности (малой, средней, большой);
- рабочим напряжению и токам (низкого или высокого напряжения, малых и больших токов);
- значениям частоты входного или выходного напряжения (низкочастотные, высокочастотные);
- числу фаз (однофазные, трехфазные, многофазные);
- модульному принципу исполнения (многоячейковое, многоуровневое и др.);
- способам коммутации тиристоров (с конденсаторной коммутацией, коммутацией LC-контуром, коммутацией под воздействием резонансных процессов в нагрузке и др.);
- наличием резонансных цепей для снижения коммутационных потерь (квази-резонансные преобразователи постоянного тока и др.);
- способам регулирования (по входу, изменением алгоритма управления силовыми ключами, по выходу и др.).

5.1 Основные сведения

Основные параметры и характеристики преобразователей.

Электрическими параметрами входных и выходных силовых цепей преобразователей электротехнических устройств (источников и потребителей электроэнергии) являются:

- ток (число фаз и частота для переменного тока);
- номинальные действующие значения тока и напряжения (для переменного тока) и средние значения (для постоянного тока);
- диапазон регулирования выходного напряжения (тока);
- номинальные значения полной или активной мощности для переменного тока, а также коэффициент мощности для основных гармоник тока и напряжения в номинальном режиме;
- номинальное значение активной мощности для постоянного тока, определяемое как произведение номинальных средних значений тока и напряжения;
- коэффициент полезного действия в номинальном режиме работы;
- отклонения основных параметров в динамических режимах при изменениях

5.1 Основные сведения

Несинусоидальность переменного тока

$$i_{\phi}(\vartheta) = I_{1m} \sin(\vartheta_1 - \varphi_1) + I_{2m} \sin(\vartheta_2 - \varphi_2) + \dots + I_{nm} \sin(\vartheta_n - \varphi_m),$$

$$K_{rI} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1},$$

5.1 Основные сведения

Мощность

искажения

Мощности в линейных цепях переменного тока

Средняя мощность за период, называемая также *активной*, характеризует среднюю скорость преобразования электрической энергии в другой вид энергии (в рассматриваемом случае в тепловую) и определяется по формуле

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt,$$

Активная P и реактивная Q мощности в цепи синусоидального тока соответственно равны

$$\left. \begin{aligned} P &= UI \cos \varphi; \\ Q &= UI \sin \varphi, \end{aligned} \right\}$$

$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$; $\omega = 2\pi f$; U и I - действующие значения R напряжения и тока RL -цепи.

Полная (кажущаяся) мощность S

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

5.1 Основные сведения

Мощность

искажения

Мощности в линейных цепях переменного тока

Средняя мощность за период:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (U_m \sin \omega t) [I_{1m} \sin (\omega t - \varphi_1) + I_{2m} \sin (2\omega t - \varphi_2) + \dots + I_{nm} \sin (n\omega t - \varphi_{1n})] dt,$$

$$u(t)i_n(t) = 0 \text{ при } n \neq 1 \text{ то } P = UI_1 \cos \varphi_1,$$

Неравенство баланса мощностей при несинусоидальном напряжении:

$$S = UI > \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Баланс мощностей с учетом мощности искажений:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} = U \sqrt{\sum_{n \neq 1}^n I_n^2} = S_1 K_{r1},$$

Коэффициент мощности при несинусоидальном токе:

$$\chi = \frac{P}{S} = v \cos \varphi_1, \quad v = \frac{1}{\sqrt{1 + K_{r1}}}.$$

Крест фактор (**Коэффициент амплитуды**): отношение максимального значения напряжения или тока $U_m(I_m)$ к их действующему значению $U(I)$.

5.1 Основные сведения

Мощность

искажения

Пульсации напряжения и тока в электросистемах на постоянном токе

В силовой электронике основными источниками напряжения постоянного тока являются выпрямители:

$$u_d(\vartheta) = U_d + u_n(\vartheta),$$

U_d - постоянная составляющая выпрямленного напряжения:

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u_d(\vartheta) d\vartheta ;$$

$u_n(\vartheta)$ - переменная составляющая выпрямленного напряжения:

$$u_n(\vartheta) = \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \sin(n\vartheta + \varphi_n),$$

5.1 Основные сведения

Мощность

искажения

Пульсации напряжения и тока в электросистемах на постоянном токе

Определения коэффициента пульсаций:

$$\left. \begin{aligned} K_n &= \frac{U_{d \max} - U_{d \min}}{2U_d}; \\ K_n &= \frac{U_{n1m}}{U_d}; \\ K_n &= \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}}{U_d}, \end{aligned} \right\}$$

$U_{d \max}, U_{d \min}$ - максимальное и минимальное значения выпрямленного напряжения;

U_{n1m} - амплитуда первой гармоники выпрямленного напряжения;

$\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}$ - действующее значение переменной составляющей.

5.1. Общие сведения

5.2. Выпрямители

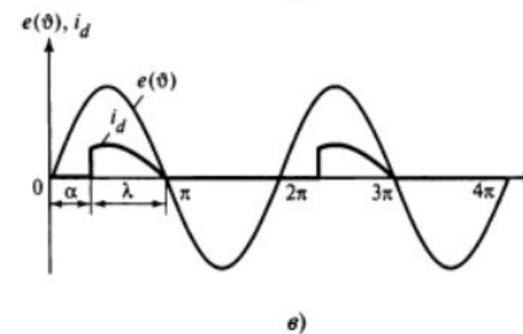
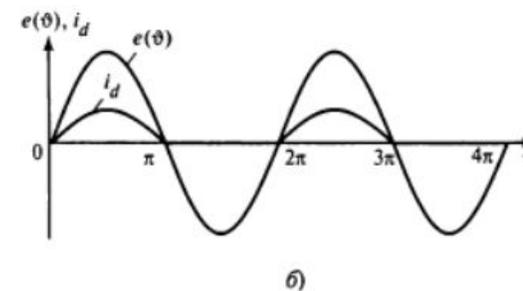
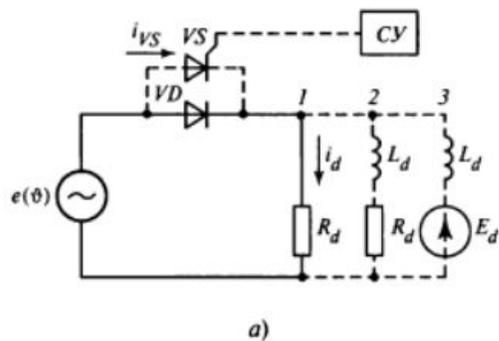
5.3. Инверторы ведомые сетью

5.4. Прямые преобразователи частоты с естественной коммутацией тиристором

5.5. Тиристорные регуляторы напряжения переменного тока с естественной коммутацией

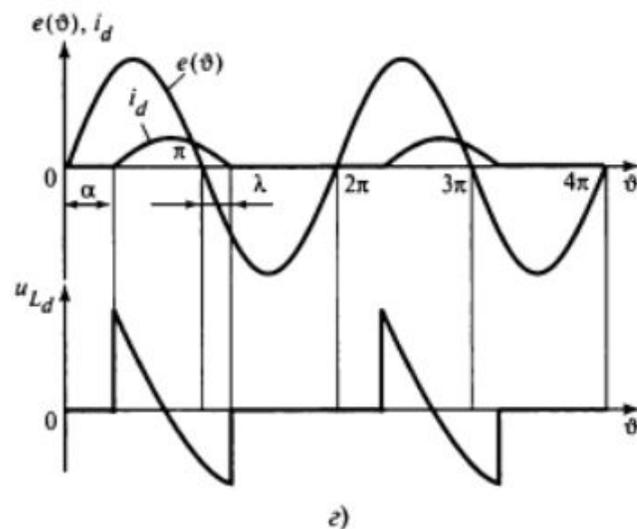
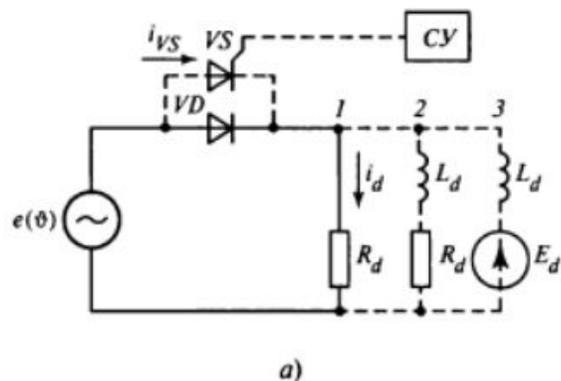
5.2.1 Принципы выпрямления

Схема с активной нагрузкой



5.2.1 Принципы выпрямления

Схема с активно-индуктивной нагрузкой

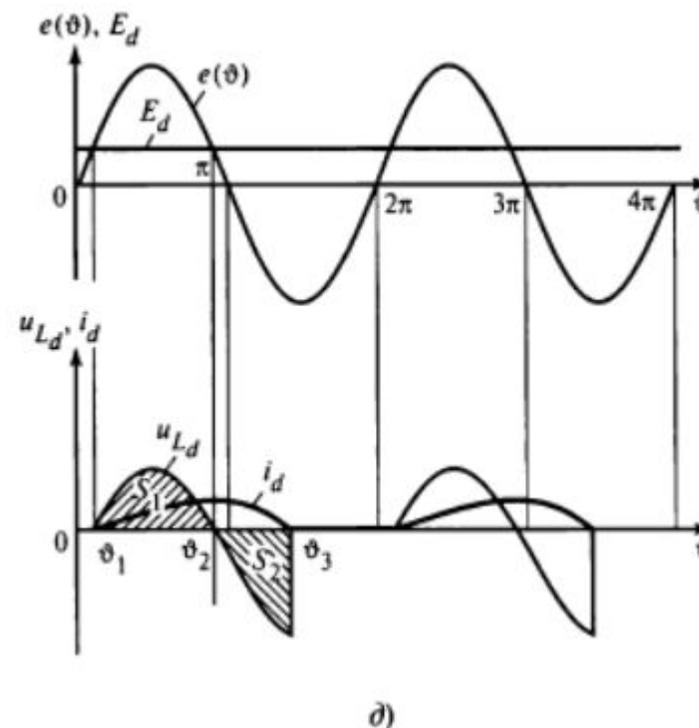
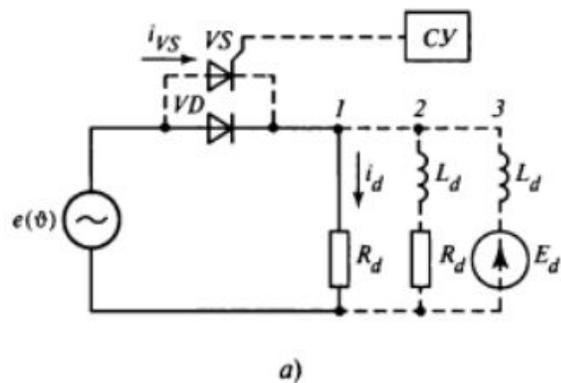


$$E_m \sin \vartheta = i_d R_d + \omega L_d \frac{di_d}{dt}.$$

$$i_d(\vartheta) = \frac{E_m}{\sqrt{R_d^2 + (\omega L_d)^2}} \left\{ \sin(\vartheta - \varphi) - [\sin(\alpha - \varphi)] e^{\frac{-\vartheta + \alpha}{\tau \omega}} \right\}, \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L_d}{R_d}; \quad \tau = \frac{L_d}{R_d}.$$

5.2.1 Принципы выпрямления

Схема с нагрузкой в виде противоЭДС



$$i_d(\vartheta) = \frac{1}{\omega L_d} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} [e(\vartheta) - E_d] d\vartheta.$$

5.2.2 Основные схемы выпрямления



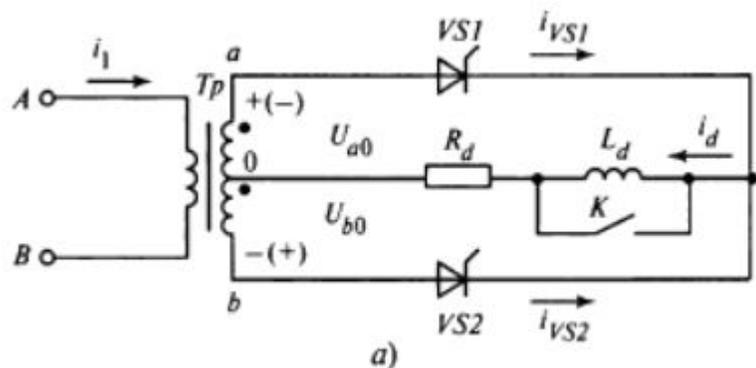
Допущения для идеализированных схем выпрямления:

- полупроводниковые элементы идеальны, т.е. во включенном состоянии имеют равное нулю сопротивление, а в выключенном — равную нулю проводимость;
- продолжительности включения и выключения полупроводниковых элементов равны нулю;
- сопротивления цепей, соединяющих элементы схемы, равны нулю;
- сопротивления обмоток трансформатора (активные и индуктивные), потери энергии в его магнитопроводе и ток намагничивания также равны нулю.

5.2.2 Основные схемы выпрямления

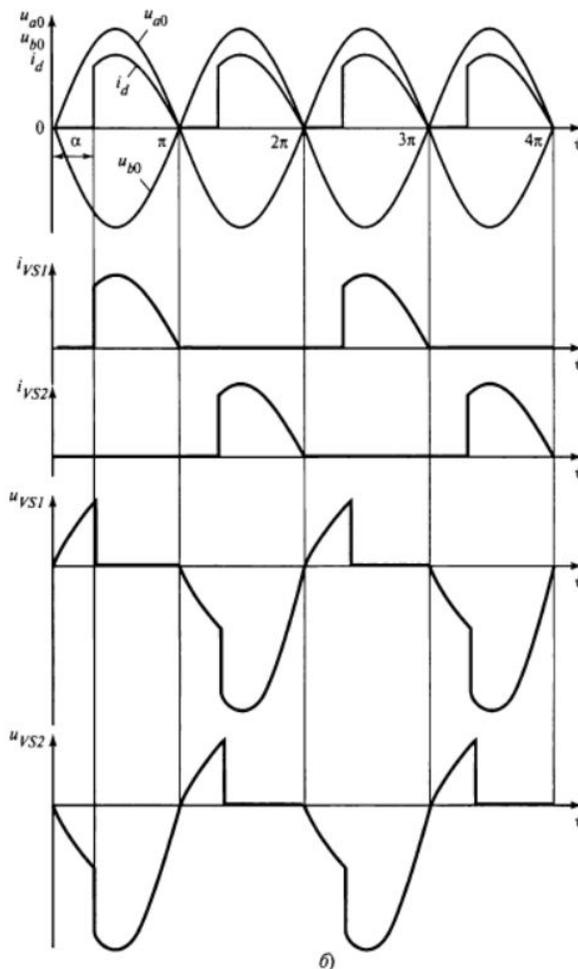
Однофазная двухполупериодная схема со средней точкой (нулевым выводом)

При активной нагрузке



$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos \alpha),$$

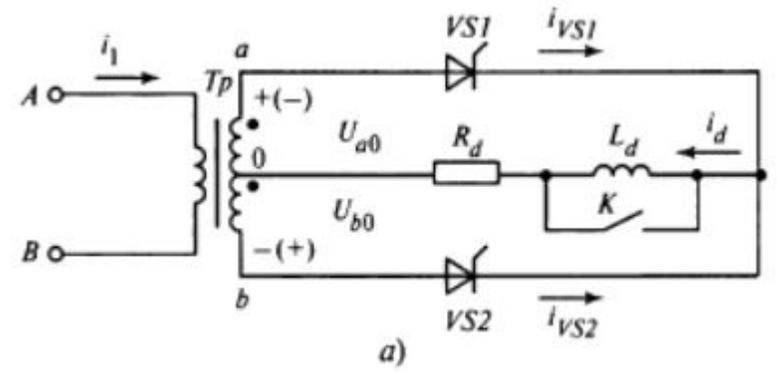
$$U_d = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$



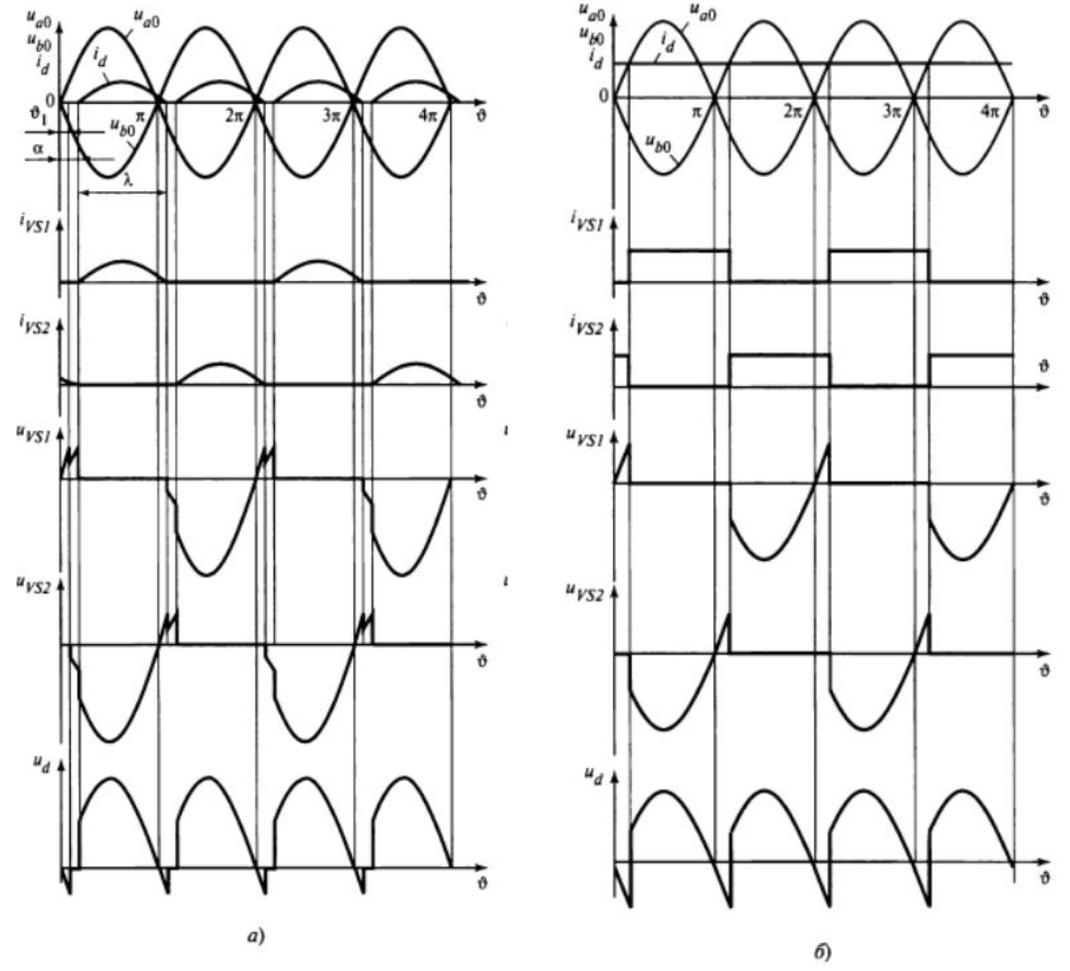
5.2.2 Основные схемы выпрямления

Однофазная двухполупериодная схема со средней точкой (нулевым выводом)

При активно-индуктивной нагрузке



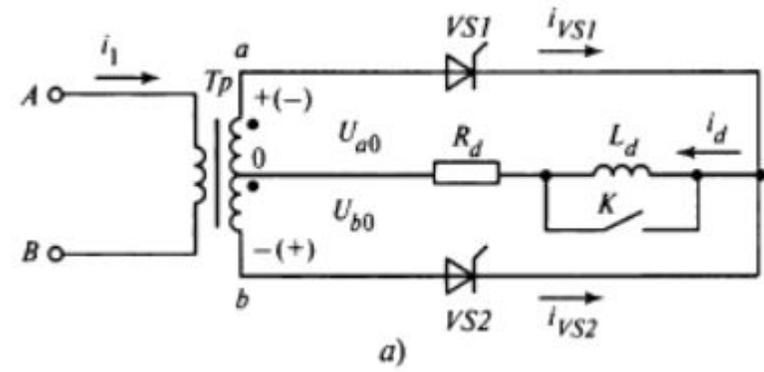
$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha.$$



5.2.2 Основные схемы выпрямления

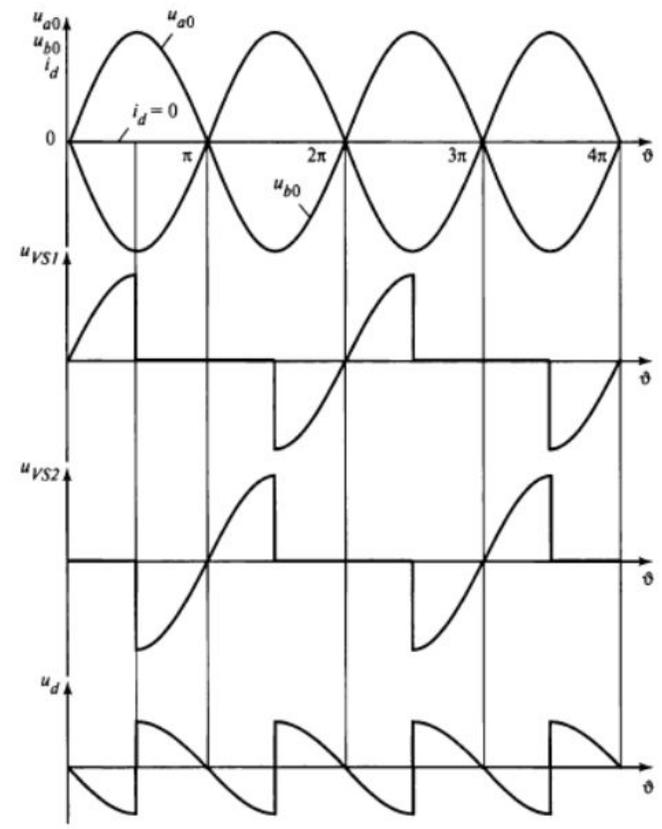
Однофазная двухполупериодная схема со средней точкой (нулевым выводом)

При активно-индуктивной нагрузке



$$I_{cp\ VS1} = I_{cp\ VS2} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_{VS}(\vartheta) d\vartheta.$$

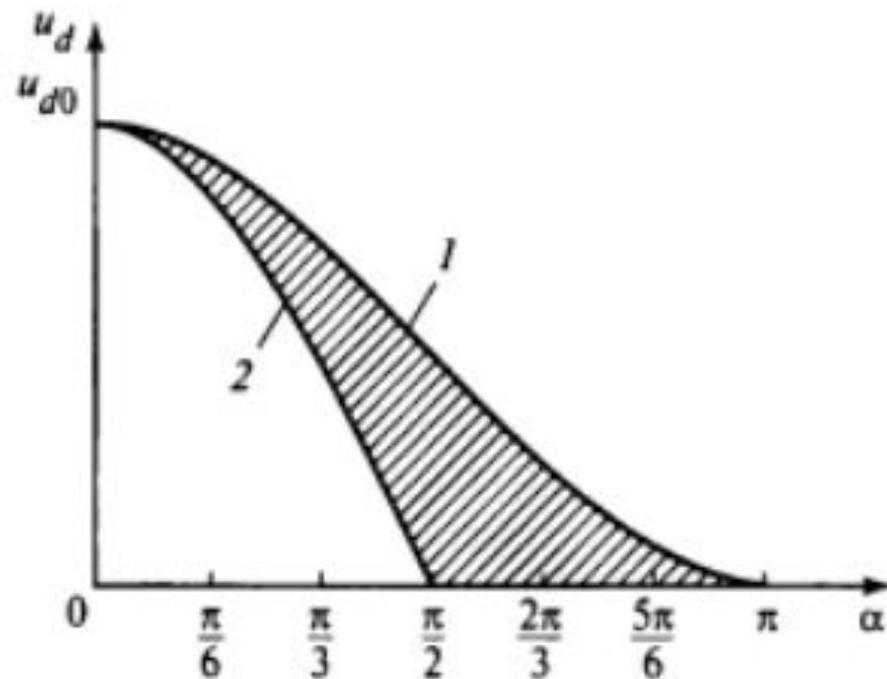
$$I_{cp\ VS1} = I_{cp\ VS2} = \frac{1}{2} I_d.$$



5.2.2 Основные схемы выпрямления

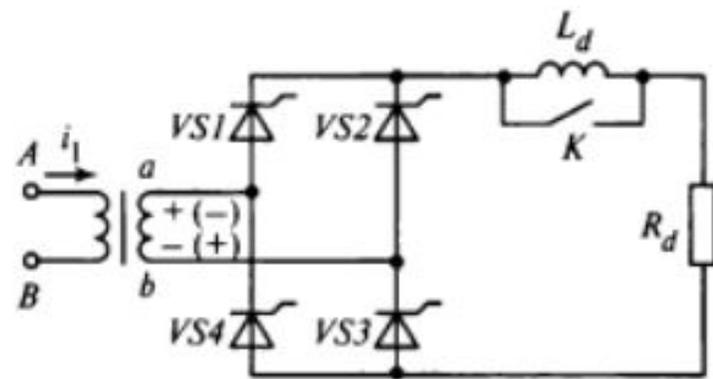
Однофазная двухполупериодная схема со средней точкой (нулевым выводом)

Регулировочная характеристика



5.2.2 Основные схемы выпрямления

Однофазная мостовая схема



При активной нагрузке

$$U_d = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

$$U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2,$$

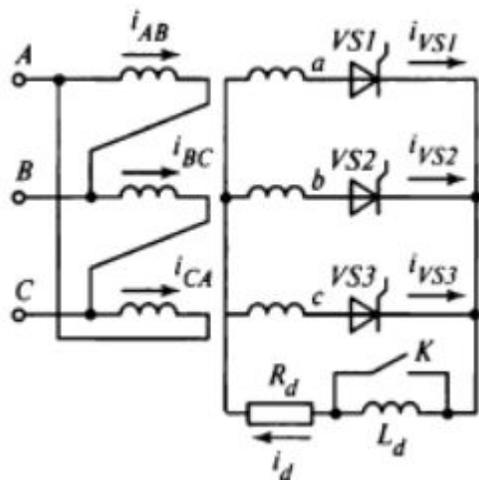
При активно-индуктивной нагрузке

$$u_d = U_{d0} \cos \alpha.$$

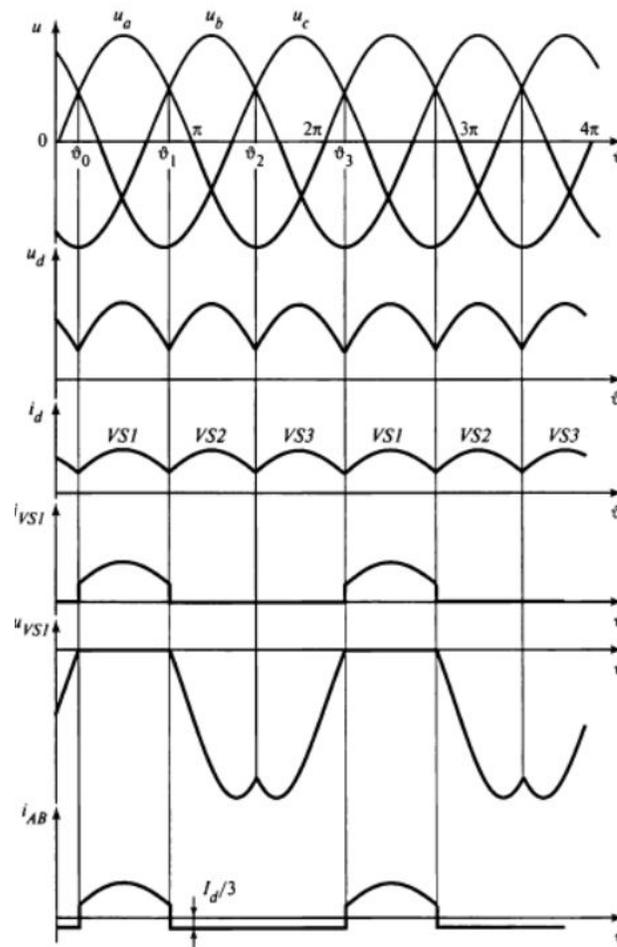
5.2.2 Основные схемы выпрямления

Трехфазная схема со средней точкой. Работа схемы с углом управления $\alpha = 0$.

При активной нагрузке



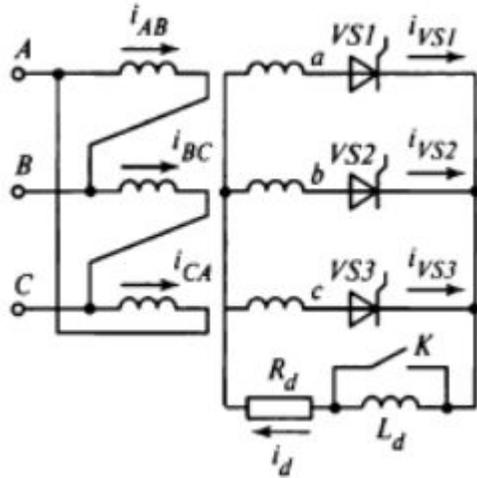
$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} U_2 \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 = 1,17 U_2,$$



5.2.2 Основные схемы выпрямления

Трехфазная схема со средней точкой. Работа схемы с углом управления $\alpha = 0$.

При активной нагрузке



Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} U_2 \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 = 1,17 U_2,$$

Коэффициент схемы:

$$k_{сх} = 3\sqrt{6}/2\pi;$$

Максимальное значение обратного напряжения на тиристоре:

$$U_{R \max} = \sqrt{3} U_{2m} = \sqrt{6} U_2 = \frac{\pi}{3} U_d,$$

Максимальное значение тока тиристора:

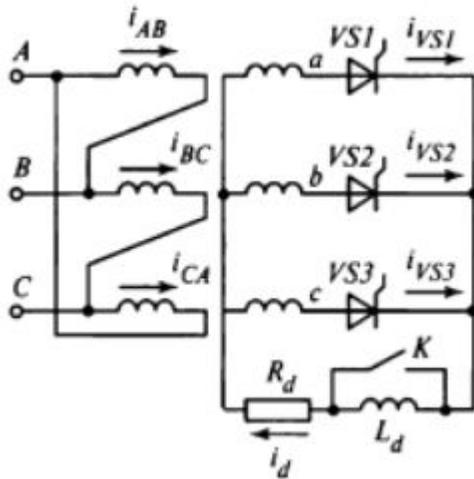
$$I_{\max} = \frac{U_{2m}}{R_d} = \frac{\pi}{3\sqrt{3}} U_d;$$

Среднее значение тока тиристора:

$$I_{TAV} = I_d/3.$$

5.2.2 Основные схемы выпрямления

Трехфазная схема со средней точкой. Работа схемы с углом управления $\alpha = 0$.



Ток первичной обмотки трансформатора при активной нагрузке:

$$\left. \begin{aligned} i_{AB} &= i_{VS1} - \frac{1}{3} I_d; \\ i_{BC} &= i_{VS2} - \frac{1}{3} I_d; \\ i_{CA} &= i_{VS3} - \frac{1}{3} I_d. \end{aligned} \right\}$$

Токи в обмотках трансформатора при активно-индуктивной нагрузке :

$$\left. \begin{aligned} I_{\max} &= I_d/3; \\ I_2 &= I_{TRMS} = I_d/\sqrt{3}; \\ I_1 &= \frac{1}{k_T} \frac{\sqrt{2}}{3} I_d. \end{aligned} \right\}$$

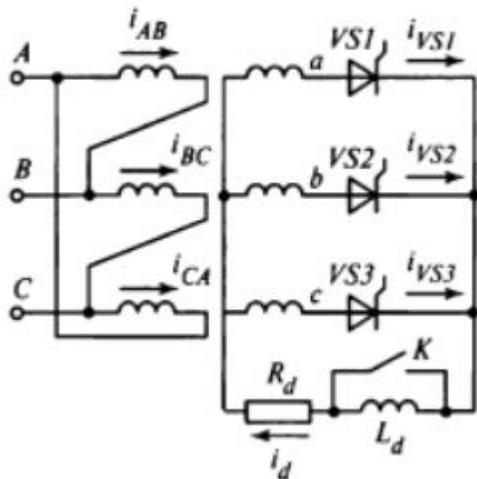
Мощности обмоток трансформатора при активно-индуктивной нагрузке :

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= 3 U_1 I_{1н} = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} P_{дн}; \\ S_2 &= 3 U_2 I_{2н} = \frac{2\pi}{3\sqrt{2}} P_{дн}, \end{aligned} \right\}$$

5.2.2 Основные схемы выпрямления

Трехфазная схема со средней точкой. Работа схемы с углом управления $\alpha > 0$.

Выпрямленное значение напряжения при активной и активно-индуктивной нагрузке при $0 < \alpha < \pi/6$:



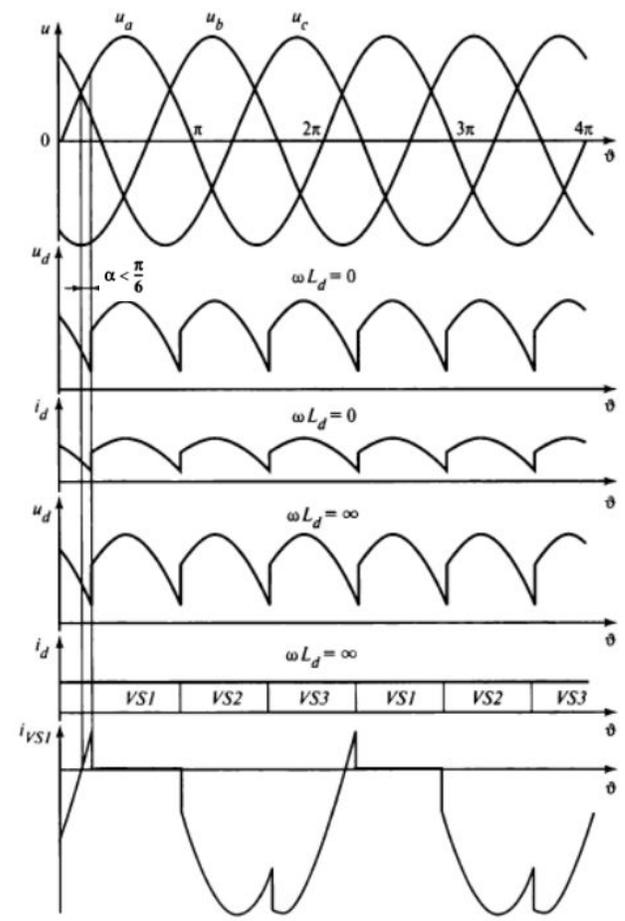
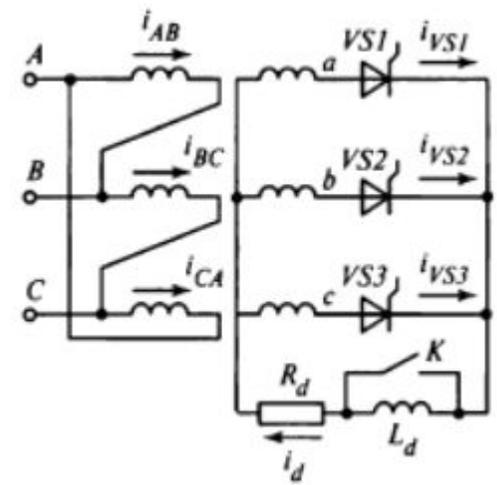
$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \sqrt{2} U_2 \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha .$$

Выпрямленное значение напряжения при активной и активно-индуктивной нагрузке при $\alpha > \pi/6$:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_2 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right] = U_{d0} \left[\frac{1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right)}{\sqrt{3}} \right] .$$

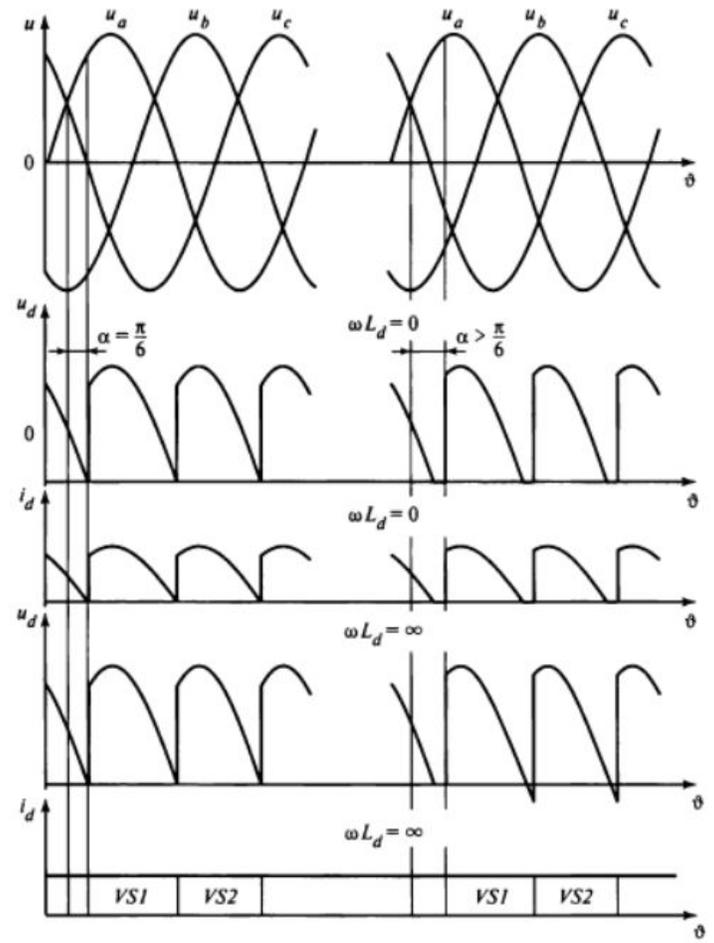
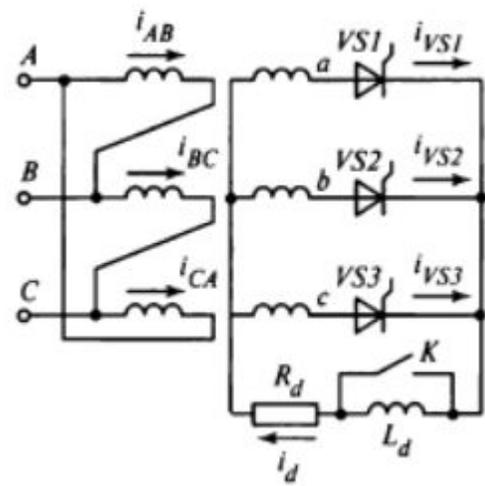
5.2.2 Основные схемы выпрямления

Трехфазная схема со средней точкой. *Работа схемы с углом управления $\alpha > 0$.*



5.2.2 Основные схемы выпрямления

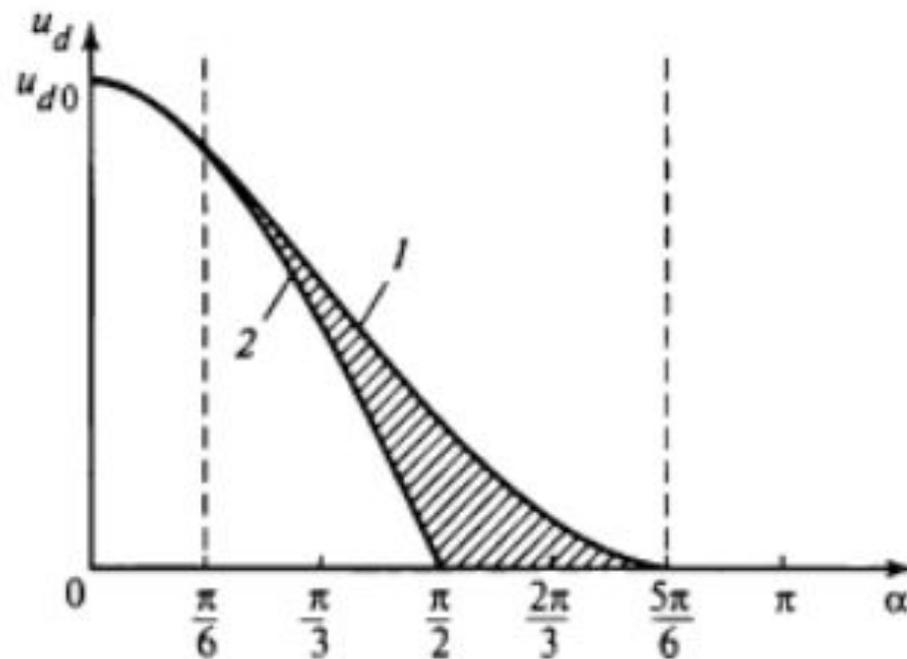
Трехфазная схема со средней точкой. Работа схемы с углом управления $\alpha > 0$.



5.2.2 Основные схемы выпрямления

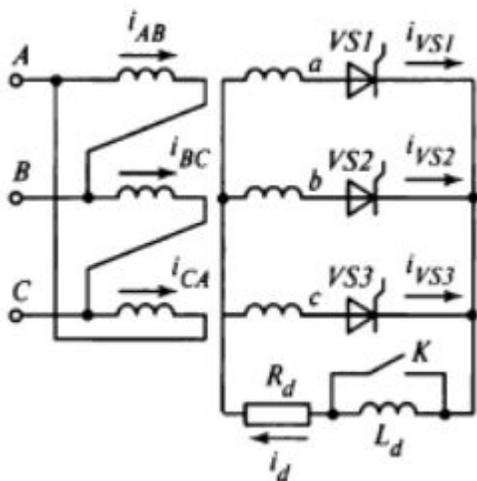
Трехфазная схема со средней точкой.

Регулировочная характеристика



5.2.2 Основные схемы выпрямления

Трёхфазная схема со средней точкой. Работа схемы с углом управления $\alpha > 0$.



Максимальные значения напряжения на тиристорах при активной нагрузке:

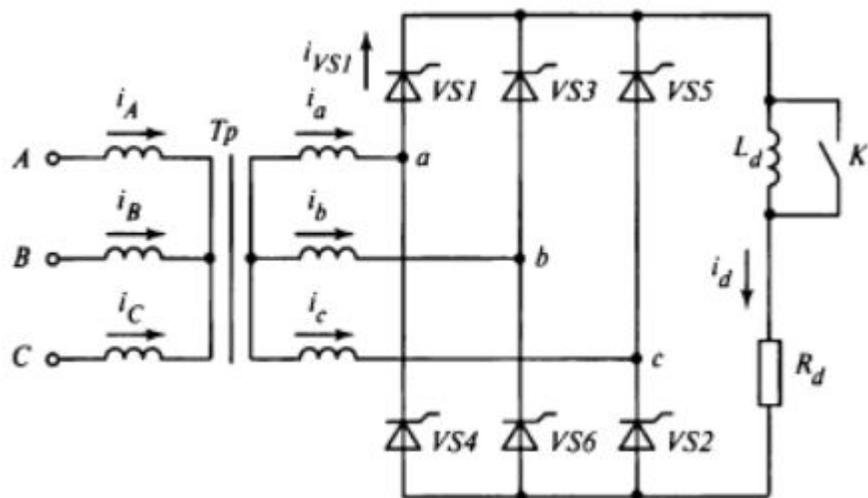
$$\left. \begin{aligned} U_{F \max} &= \sqrt{6} U_2 \sin \alpha && \text{при } \alpha < \pi/6; \\ U_{F \max} &= \sqrt{2} U_2 \sin (\alpha + \pi/6) && \text{при } \alpha > \pi/6; \\ U_{R \max} &= \sqrt{6} U_2; \end{aligned} \right\}$$

Максимальные значения напряжения на тиристорах при активно-индуктивной нагрузке в режиме непрерывного тока i_d при $\omega L_d \rightarrow \infty$

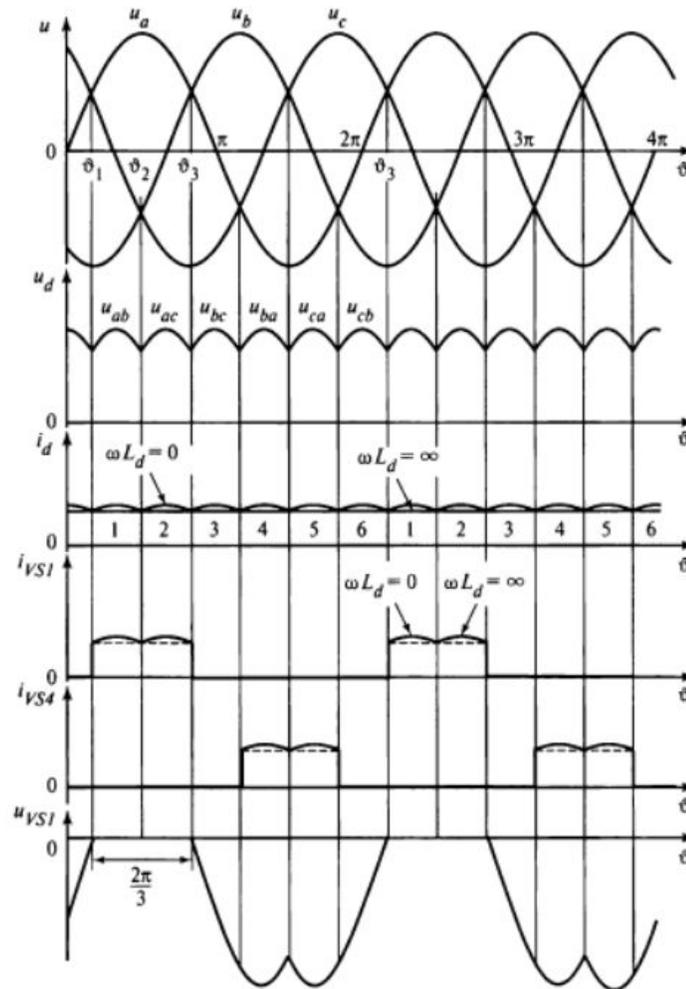
$$\left. \begin{aligned} U_{F \max} &= \sqrt{6} U_2 \sin \alpha; \\ U_{R \max} &= \sqrt{6} U_2. \end{aligned} \right\}$$

5.2.2 Основные схемы выпрямления

Трехфазная мостовая схема. Работа схемы с углом управления $\alpha > 0$.



$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{6} U_2 \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2,$$

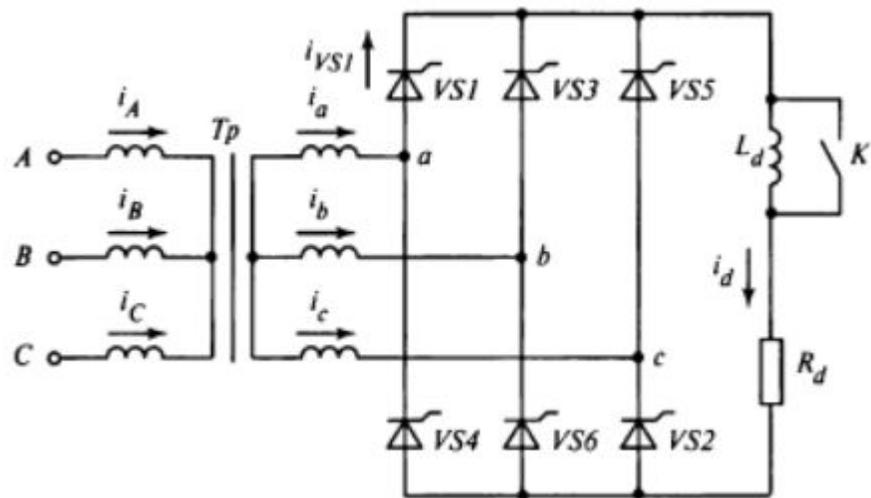


5.2.2 Основные схемы выпрямления

Трехфазная мостовая схема. Работа схемы с углом управления $\alpha = 0$.

Среднее значение выпрямленного напряжения при активно-индуктивной нагрузке:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{6} U_2 \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2$$



Максимальное значение обратного напряжения на тиристоре при $\omega L_d = \infty$:

$$U_{R \max} = \sqrt{2} U_{2л};$$

Максимальное значение тока тиристора при $\omega L_d = \infty$:

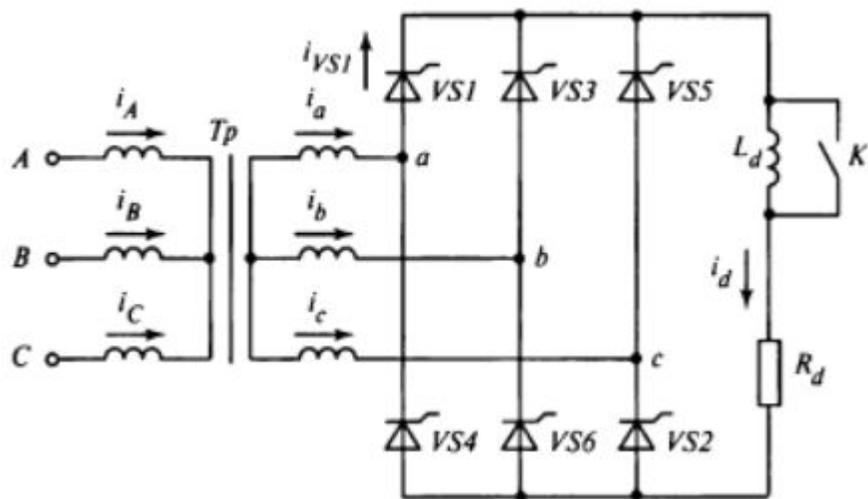
$$I_{\max} = I_d;$$

Среднее значение тока тиристора $\omega L_d = \infty$:

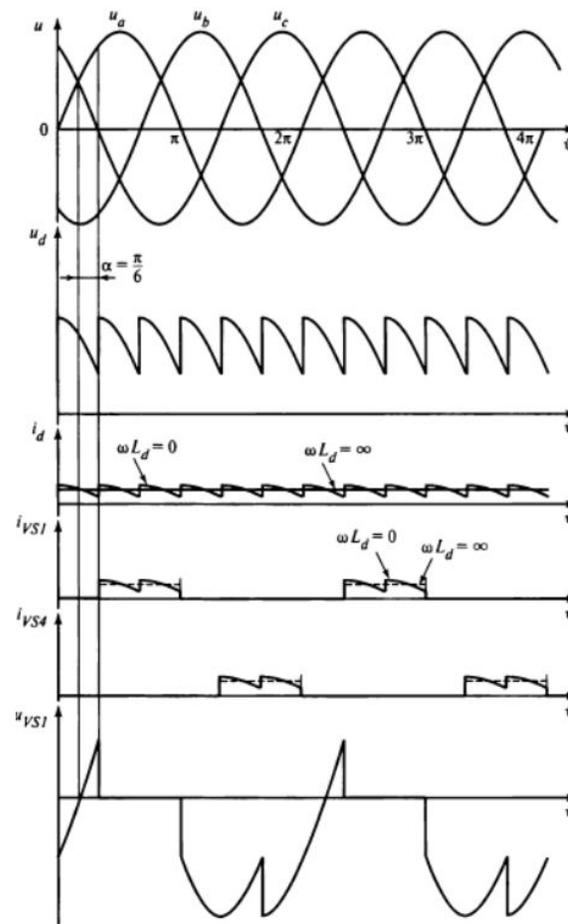
$$I_{TAV} = \frac{I_d}{3}.$$

5.2.2 Основные схемы выпрямления

Трехфазная мостовая схема. Работа схемы с углом управления α .

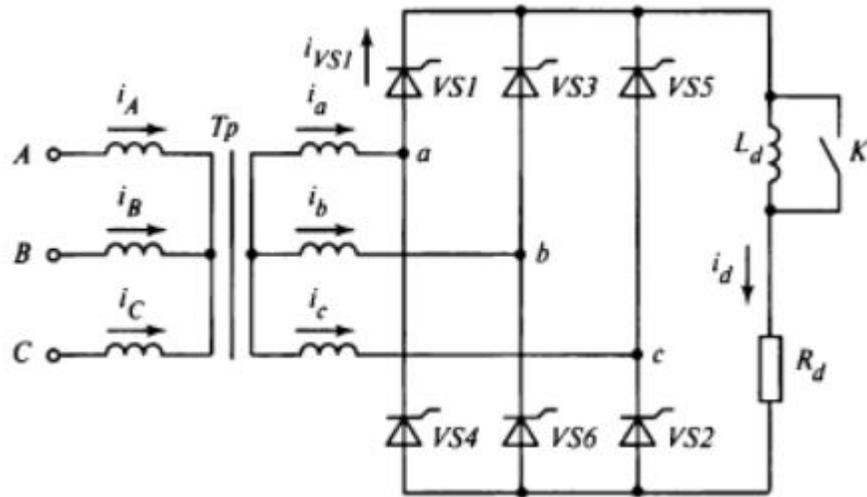


$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \sqrt{3} U_2 \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha.$$

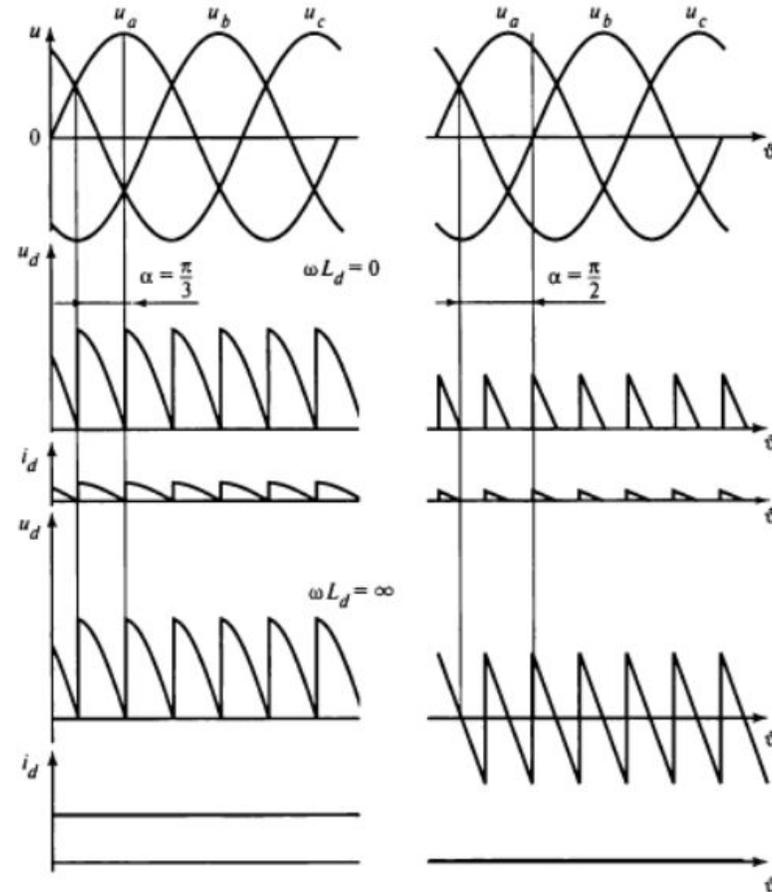


5.2.2 Основные схемы выпрямления

Трёхфазная мостовая схема. Работа схемы с углом управления $0 < \alpha < \pi/3$.



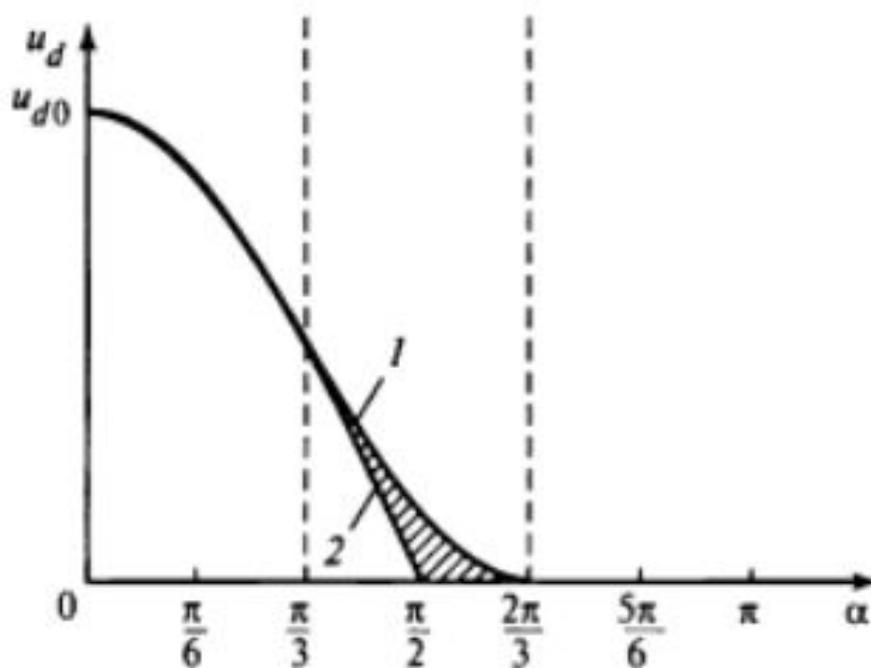
$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \sqrt{3} U_2 \sin \vartheta \, d\vartheta = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha.$$



5.2.2 Основные схемы выпрямления

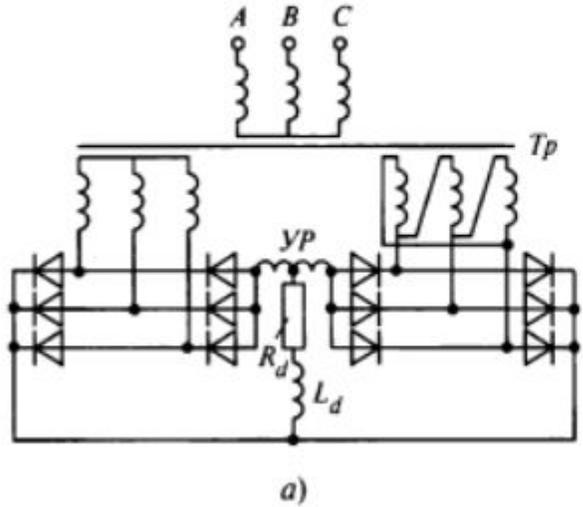
Трёхфазная мостовая схема. Работа схемы с углом управления $\alpha > 0$.

Регулировочная характеристика

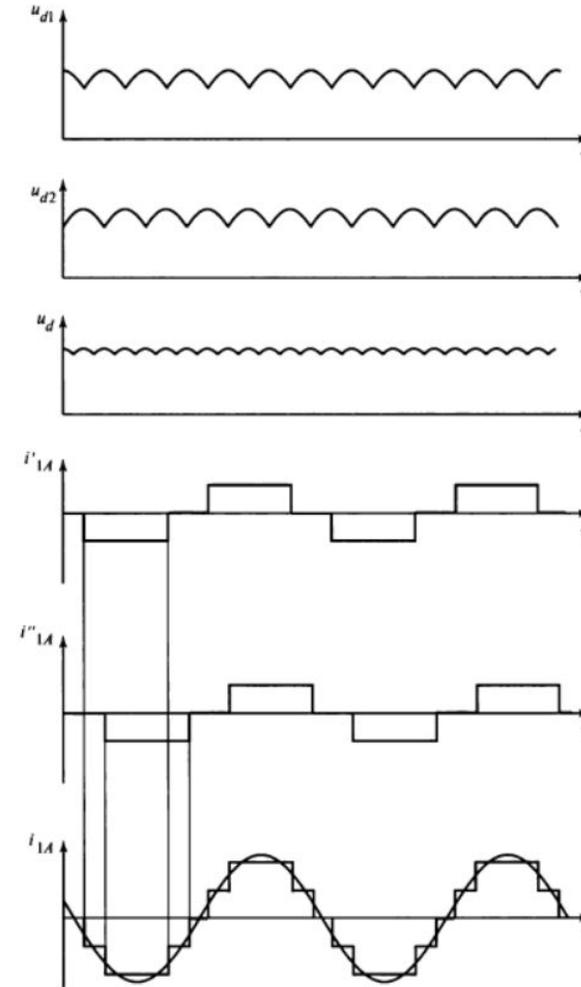


5.2.2 Основные схемы выпрямления

Многофазовые схемы.

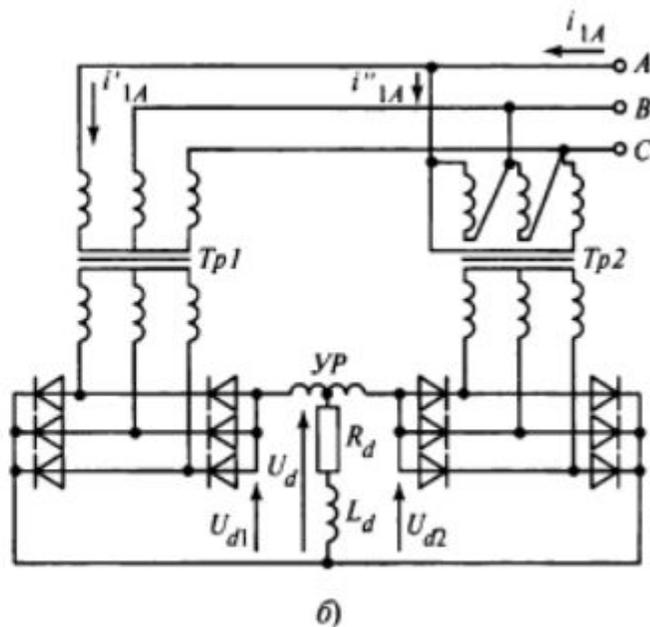


$$u_d = u_{d1} - \frac{u_p}{2} = u_{d2} + \frac{u_p}{2},$$

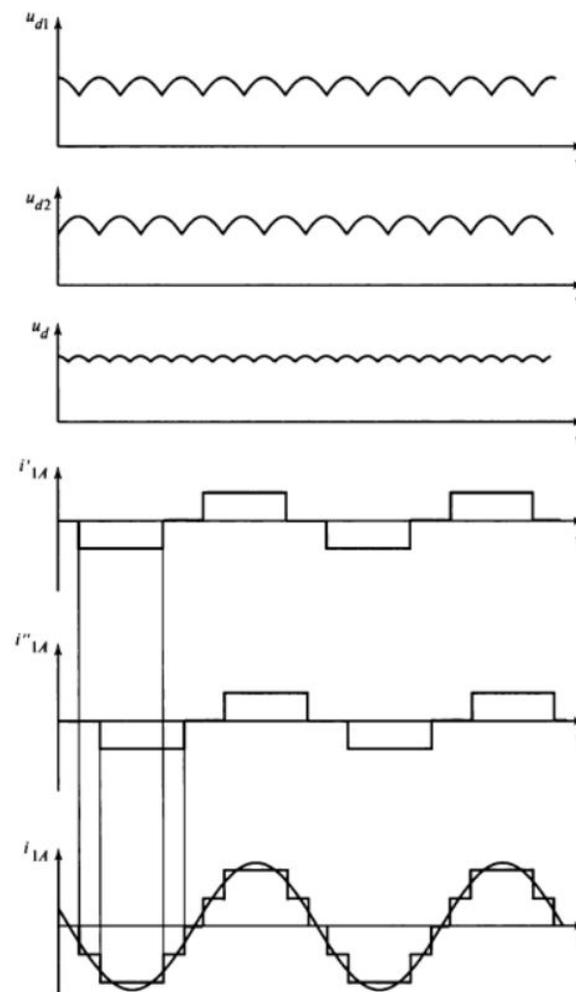


5.2.2 Основные схемы выпрямления

Многомостовые схемы.

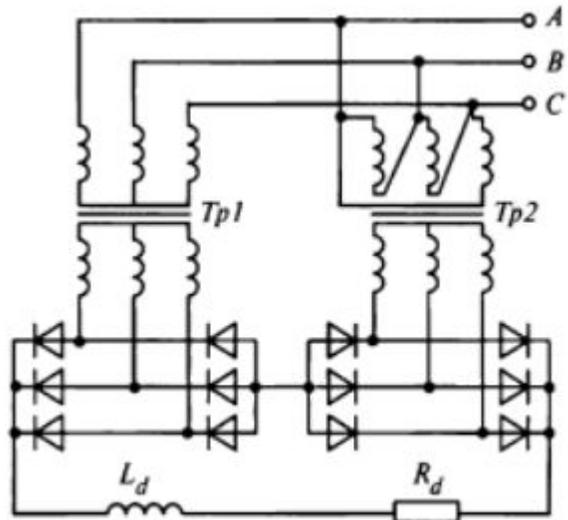


$$u_d = u_{d1} - \frac{u_p}{2} = u_{d2} + \frac{u_p}{2},$$

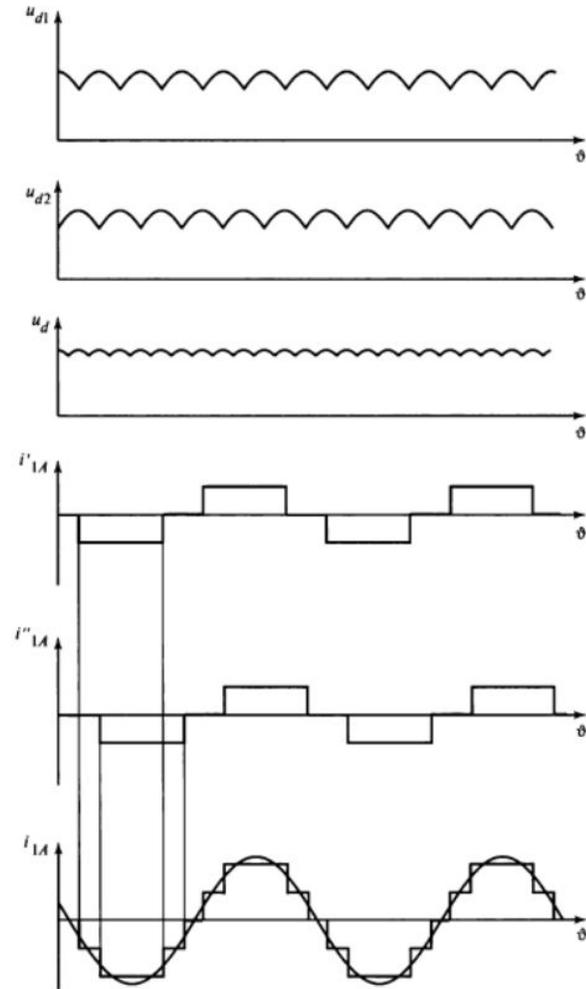


5.2.2 Основные схемы выпрямления

Многофазовые схемы.



$$U_d = U_{d1} + U_{d2}$$



5.2.3 Характеристики выпрямителей

Пульсации выпрямленного напряжения.

Выпрямленное напряжение можно представить в виде суммы переменной и постоянной составляющих. Переменная составляющая является суммой гармонических (синусоидальных) напряжений:

$$u_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \sin(nm\omega t + \varphi_n),$$

Частота составляющих выпрямленного напряжения:

$$f_n = nf_1 = mnf,$$

Амплитуда n -й гармоники напряжения для схем, работающих при угле управления $\alpha = 0$:

$$U_{nm} = \frac{2U_d}{m^2n^2 - 1},$$

Действующее значение переменной составляющей выпрямленного напряжения:

$$U_n = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2},$$

5.2.3 Характеристики выпрямителей

Искажение входных токов выпрямителей.

При активно-индуктивной нагрузке, когда $\omega L_d = \infty$ ток:

$$i_1(\vartheta) = \frac{4I_d}{\pi k_T} \left[\sin \vartheta + \frac{1}{3} \sin n\vartheta + \dots + \frac{1}{n} \sin n\vartheta \right],$$

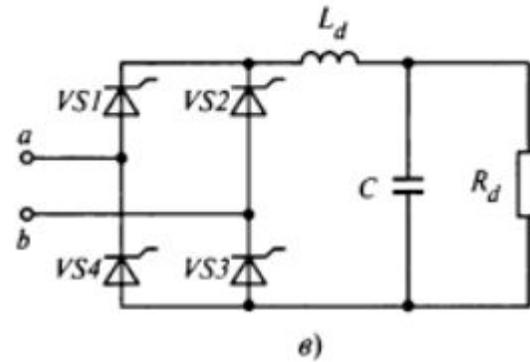
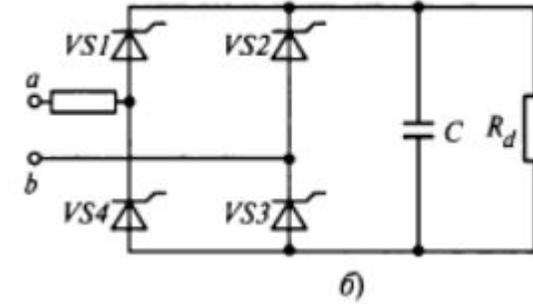
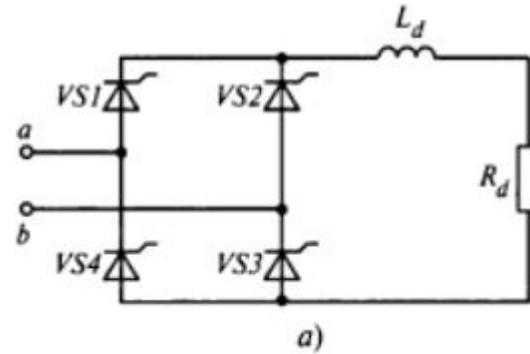
Уменьшение пульсаций напряжения и искажений входного тока

Коэффициентом сглаживания:

$$S_c = k'_n / k''_n.$$

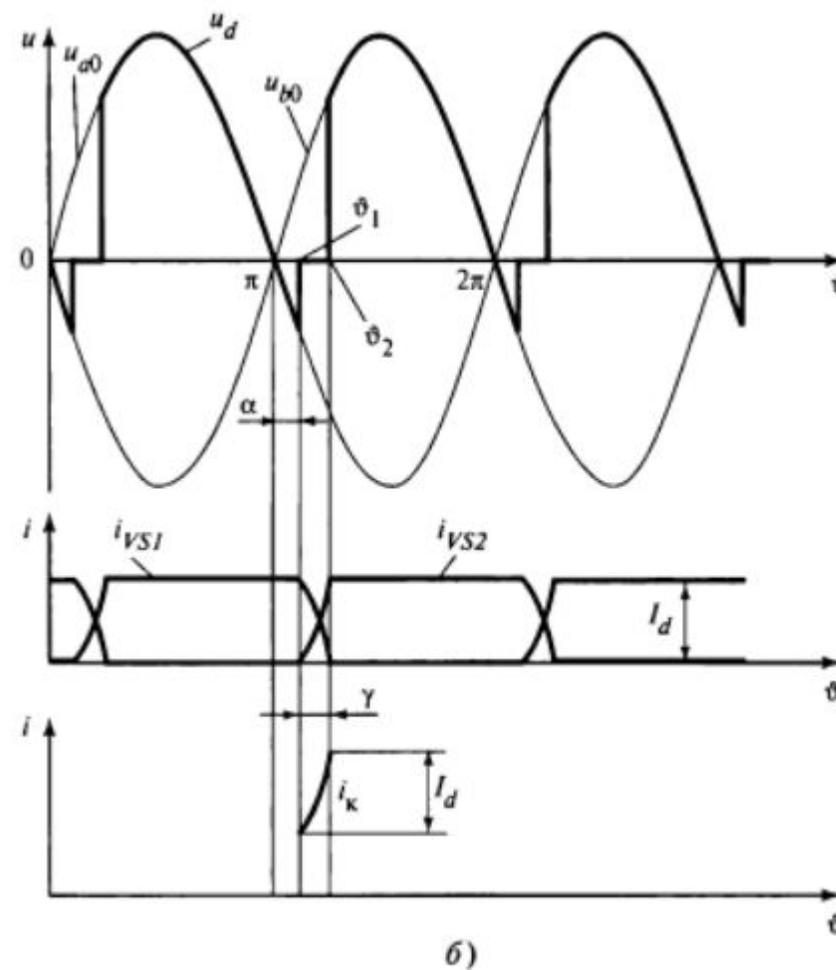
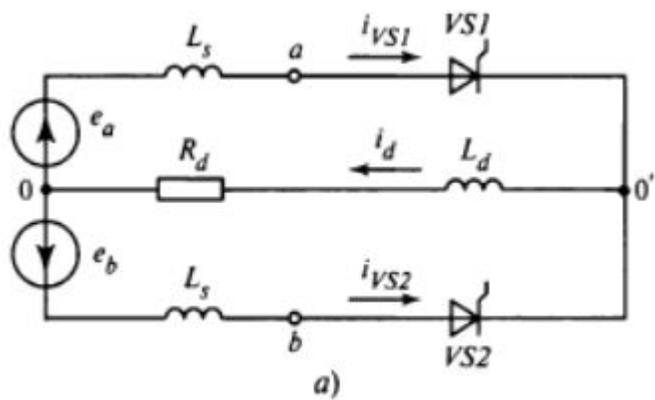
5.2.3 Характеристики выпрямителей

Уменьшение пульсаций напряжения и искажений входного тока



5.2.3 Характеристики выпрямителей

Коммутация токов в выпрямителях



5.2.3 Характеристики выпрямителей

Внешние характеристики выпрямителей

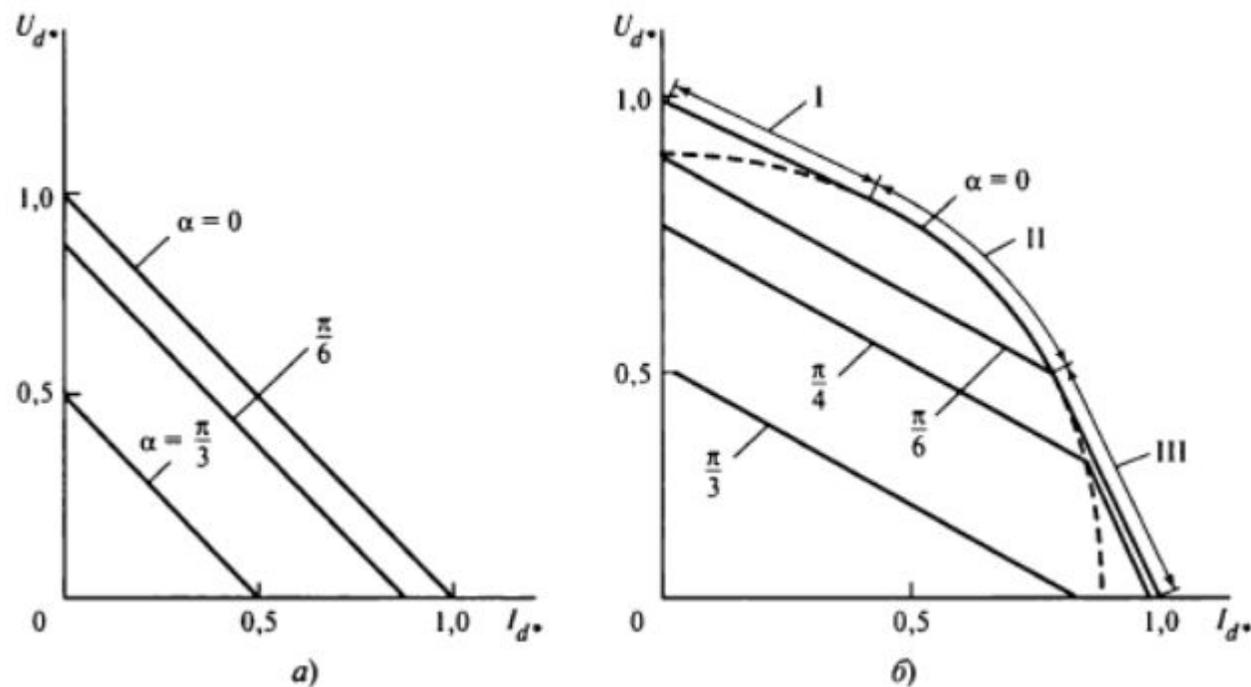


Рис. 5.27. Внешние характеристики выпрямителей:

a — однофазного двухполупериодного или мостового; *б* — трехфазного мостового;
 I, II, III — области режимов работы

5.2.3 Характеристики выпрямителей

Энергетические характеристики выпрямителей

КПД определяется из следующего соотношения:

$$\eta = \frac{U_d I_d}{U_d I_d + \Delta P_{\tau} + \Delta P_{VS} + \Delta P_{всп}}$$

Потребляемая мощность выпрямителем:

$$P = U_c I_{c1} \cos \varphi_1,$$

5.2.3 Характеристики выпрямителей

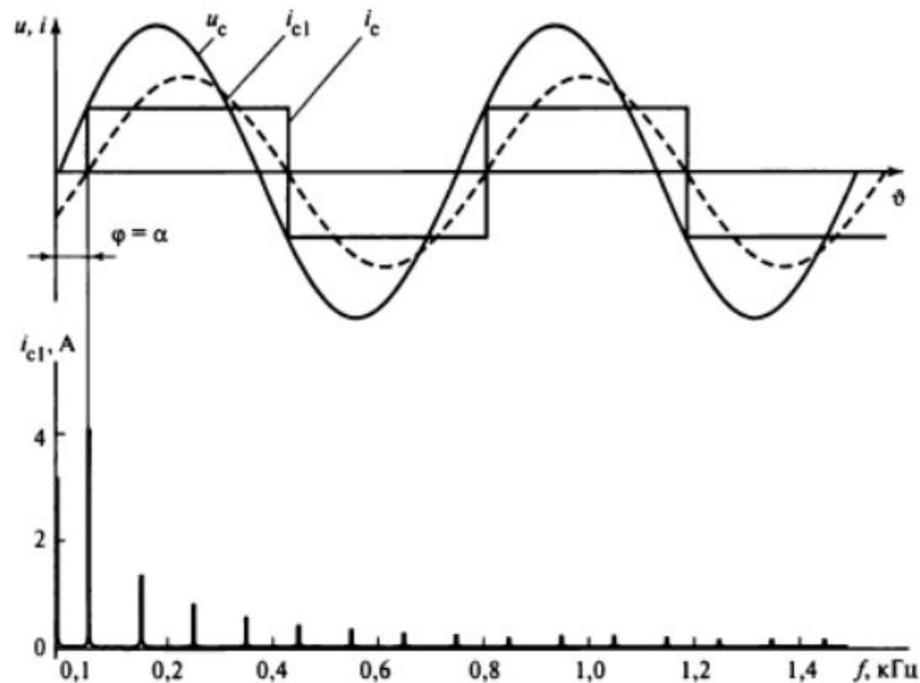
Энергетические характеристики выпрямителей

Полная мощность выпрямителя:

$$S = U_c I_c = U_c \sqrt{I_{c1}^2 + \sum_{n=3}^{\infty} I_{cn}^2},$$

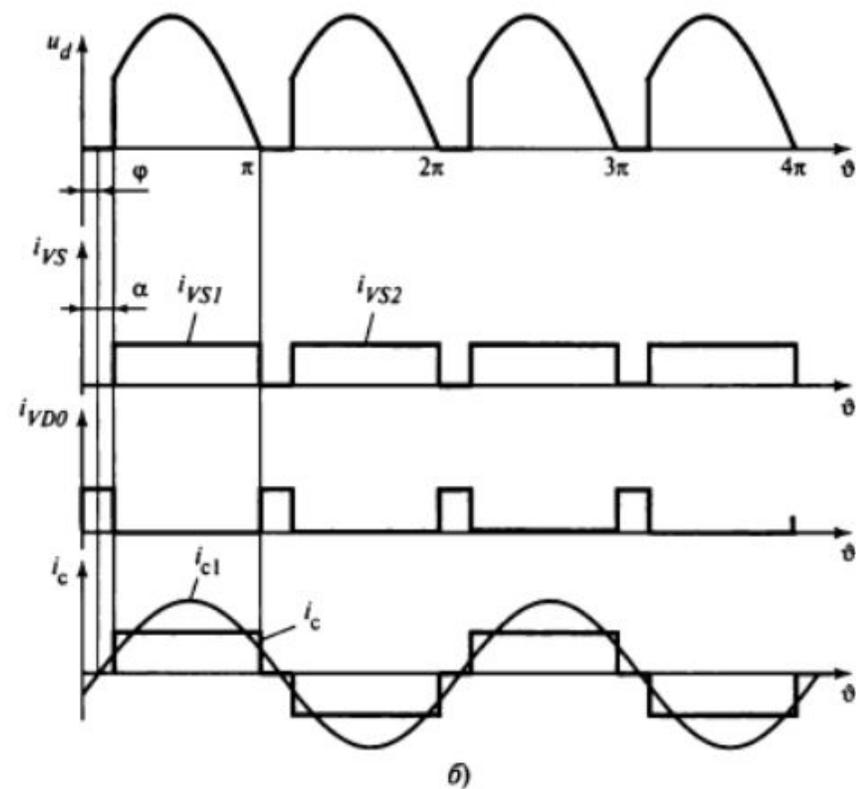
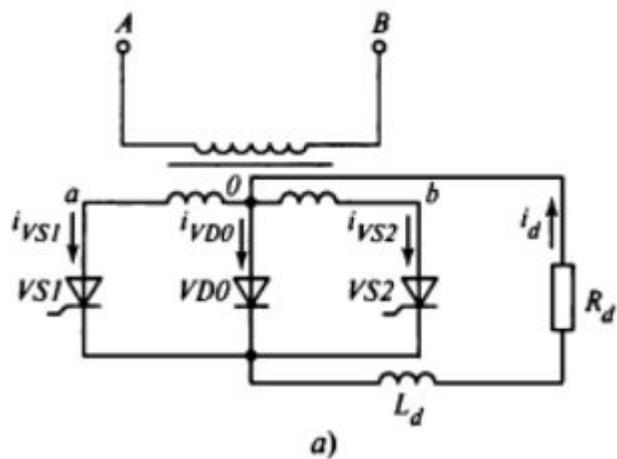
Коэффициент мощности выпрямителя:

$$\chi = \frac{P}{S} = \frac{I_{c1} \cos \varphi_1}{\sqrt{I_{c1}^2 + \sum_{n=3}^{\infty} I_{cn}^2}}.$$



5.2.3 Характеристики выпрямителей

Традиционные способы улучшения коэффициента мощности



5.1. Общие сведения

5.2. Выпрямители

5.3. Инверторы ведомые сетью

5.4. Прямые преобразователи частоты с естественной коммутацией тиристоров

5.5. Тиристорные регуляторы напряжения переменного тока с естественной коммутацией

5.3.1 Принцип действия инвертора ведомого сетью

Инвертирование — это преобразование электроэнергии постоянного тока в энергию переменного тока.

Преобразователь, передающий энергию от источника постоянного тока в сеть переменного тока, называется **инвертором, ведомым сетью** так как коммутация его вентилей осуществляется под действием переменного напряжения внешней сети или **зависимым инвертором** так как его электрические параметры полностью определяются параметрами внешней сети переменного тока

5.3.1 Принцип действия инвертора ведомой сетью

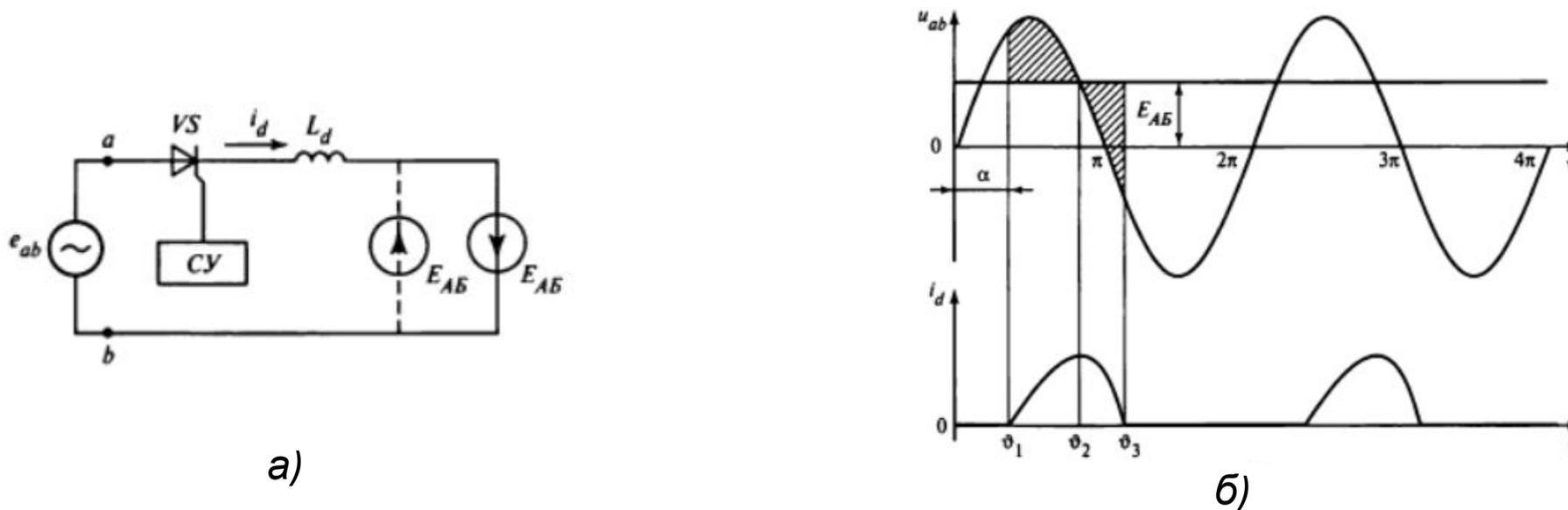


Рис. 5.30 Однополупериодный обратный преобразователь; а) Схема; б) диаграммы напряжения и тока в выпрямительном режиме.

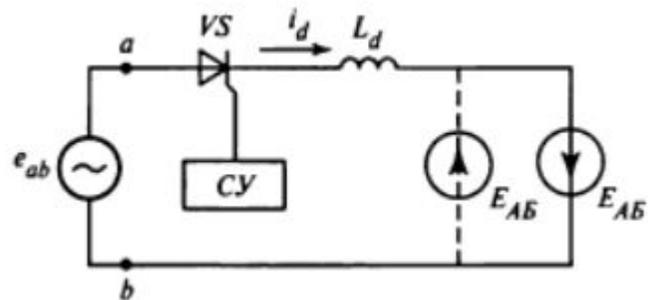
При подаче импульса управления – α , в момент времени u_1 , тиристор включается. Батарея АБ заряжается током i_d . Благодаря L_d ток i_d :

- увеличиваться, при $u_{ab} > U_d$,
- уменьшаться при $U_d > u_{ab}$.

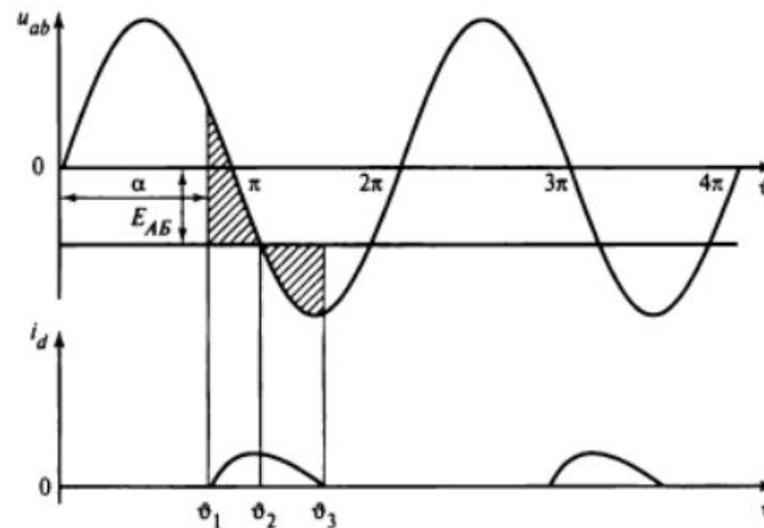
В момент времени u_3 (заштрихованные площади равны) на рис. 5.30, б), ток $i_d=0$, а тиристор VS выключается.

Ток i_d направлен навстречу ЭДС E_{AB} – Зарядка АБ

5.3.1 Принцип действия инвертора ведомой сетью



а)



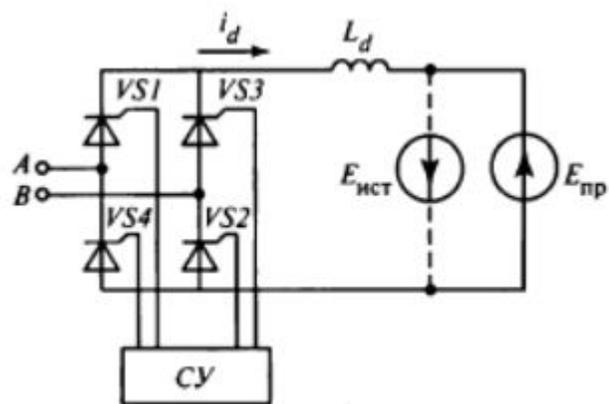
б)

Рис. 5.30 Однополупериодный обратный преобразователь; а) Схема; б) диаграммы напряжения и тока в инверторном режиме.

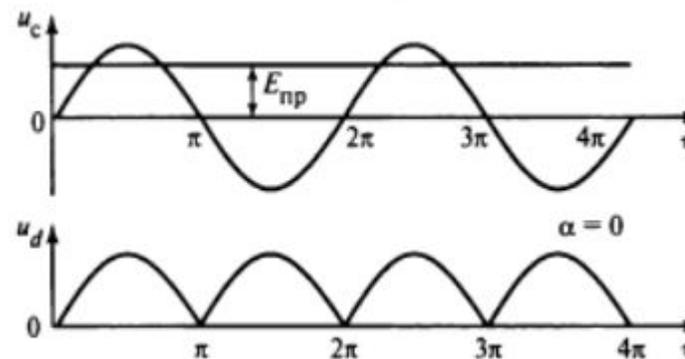
При подаче импульса управления – α , в момент времени u_1 , тиристор включается так как к нему приложено положительное прямое напряжение. Напряжение $|u_{ab}| > |E_{ab}|$. Под воздействием разности напряжений $U_{ab} - u_{ab}$ протекает ток i_d противоположный по знаку напряжению сети u_{ab} .

В момент времени u_3 (заштрихованные площади равны) на рис. 5.30, б).

5.3.1 Принцип действия инвертора ведомой сетью



а)



б)

Рис. 5.31 Однофазный мостовой преобразователь; а) Схема; б) диаграмма напряжения при $\alpha = 0$.

ЭДС $E_{пр}$ — пунктирные линии, выпрямительный режим, ЭДС $E_{ист}$ — сплошная линия инверторный режим

5.3.1 Принцип действия инвертора ведомого сетью

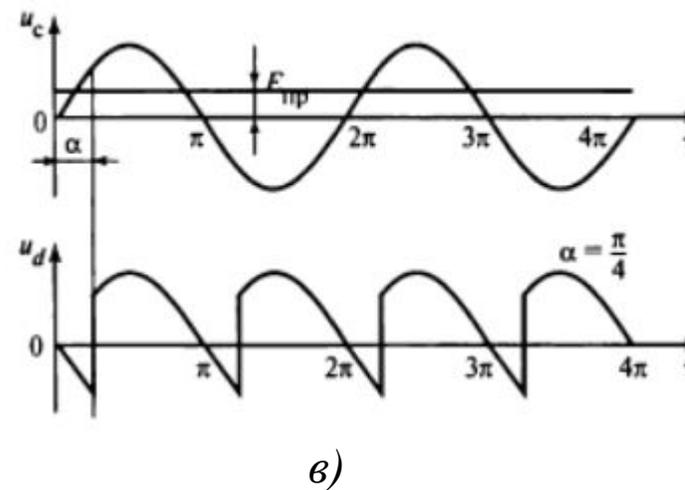
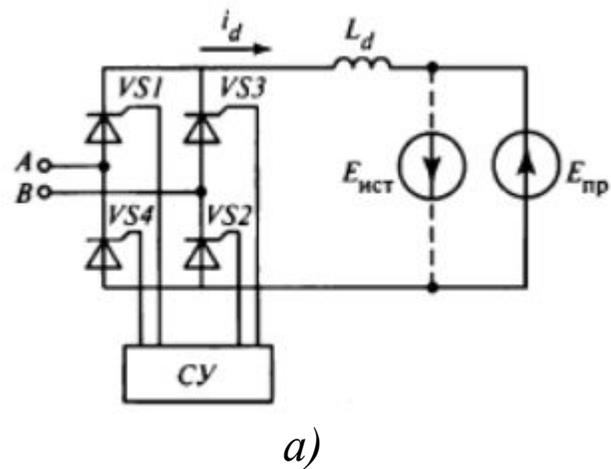


Рис. 5.31 Однофазный мостовой преобразователь; а) Схема; б) диаграмма напряжения при $\alpha = \pi/4$.

5.3.1 Принцип действия инвертора ведомого сетью

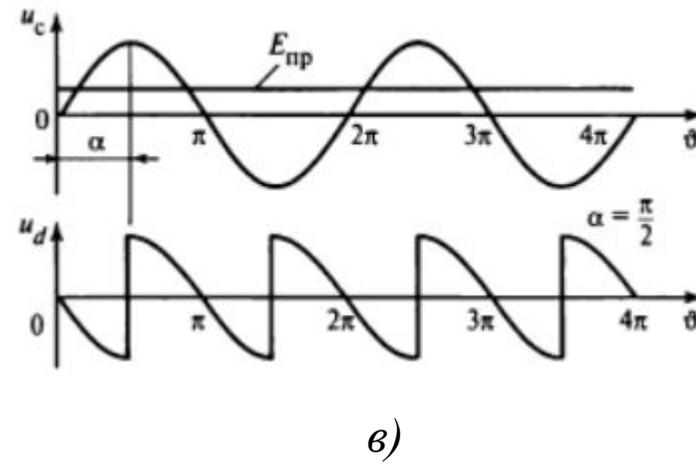
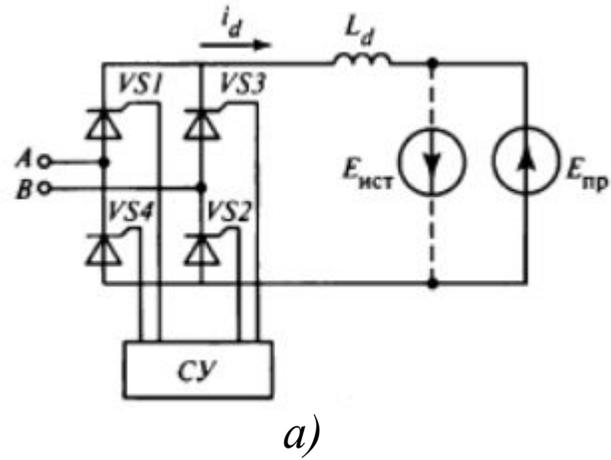
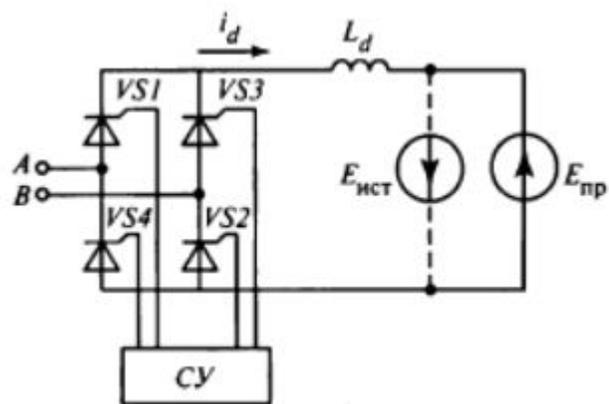
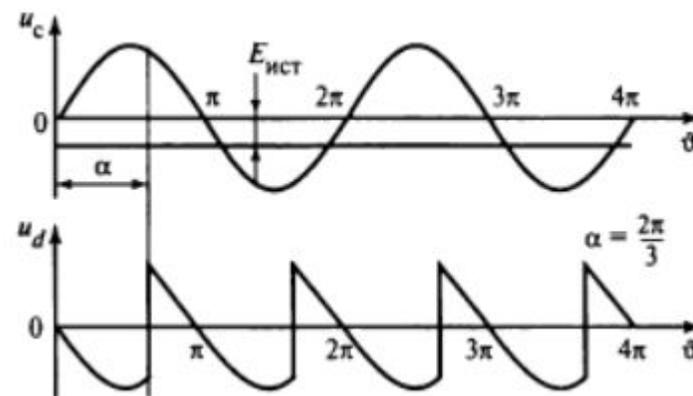


Рис. 5.31 Однофазный мостовой преобразователь; а) Схема; б) диаграмма напряжения при $\alpha = \pi/2$.

5.3.1 Принцип действия инвертора ведомого сетью



а)



б)

Рис. 5.31 Однофазный мостовой преобразователь; а) Схема; б) диаграмма напряжения при $\alpha = 2\pi/3$.

5.3.1 Принцип действия инвертора ведомого сетью

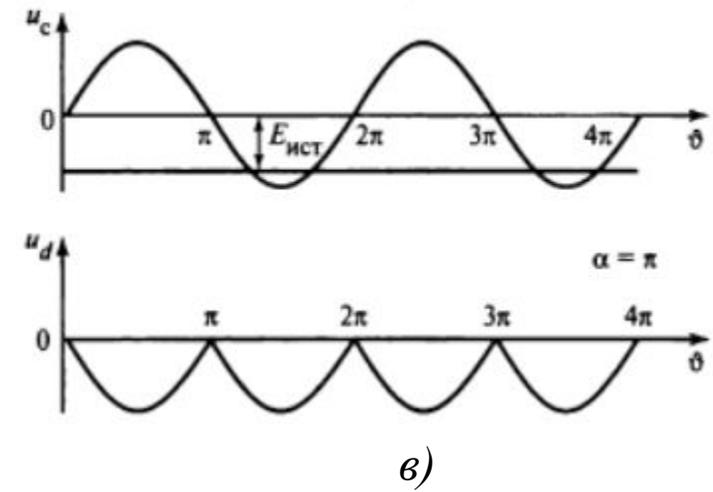
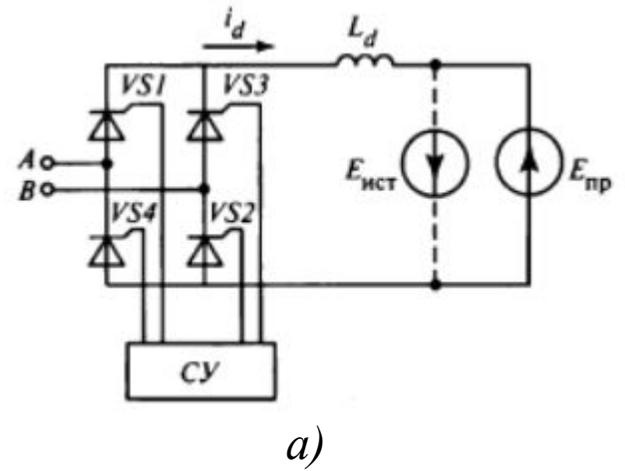


Рис. 5.31 Однофазный мостовой преобразователь; а) Схема; б) диаграмма напряжения при $\alpha = \pi$.

5.3.1 Принцип действия инвертора ведомого сетью

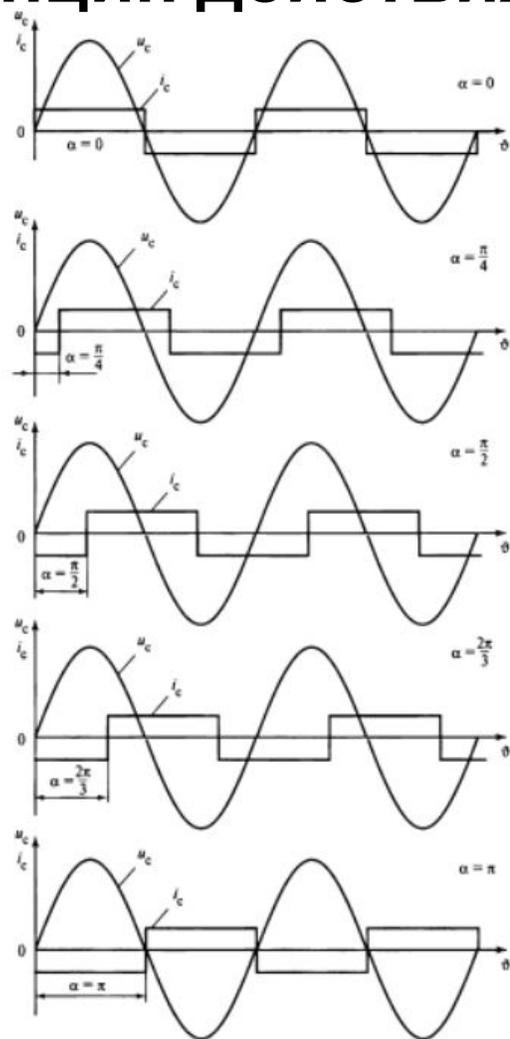


Рис. 5.32 Диаграмма тока и напряжения сети.

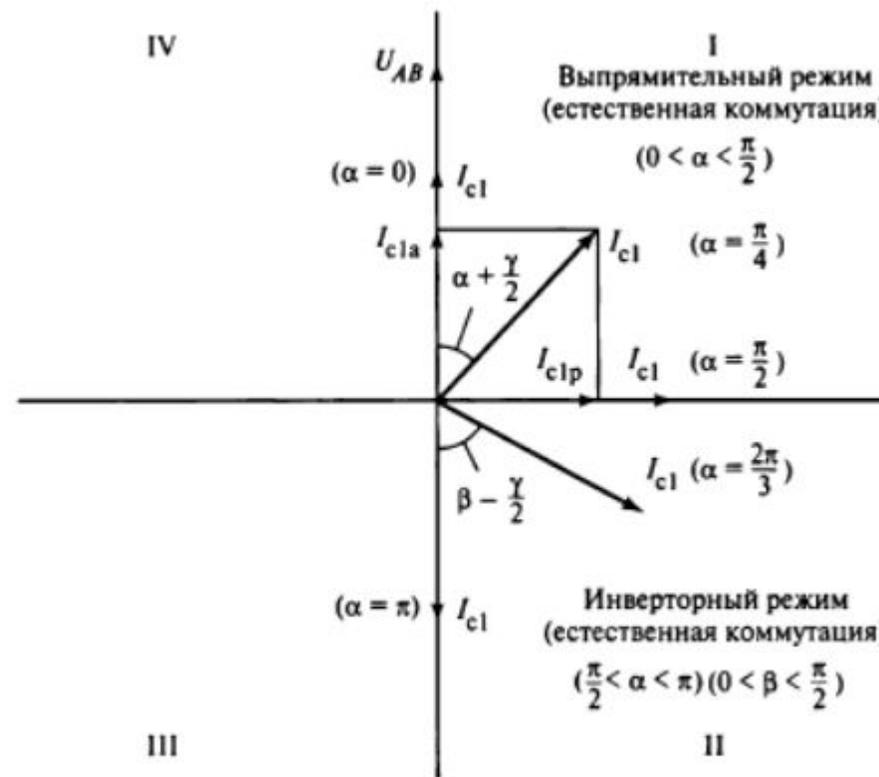
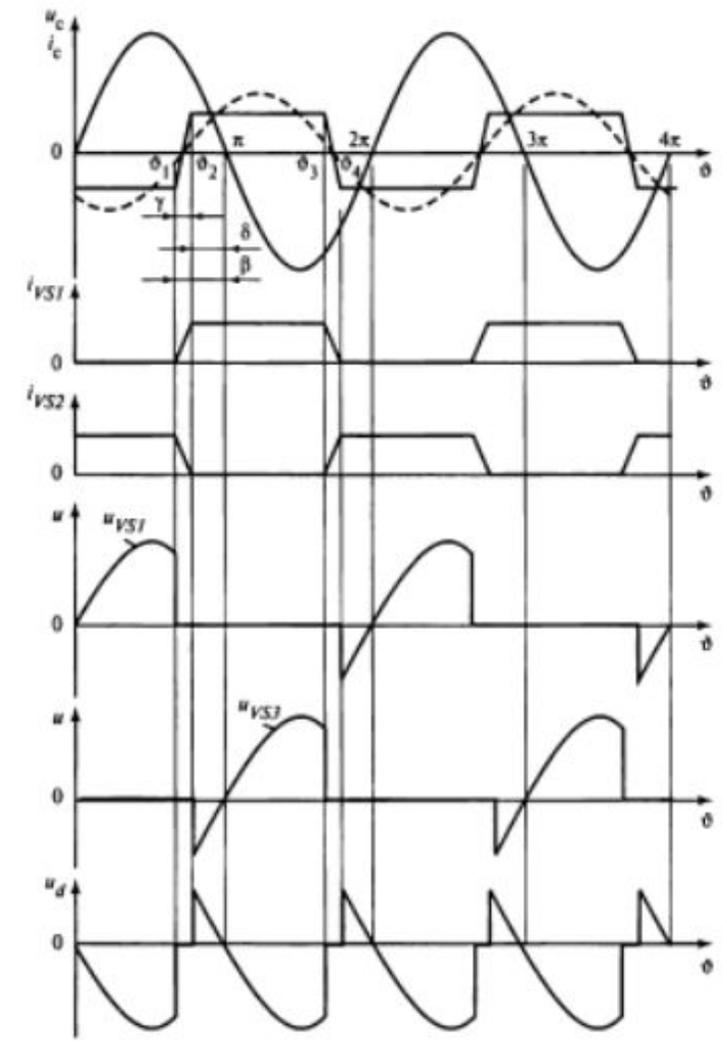
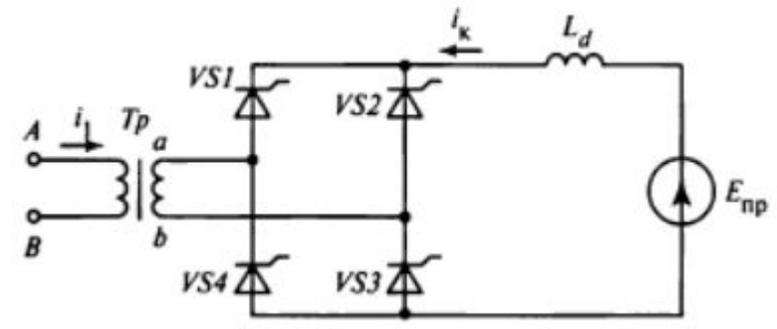


Рис. 5.33 Векторная диаграмма.

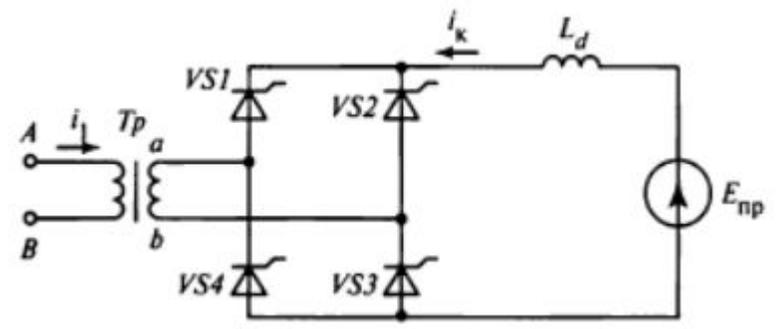
5.3.2 Работа основных схем в инверторном режиме

Однофазный мостовой инвертор

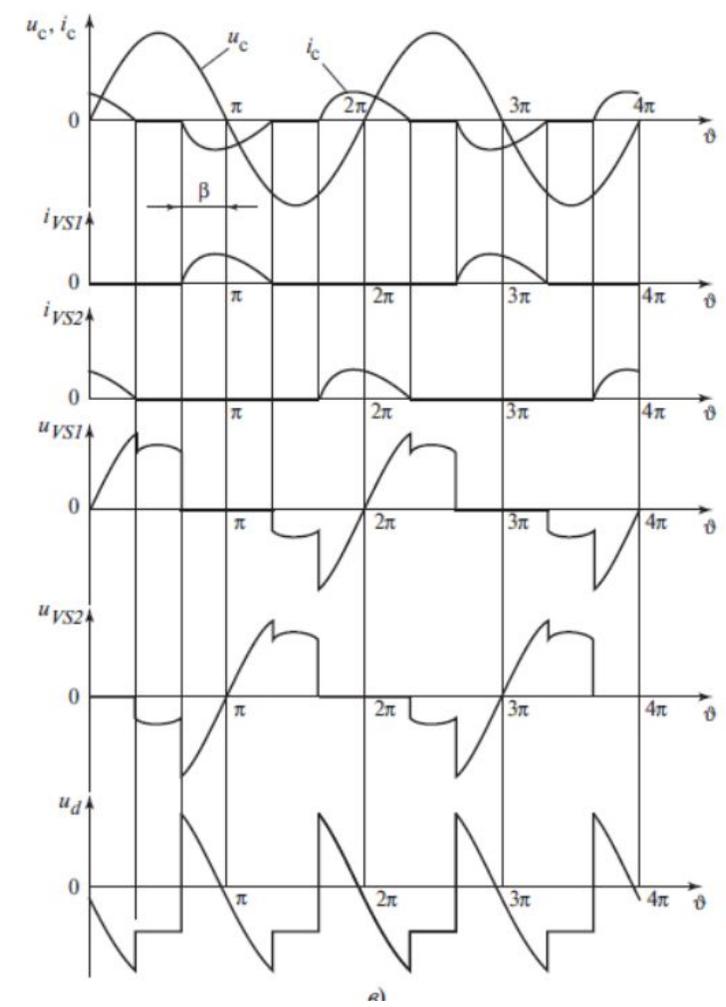


5.3.2 Работа основных схем в инверторном режиме

Однофазный мостовой инвертор

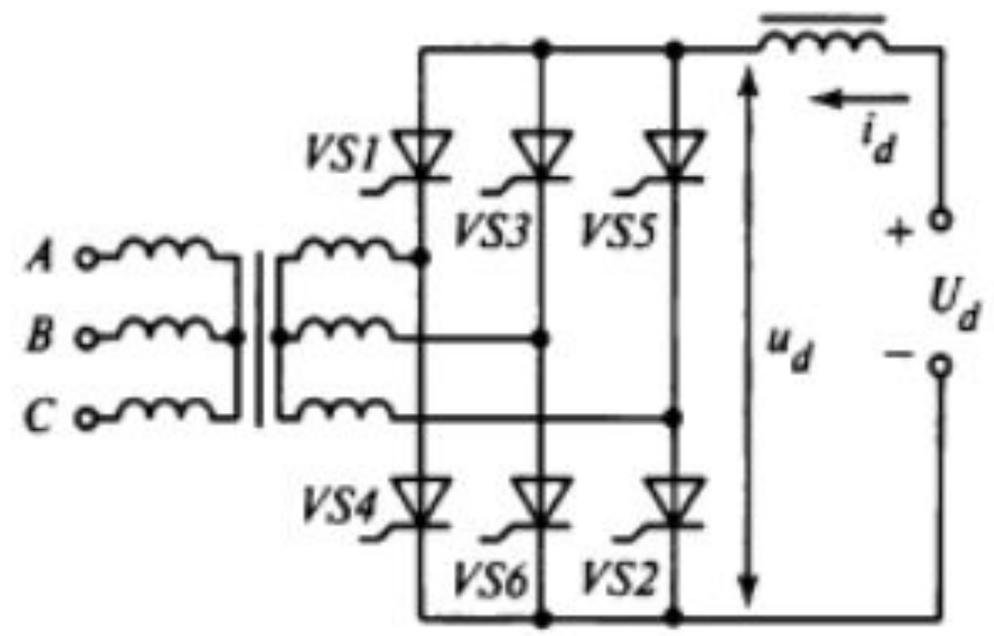


$$U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{ab} \cos \beta.$$



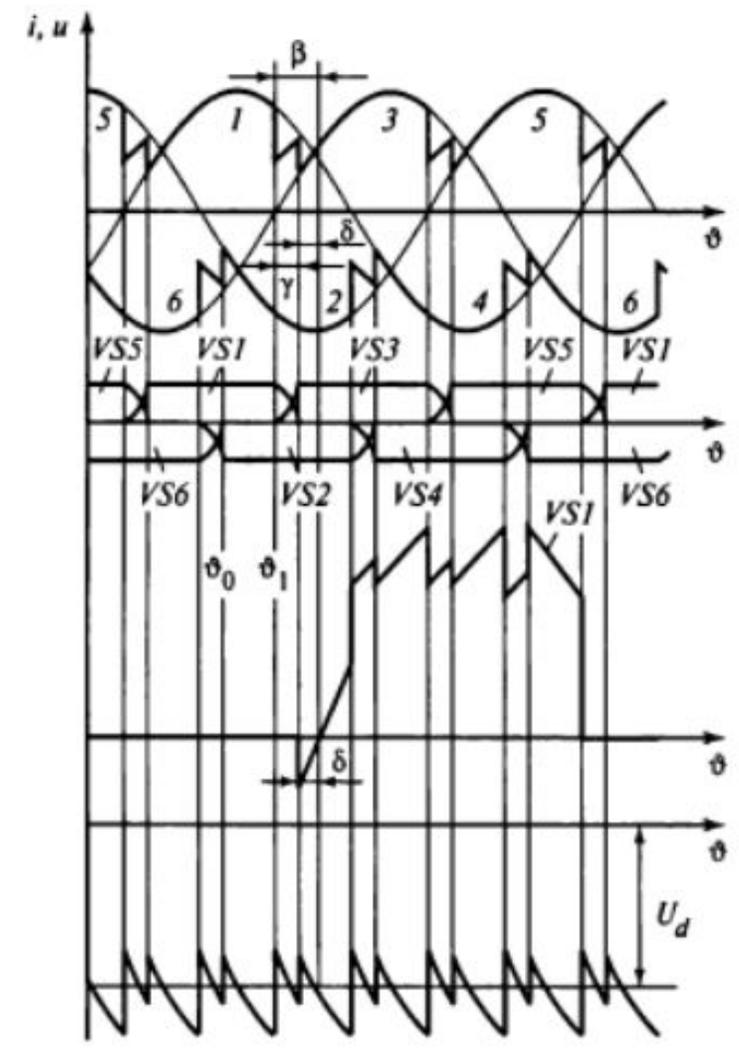
5.3.2 Работа основных схем в инверторном режиме

Трёхфазный мостовой инвертор



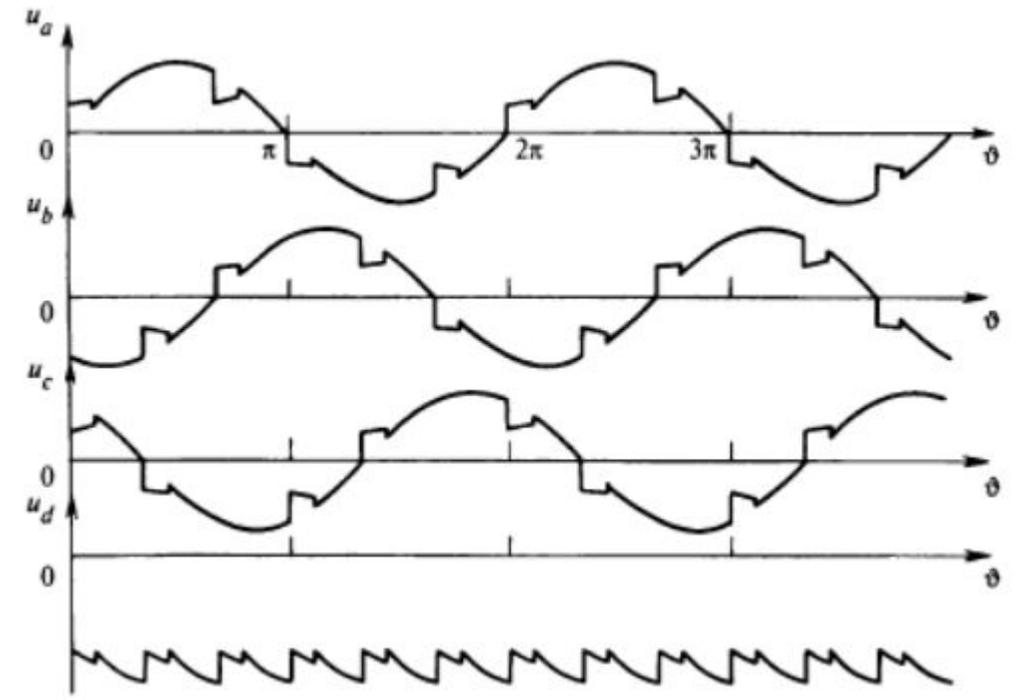
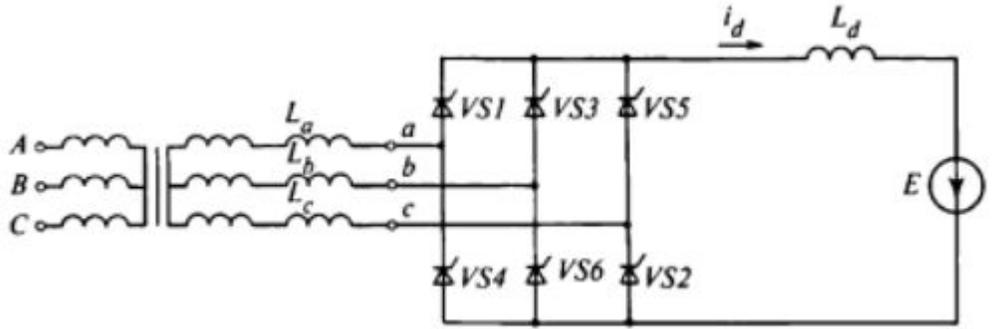
$$\Delta S_1 = \frac{X_s}{2} I_d; \quad \Delta S_2 = 2X_s I_d; \quad X_s = -\omega L_s.$$

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_\phi \cos \beta.$$



5.3.2 Работа основных схем в инверторном режиме

Трёхфазный мостовой инвертор



5.3.3 Мощность инвертора, ведомого сетью

Активная мощность, потребляемая инвертором от источника **постоянного тока**:

$$P = U_d I_d,$$

Активная мощность, на стороне **переменного тока**:

$$P = U_c I_{c1} \cos \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right),$$

Действующие значения первой гармоники **тока в сети**:

$$I_{c1} = I_d \frac{U_d}{U_c \cos \varphi_1}, \quad \cos \varphi_1 \approx \cos \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right)$$

Реактивная мощность первой гармоники тока, генерируемого сетью в инвертор:

$$Q = U_c I_{c1} \sin \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right) = P \operatorname{tg} \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right)$$

5.3.3 Мощность инвертора, ведомого сетью

Высшие гармоники тока, в однофазной схеме со средней точкой при $\omega Ld = \infty$:

$$i_c = \frac{4I}{\pi} \left(\sin \vartheta + \frac{1}{3} \sin 3\vartheta + \frac{1}{5} \sin 5\vartheta + \dots \right)$$

Полная мощность инвертора на стороне переменного тока:

$$S = U_c I_c = U_c \sqrt{I_{c1}^2 + \sum_{n=3}^{\infty} I_{cn}^2}$$

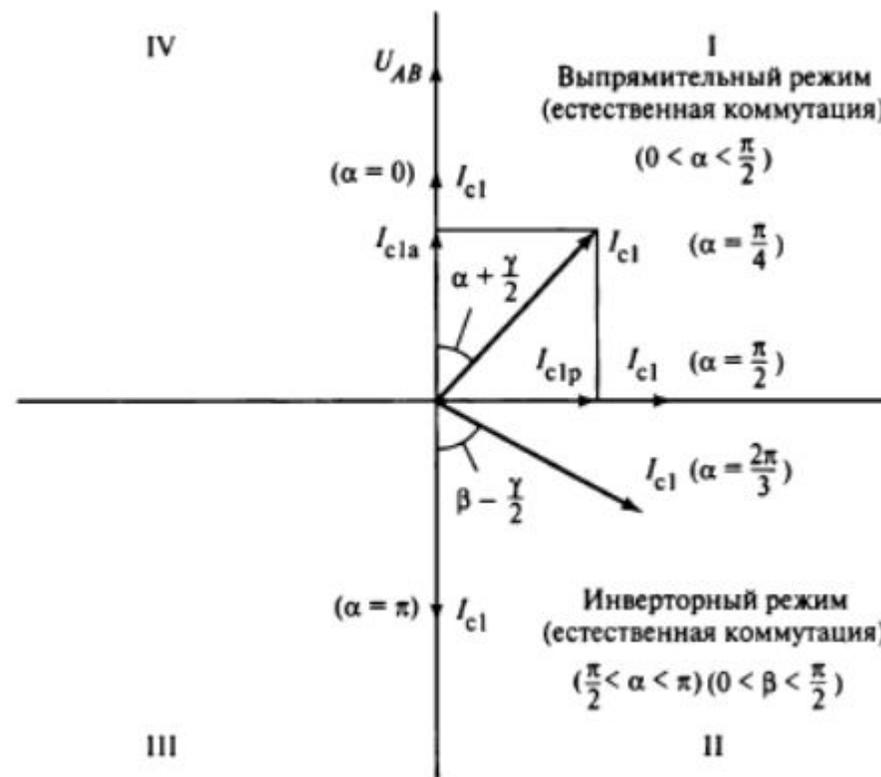
Коэффициент мощности инвертора, с учетом высших гармоник:

$$\chi = \frac{P}{S} \cong v \cos \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right)$$

5.3.3 Мощность инвертора, ведомого сетью

Область I соответствует изменению угла управления α от 0 до $\pi/2$, или выпрямительному режиму работы с потреблением из сети реактивной мощности

Область II соответствует изменению угла α от $\pi/2$ до π (угол β от 0 до $\pi/2$), или инверторному режиму с генерацией в сеть реактивной мощности.



3.3.4 Основные характеристики инверторов, ведомых сетью



Входная характеристика представляет собой зависимость среднего значения входного напряжения инвертора U_d от среднего значения входного тока I_d :

$$U_d = U_{d0} + \Delta U.$$

U_{d0} - напряжение холостого хода

ΔU - среднее значение падения напряжения на интервалах коммутации

3.3.4 Основные характеристики инверторов, ведомых сетью



Входная характеристика:

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 \cos \beta + \frac{I_d x_s}{\pi}$$

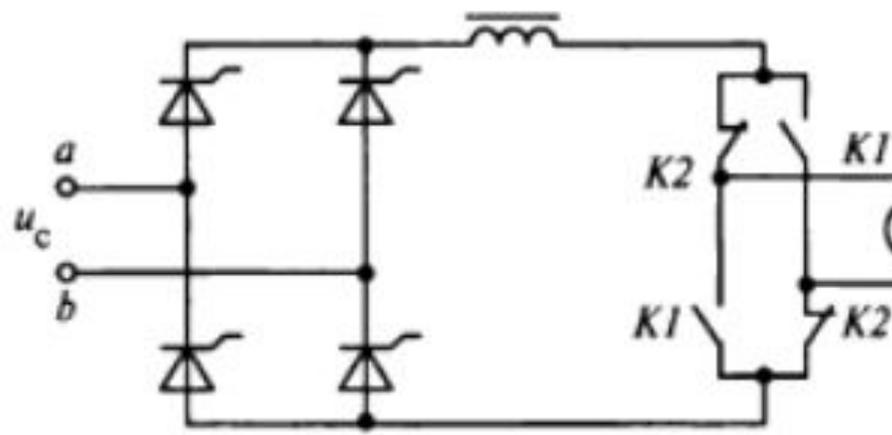
Ограничительная характеристика предельно допустимая нагрузка инвертора:

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 \cos \delta_{\min} + \frac{I_d x_s}{\pi}$$

Регулировочная характеристика напряжения на шинах постоянного тока преобразователей при $I_d = 0$ (т.е. при холостом ходе)



3.3.4 Основные характеристики инверторов, ведомых сетью



5.1. Общие сведения

5.2. Выпрямители

5.3. Инверторы ведомые сетью

5.4. Прямые преобразователи частоты с естественной коммутацией тиристорov

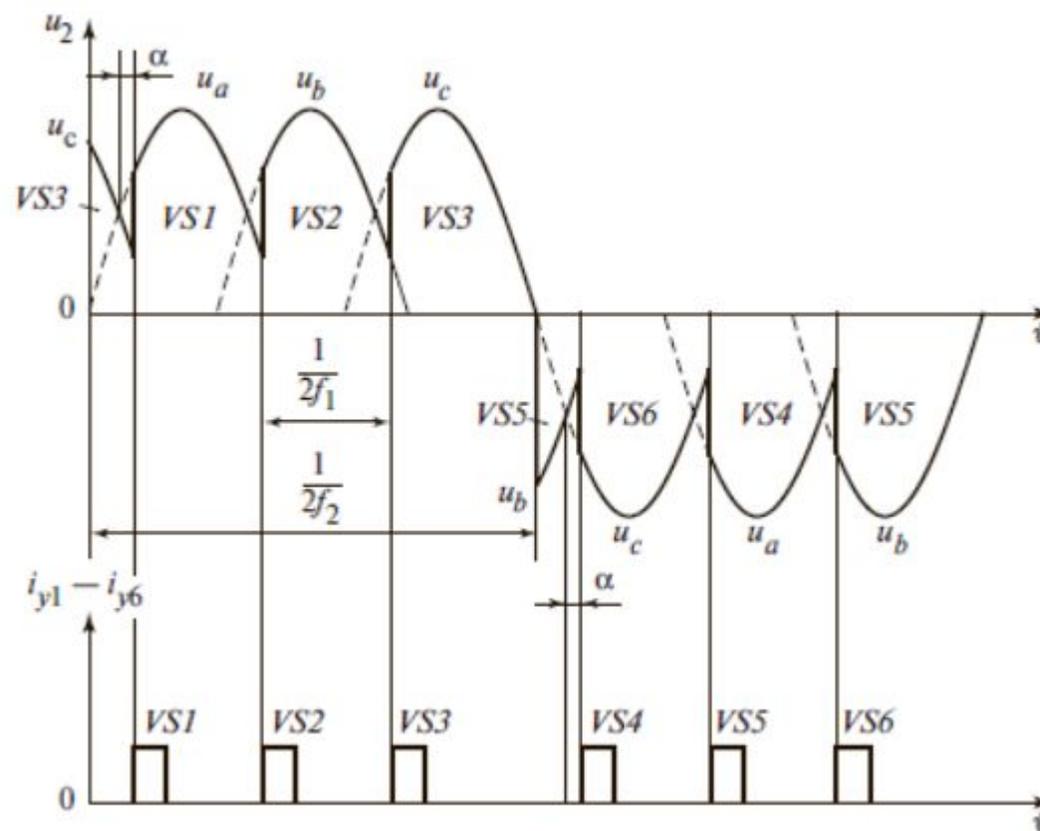
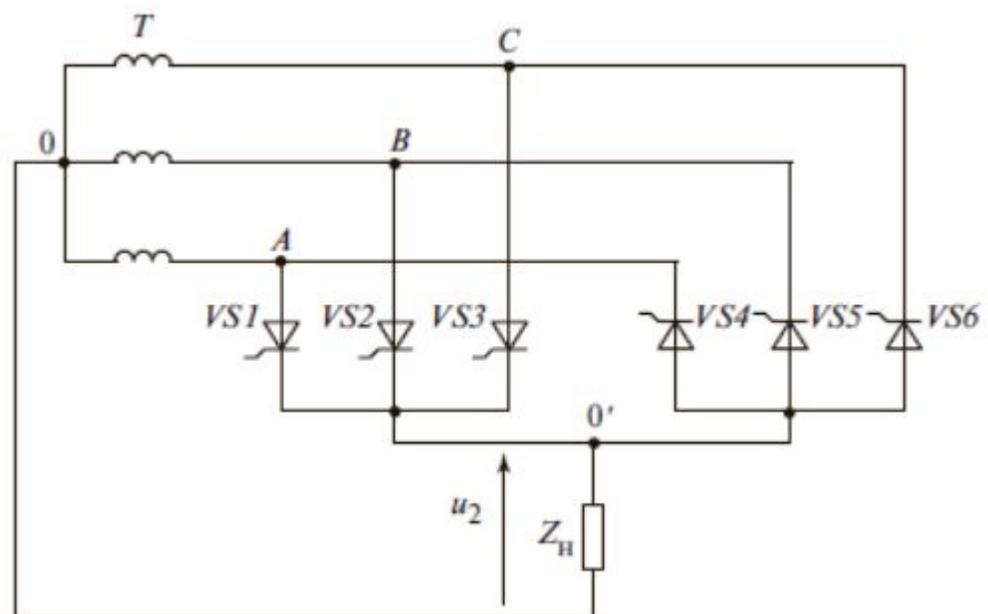
5.5. Тиристорные регуляторы напряжения переменного тока с естественной коммутацией

3.4.1 Принцип прямого преобразования частоты тиристорными преобразователями

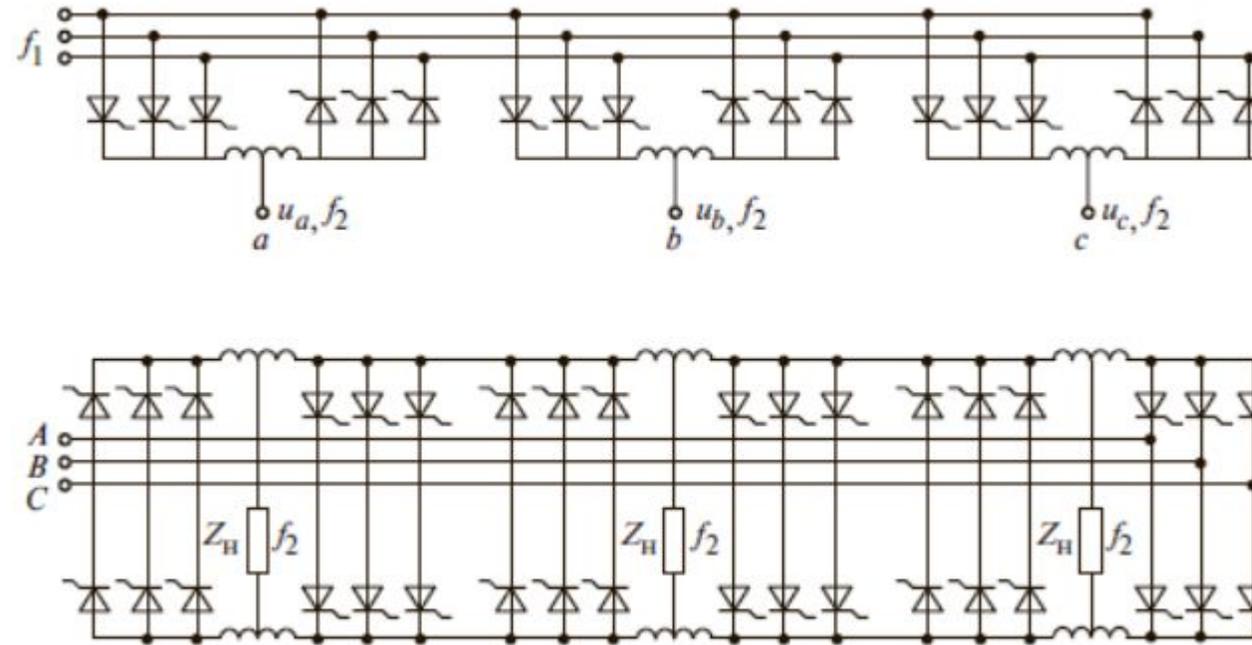


Преобразованием частоты называют процесс преобразования переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты. Прямые преобразователи частоты, т.е. с однократным преобразованием электроэнергии, называют **преобразователями с непосредственной связью** или **циклоконвертерами**.

3.4.1 Принцип прямого преобразования частоты тиристорными преобразователями



3.4.1 Принцип прямого преобразования частоты тиристорными преобразователями



$$f_2 = \frac{mf_1}{2+m}, \quad f_2 = \frac{f_1 m \pi}{\pi(n+m) + \varphi_n m}$$

5.4.2 Уменьшение искажений выходного напряжения преобразователя частоты

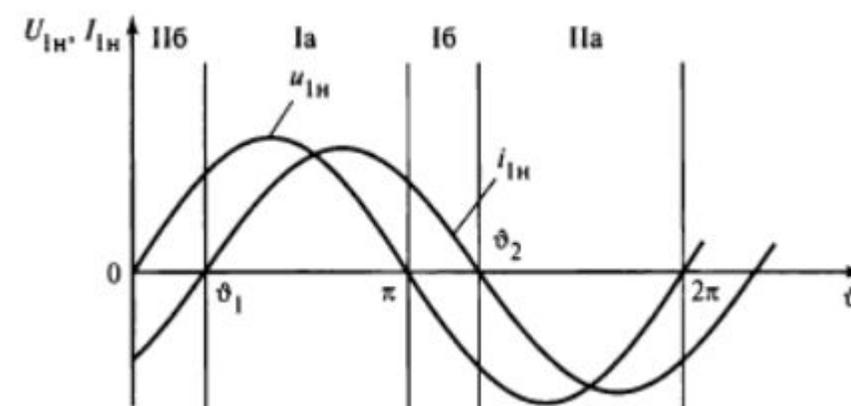
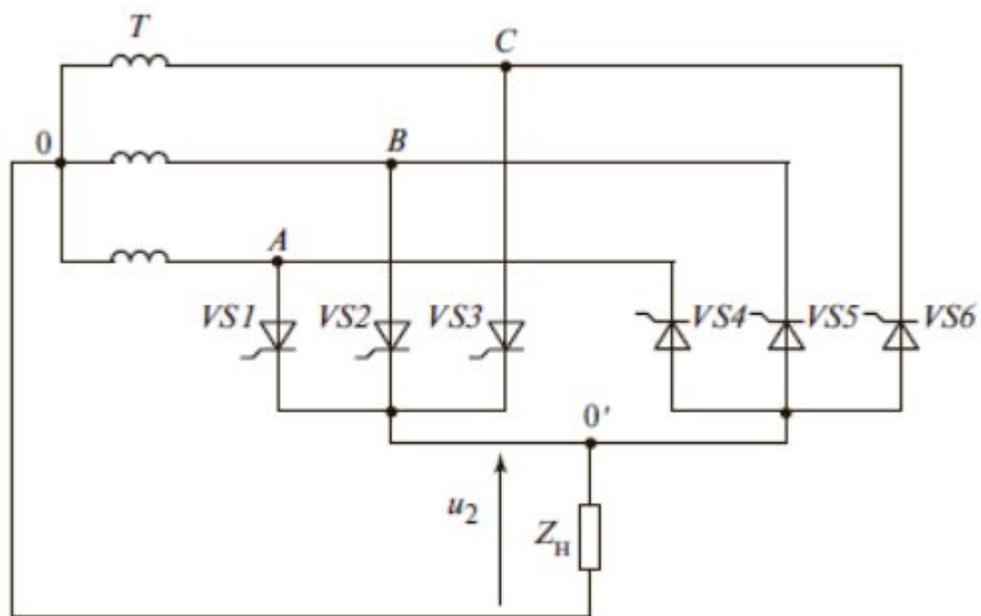
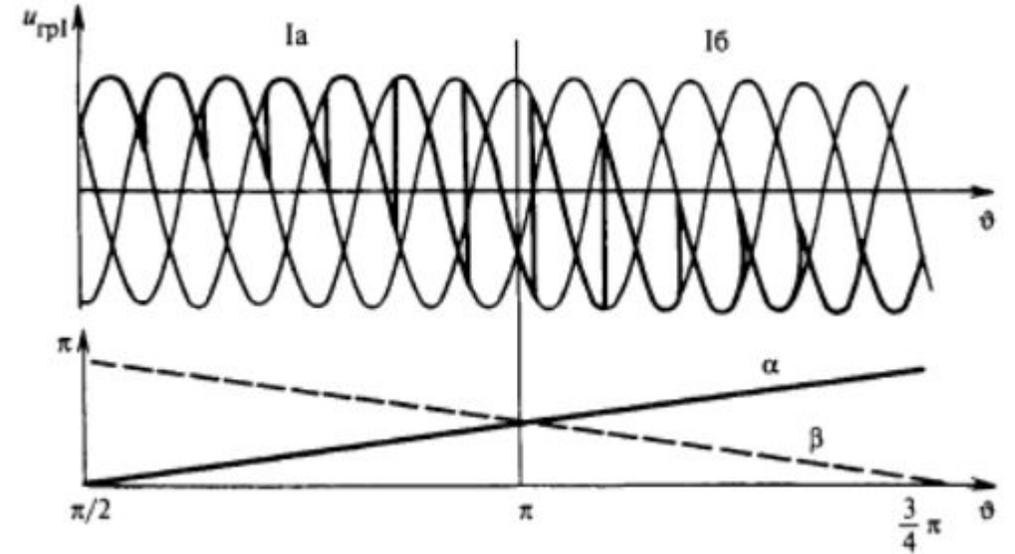
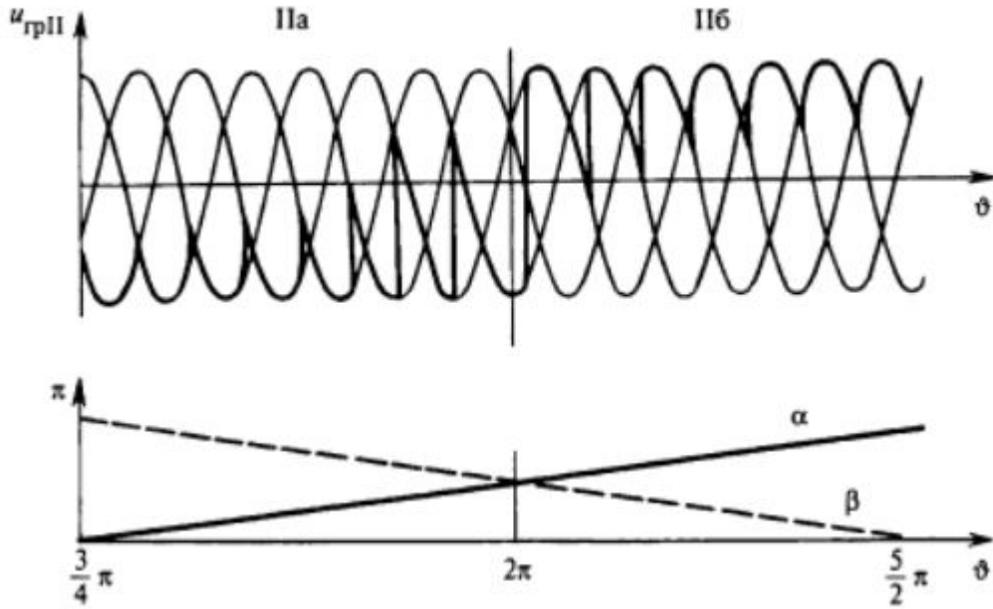


Рис. 3.1 Обобщенная модель СЭУ;

5.4.2 Уменьшение искажений выходного напряжения преобразователя частоты



$$\alpha = \pi - \beta = \arccos(k \sin \omega_2 t)$$

5.4.2 Уменьшение искажений выходного напряжения преобразователя частоты

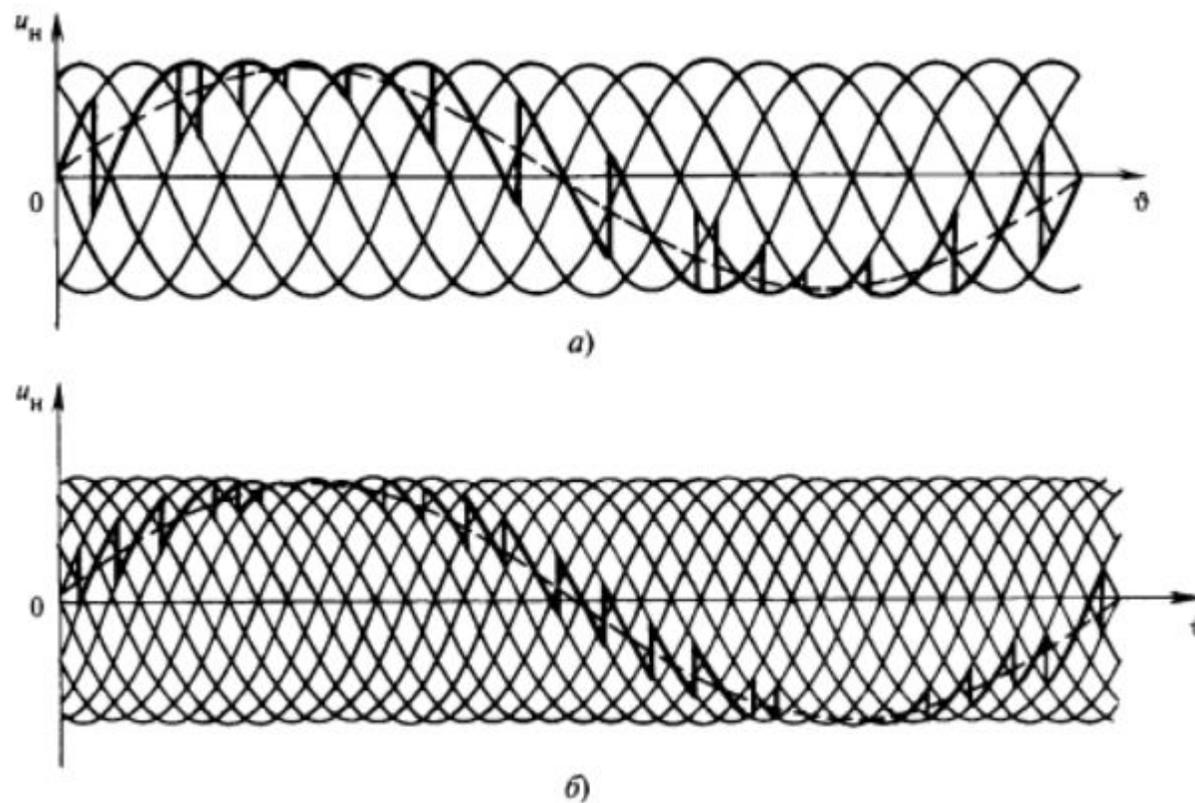


Рис. 3.1 Обобщенная модель СЭУ;

5.1. Общие сведения

5.2. Выпрямители

5.3. Инверторы ведомые сетью, протекающих в силовых электронных устройствах

5.4. Прямые преобразователи частоты с естественной коммутацией тиристоров

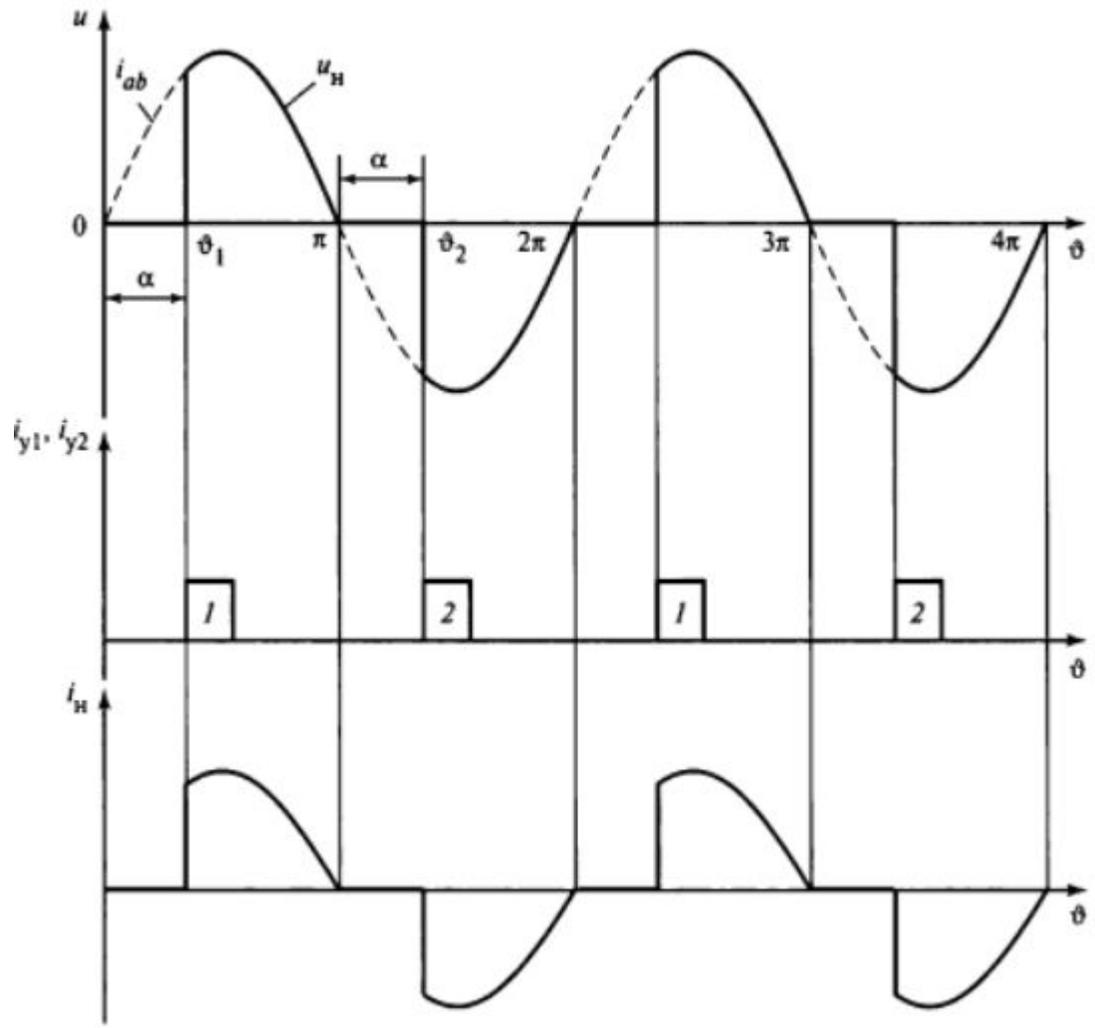
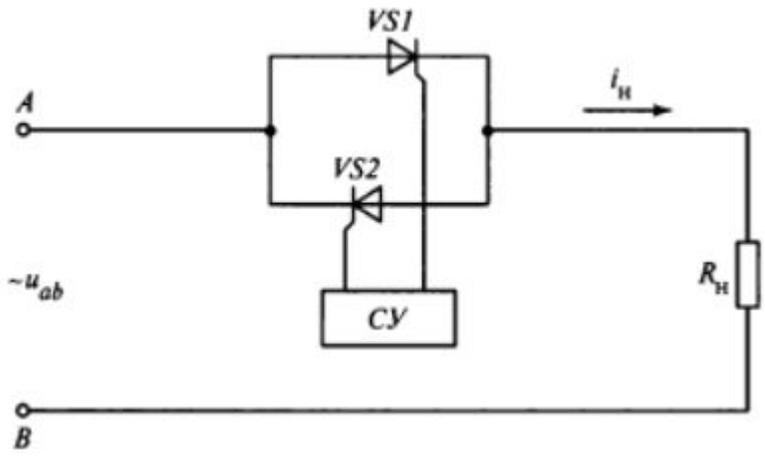
5.5. Тиристорные регуляторы напряжения переменного тока с естественной коммутацией

5.5.1 Общие сведения

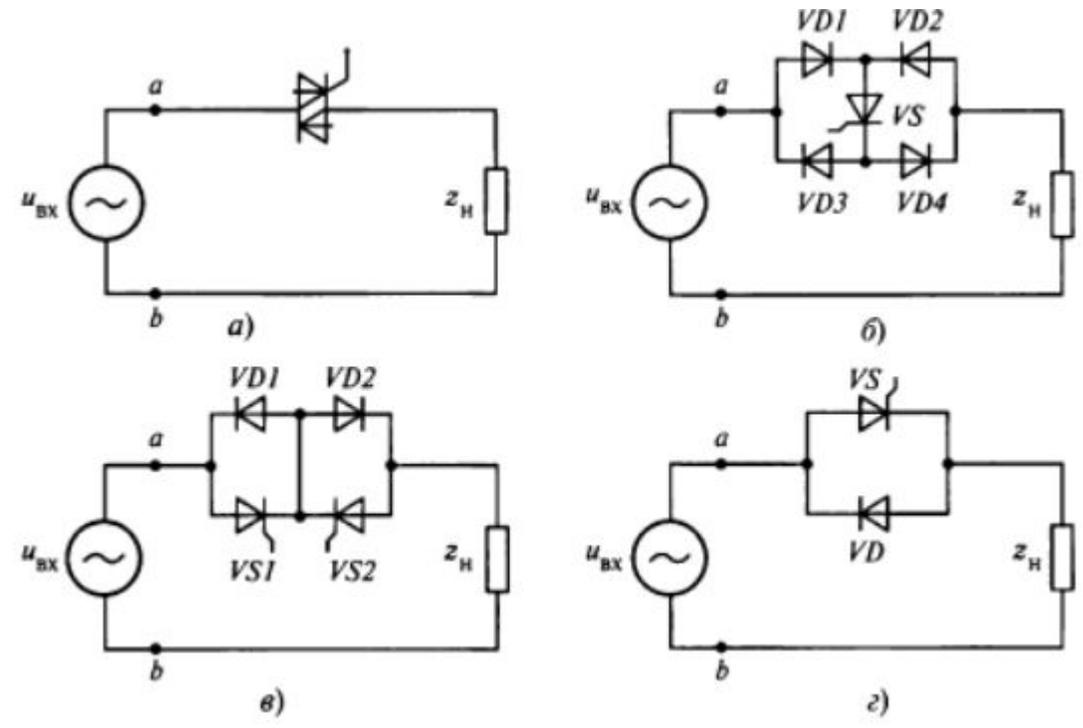


Тиристорные регуляторы переменного тока согласно определению МЭК относятся к устройствам, которые могут работать как прямой преобразователь напряжения переменного тока, выполняя функции регулятора тока, и как электронный коммутационный аппарат.

5.5.1 Общие сведения



5.5.1 Общие сведения



$$U_{н.д} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} U_{ab} \sin \vartheta)^2 d\vartheta} = U_{ab} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}},$$

5.5.2 Основные характеристики регуляторов

Основной характеристикой регулятора является регулировочная характеристика $U_{н.д} = f(\alpha)$ которая зависит от нагрузки.

Активная нагрузка

$$U_{н.д} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} U_{ab} \sin \vartheta)^2 d\vartheta} = U_{ab} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

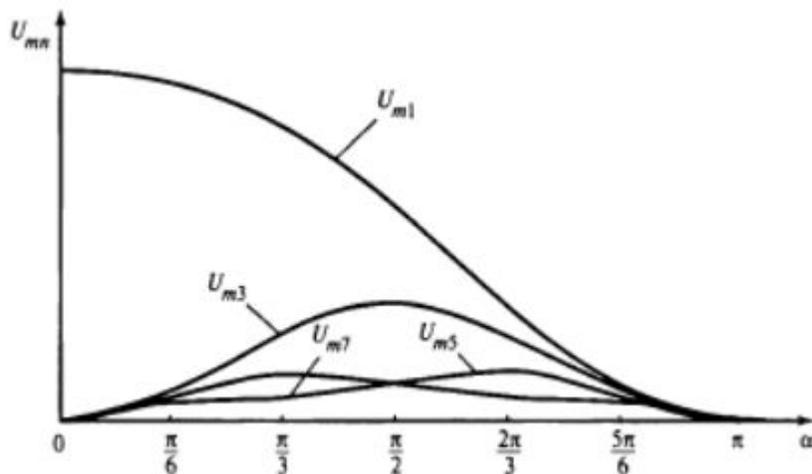


Рис. 5.46. Зависимость амплитуд высших гармоник от угла управления при активной нагрузке

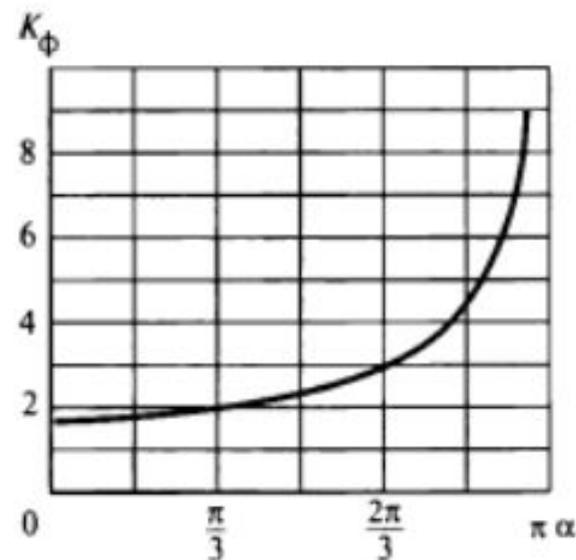
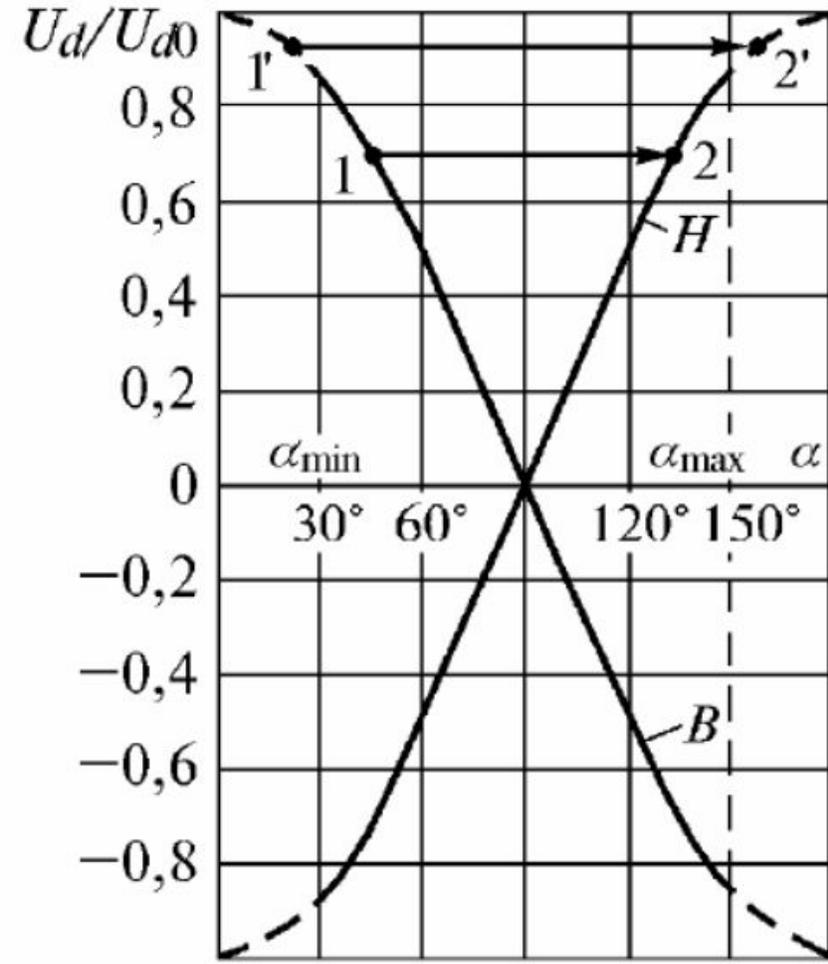
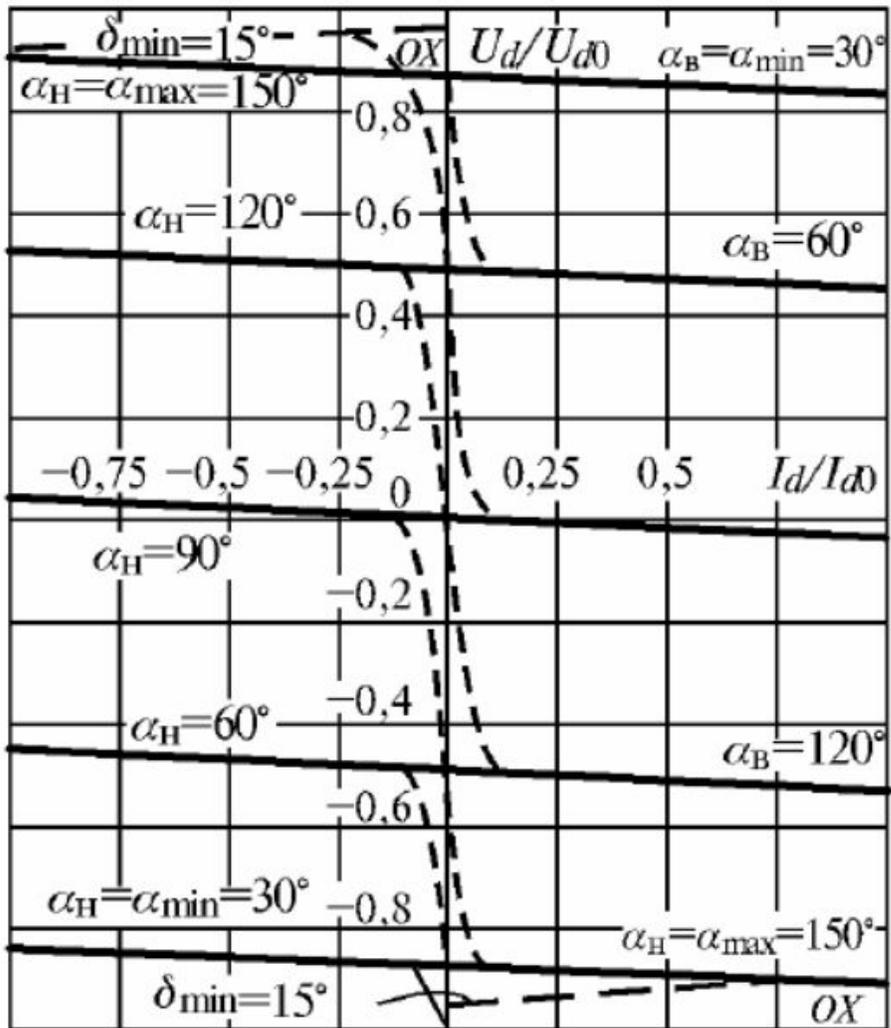


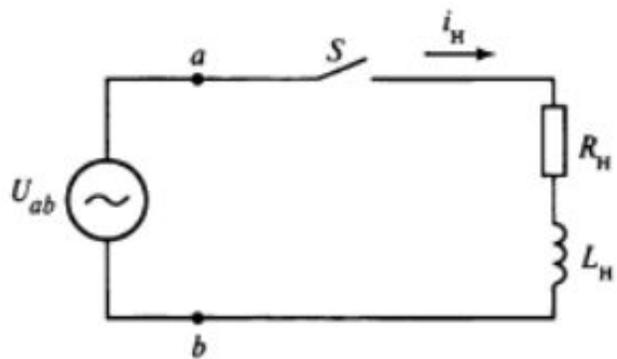
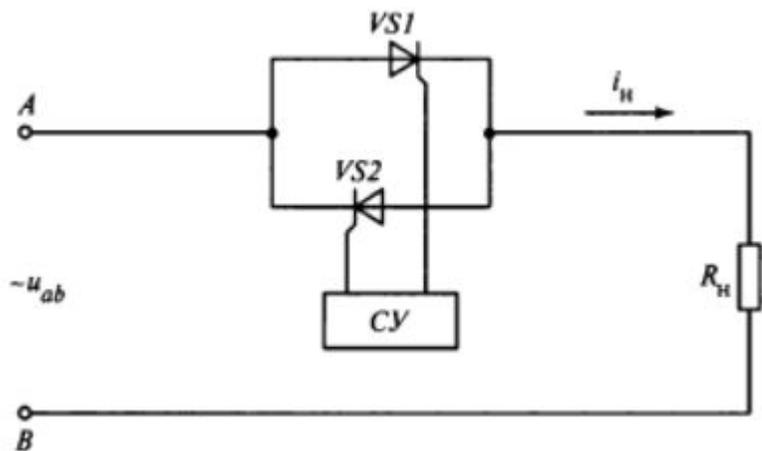
Рис. 5.47. Зависимость коэффициента формы тока тиристора K_f однофазного регулятора от угла управления при активной нагрузке

5.5.2 Основные характеристики регуляторов

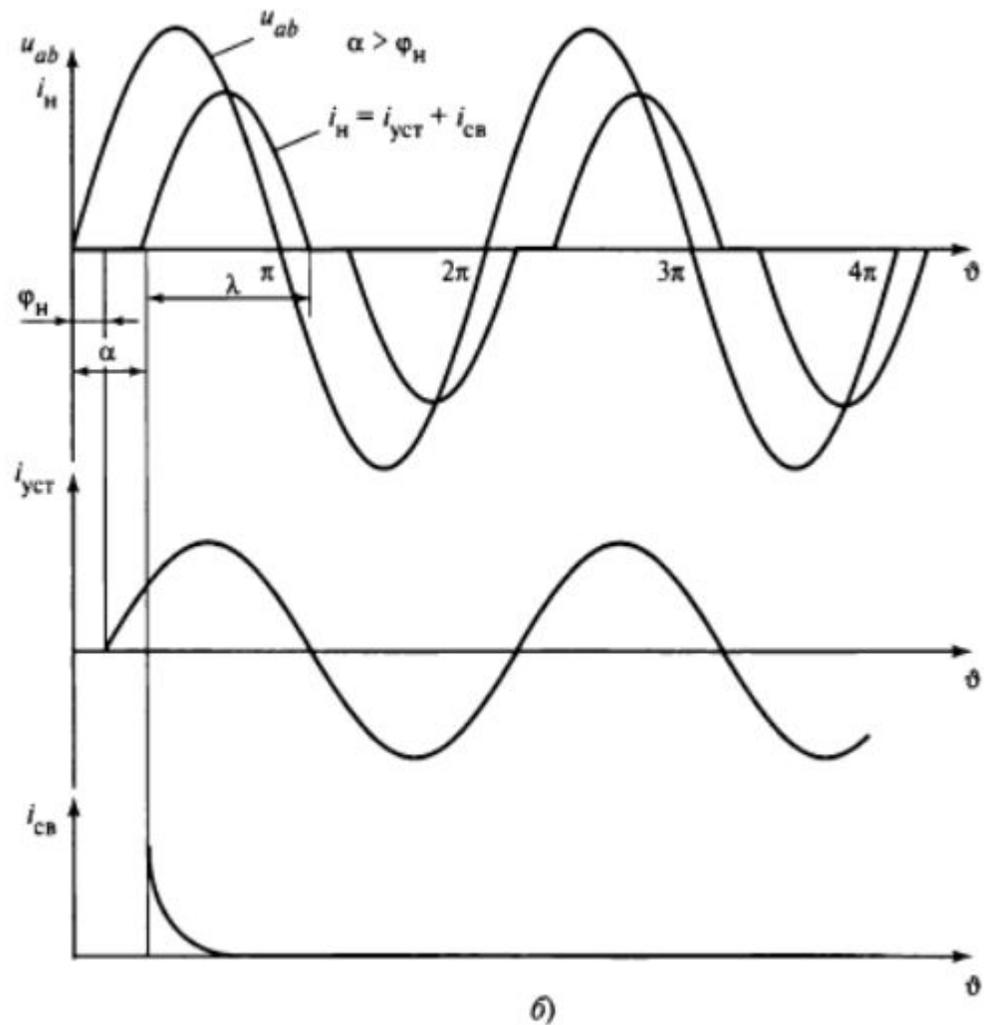


5.5.2 Основные характеристики регуляторов

Активно-индуктивная нагрузка



a)



б)

5.5.2 Основные характеристики регуляторов

Активно-индуктивная нагрузка

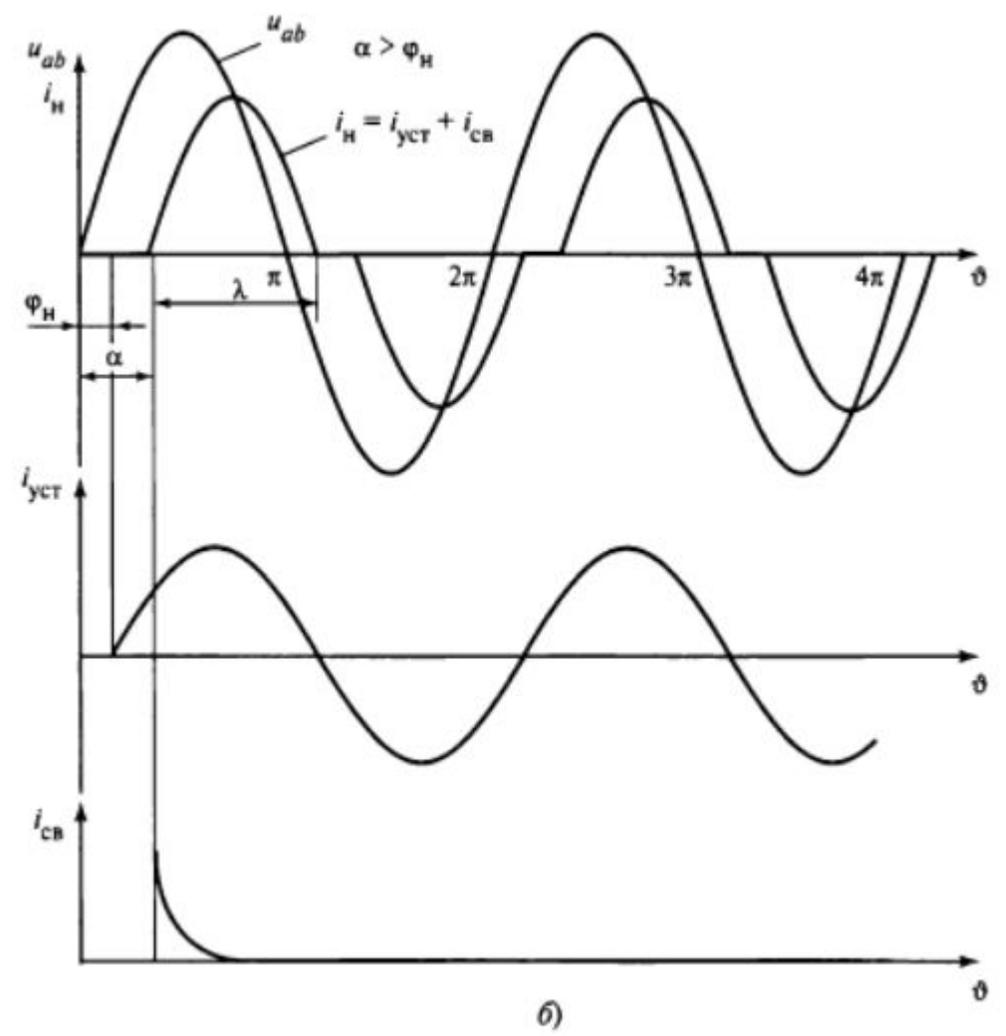
$$u_{ab} = \omega L_H \frac{di_H}{d\vartheta} + i_H R_H$$

$$i_H = i_{H,св} + i_{H,уст}$$

$$i_{H,уст}(\vartheta) = \frac{\sqrt{2} U_{ab}}{\sqrt{R_H^2 + (\omega L_H)^2}} \sin(\vartheta - \varphi_H), \quad \varphi_H = \arctg \frac{\omega L_H}{R_H}$$

$$i_{св}(\vartheta) = A e^{-\frac{\vartheta}{\omega\tau}}, \quad i_{H,св}(\alpha) + i_{H,уст}(\vartheta) = 0$$

$$i_H(\vartheta) = \frac{\sqrt{2} U_{ab}}{\sqrt{R_H^2 + (\omega L_H)^2}} \sin(\vartheta - \varphi_H) - \sin(\alpha - \varphi_H) e^{-\frac{\alpha - \vartheta}{\omega\tau}}$$



5.5.2 Основные характеристики регуляторов

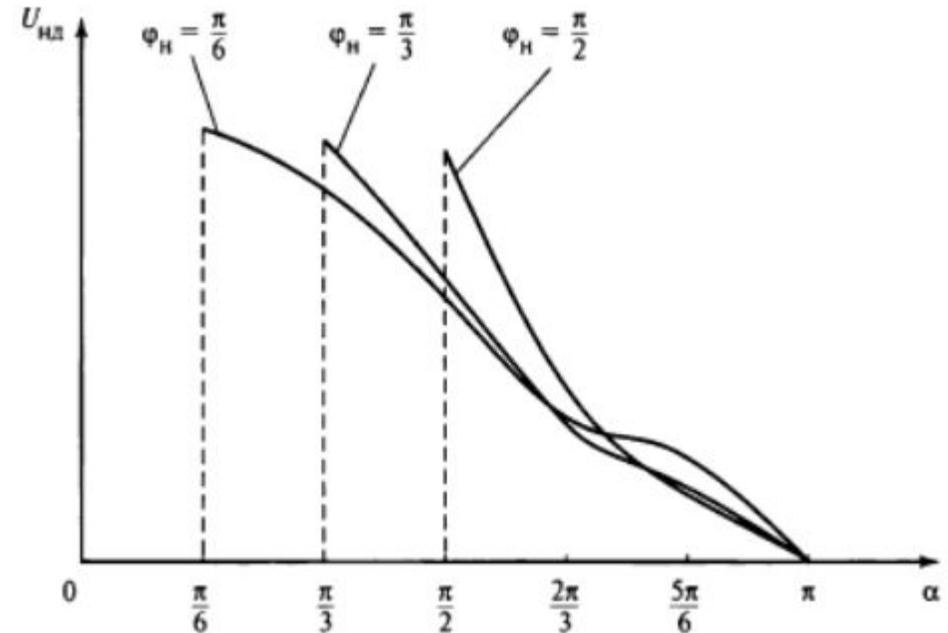
Активно-индуктивная нагрузка

Длительность λ протекания тока через ключ S можно определить, приравняв выражение для тока к нулю

$$i_H(\vartheta) = \frac{\sqrt{2} U_{ab}}{\sqrt{R_H^2 + (\omega L_H)^2}} \sin(\vartheta - \varphi_H) - \sin(\alpha - \varphi_H) e^{-\frac{\alpha - \vartheta}{\omega \tau}}$$

$$\left. \begin{array}{ll} \alpha > \varphi_H & \lambda < \pi \quad (1) \\ \alpha < \varphi_H & \lambda > \pi \quad (2) \\ \alpha = \varphi_H & \lambda = \pi \quad (3) \end{array} \right\}$$

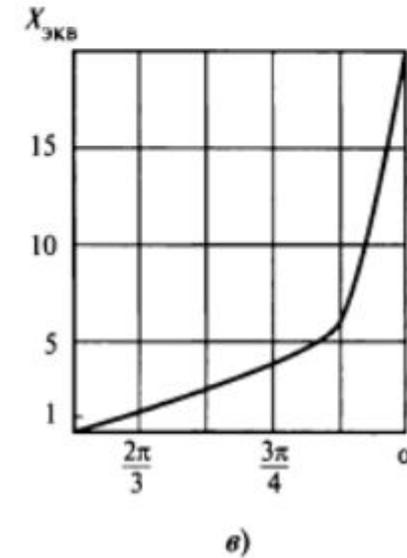
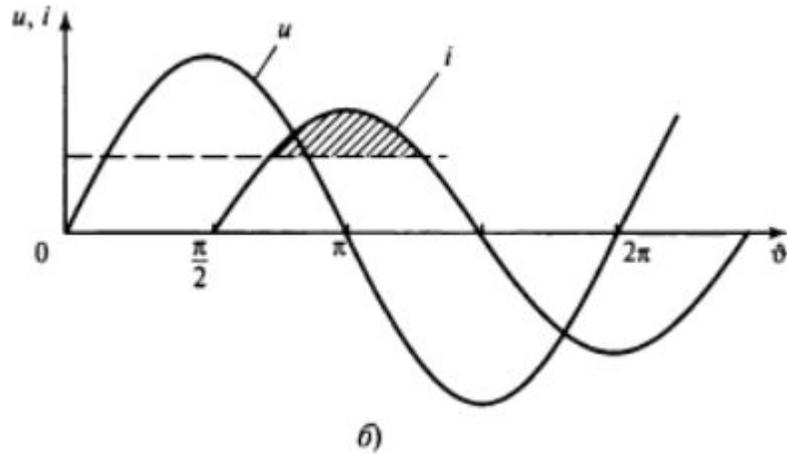
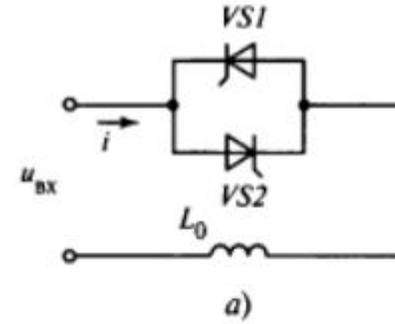
Коэффициент мощности зависит от угла управления α и $\cos\varphi_H$.



5.5.2 Основные характеристики регуляторов

Индуктивная нагрузка

$$I_{L_1} = \frac{2}{\sqrt{2}\pi} I_m \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right), \quad I_m = \frac{U_m}{\omega L_0}$$



5.5.2 Основные характеристики регуляторов

Трёхфазные тиристорные регуляторы

Режим I ($0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$).

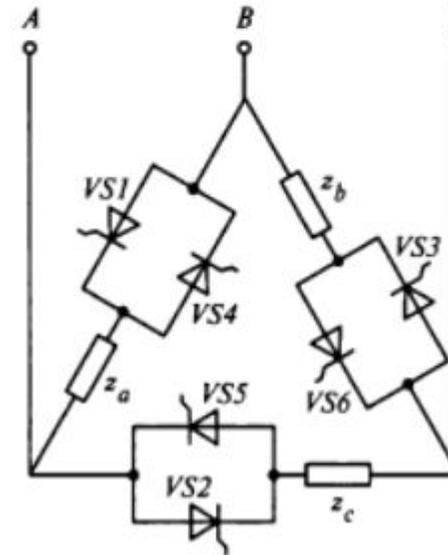
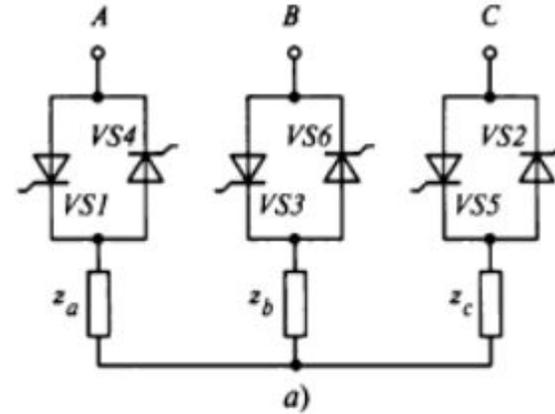
Работают тиристоры $VS5$, $VS6$, либо тиристоры $VS5$, $VS6$ и $VS1$

Режим II ($\frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$).

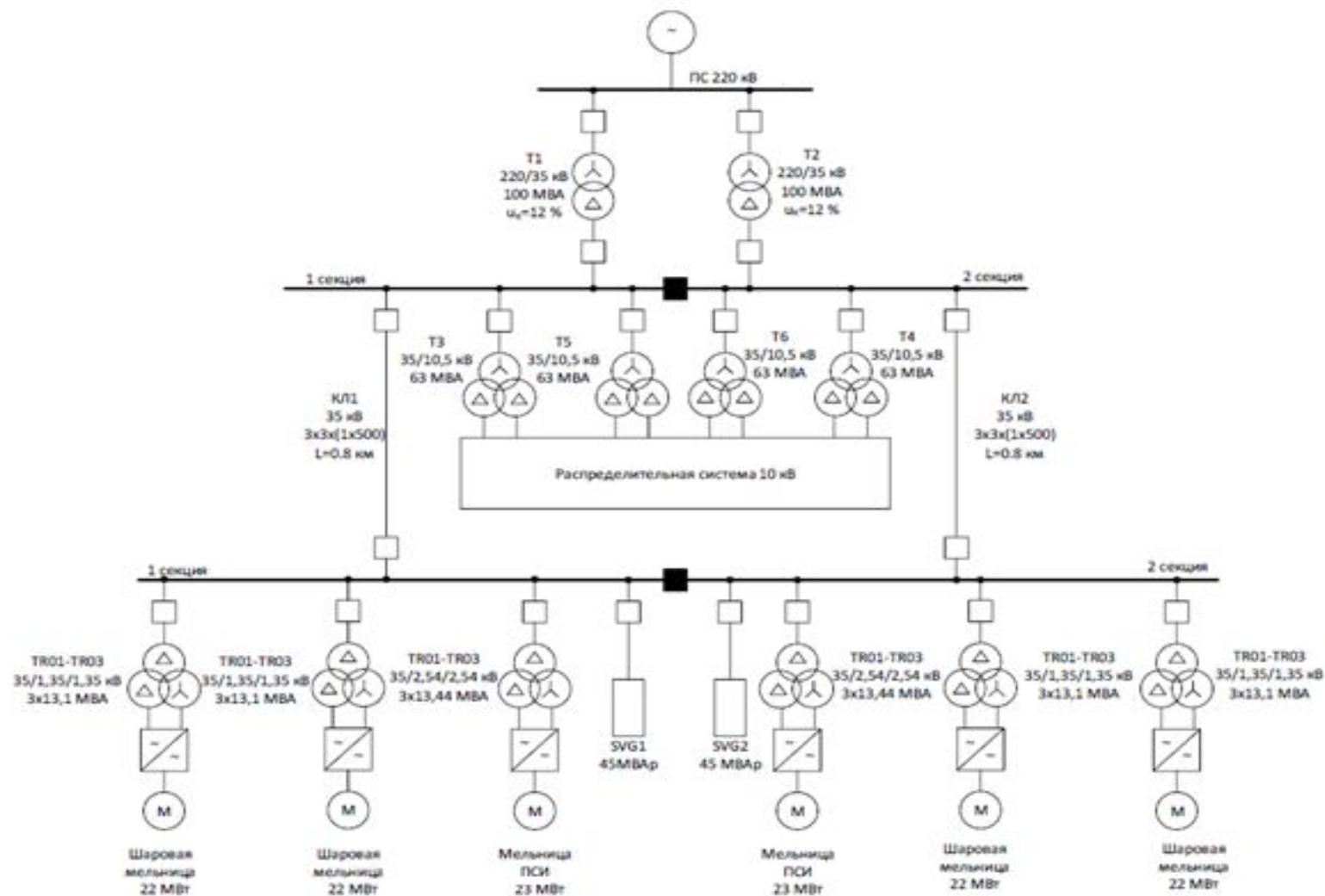
Работают тиристоры $VS5$ и $VS6$, а затем тиристоры $VS1$ и $VS6$.

Режим III ($\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{6}$).

Работают $VS1$ и $VS6$ либо все тиристоры выключены







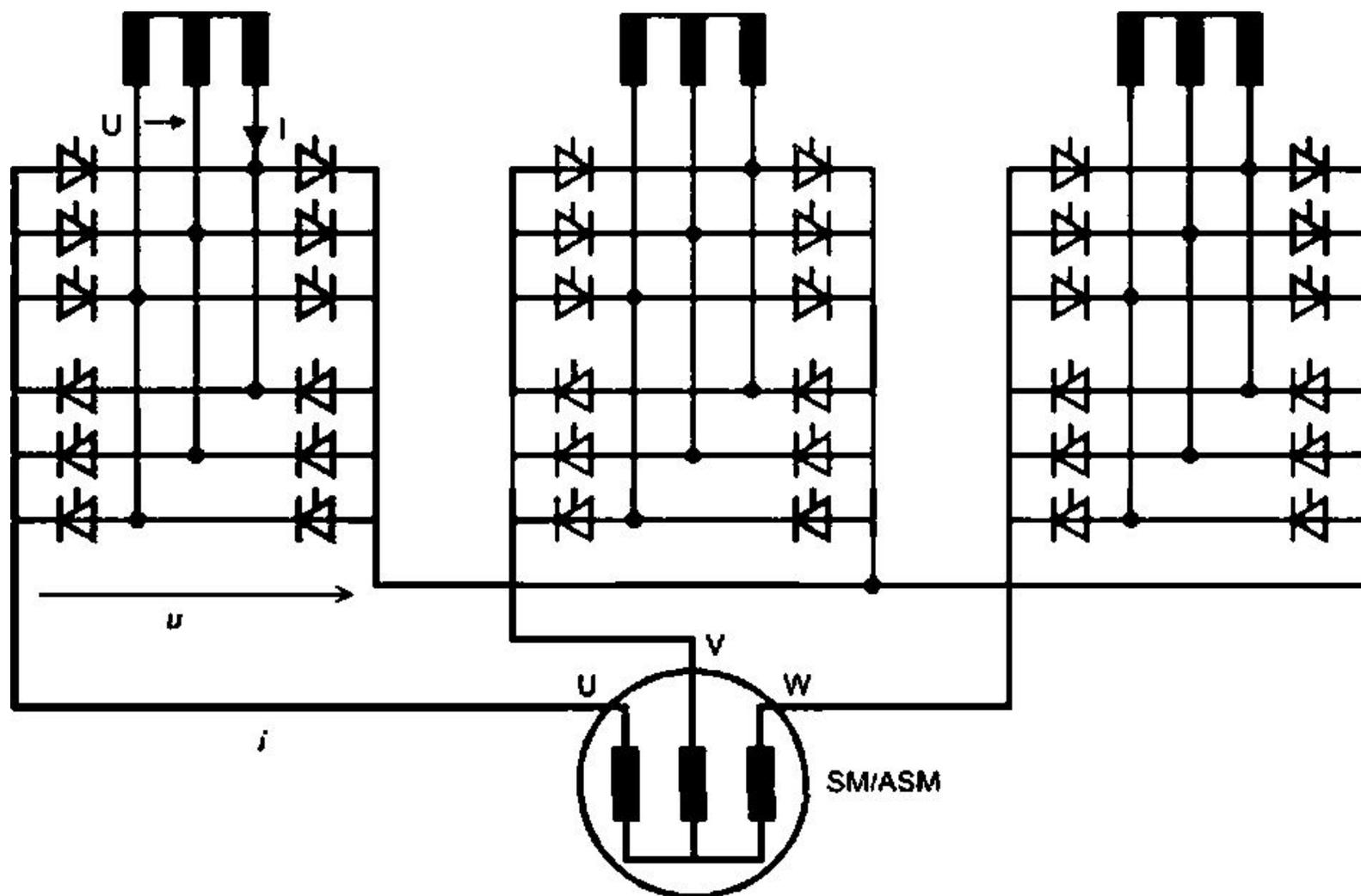
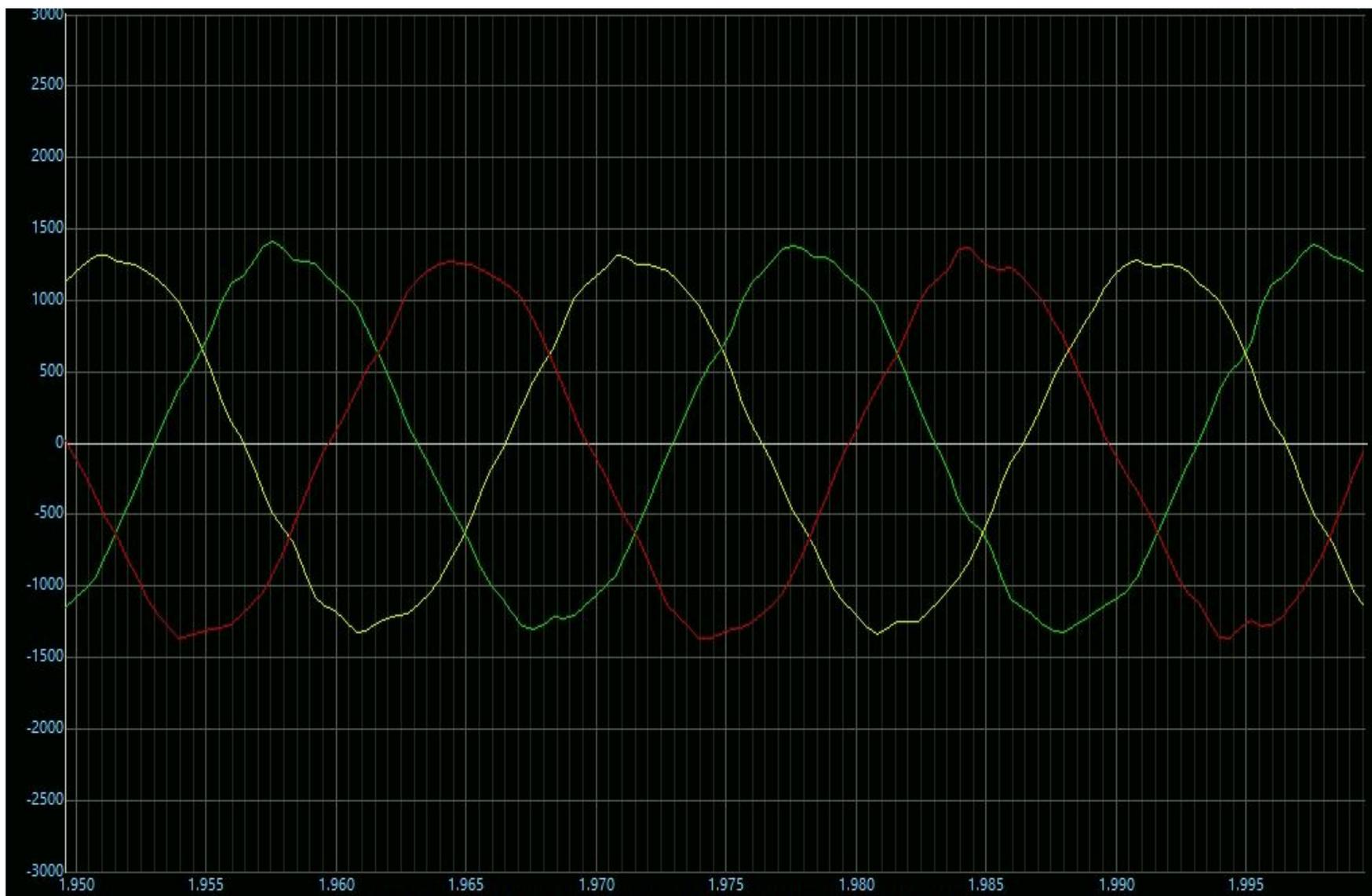
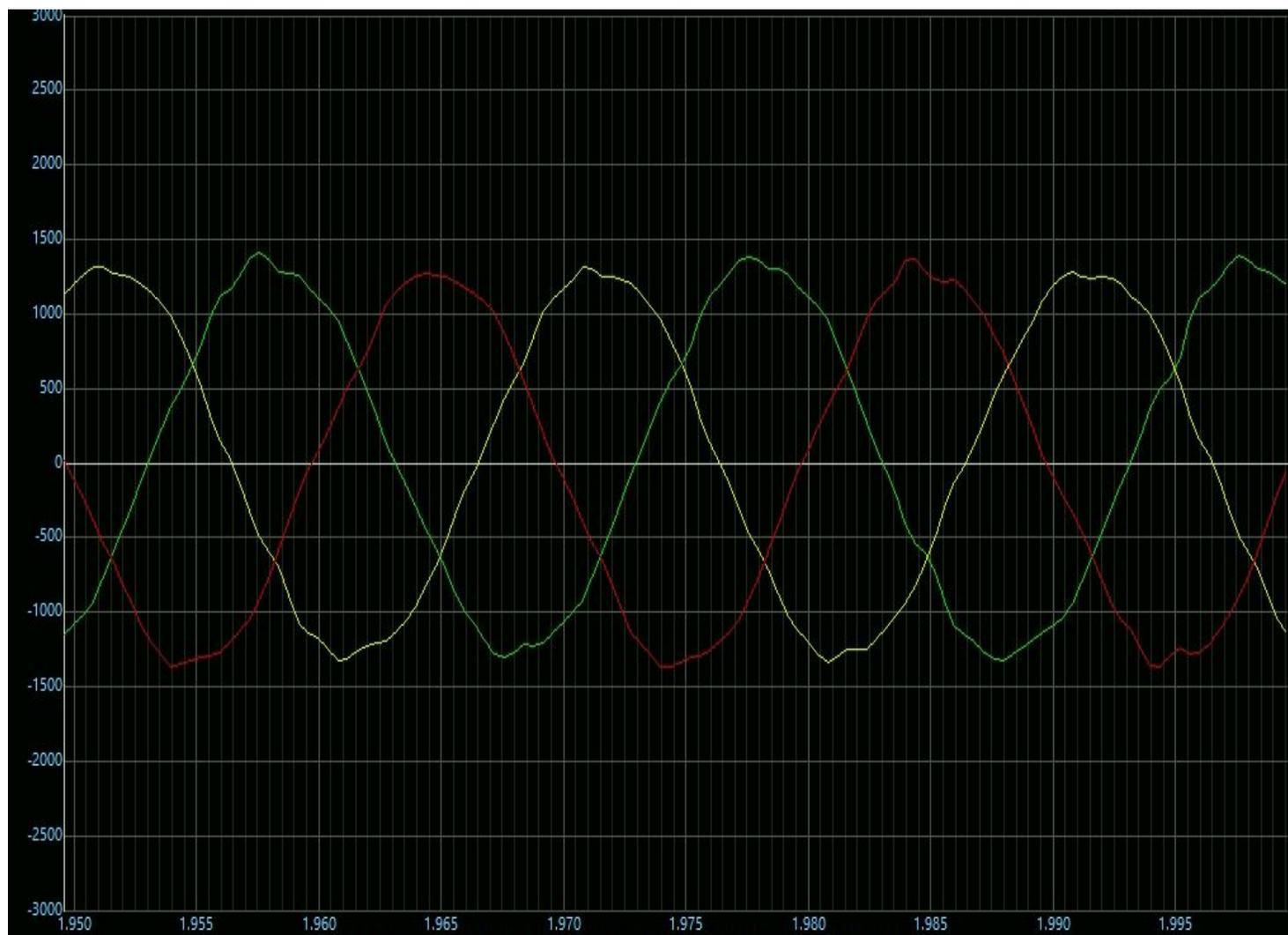
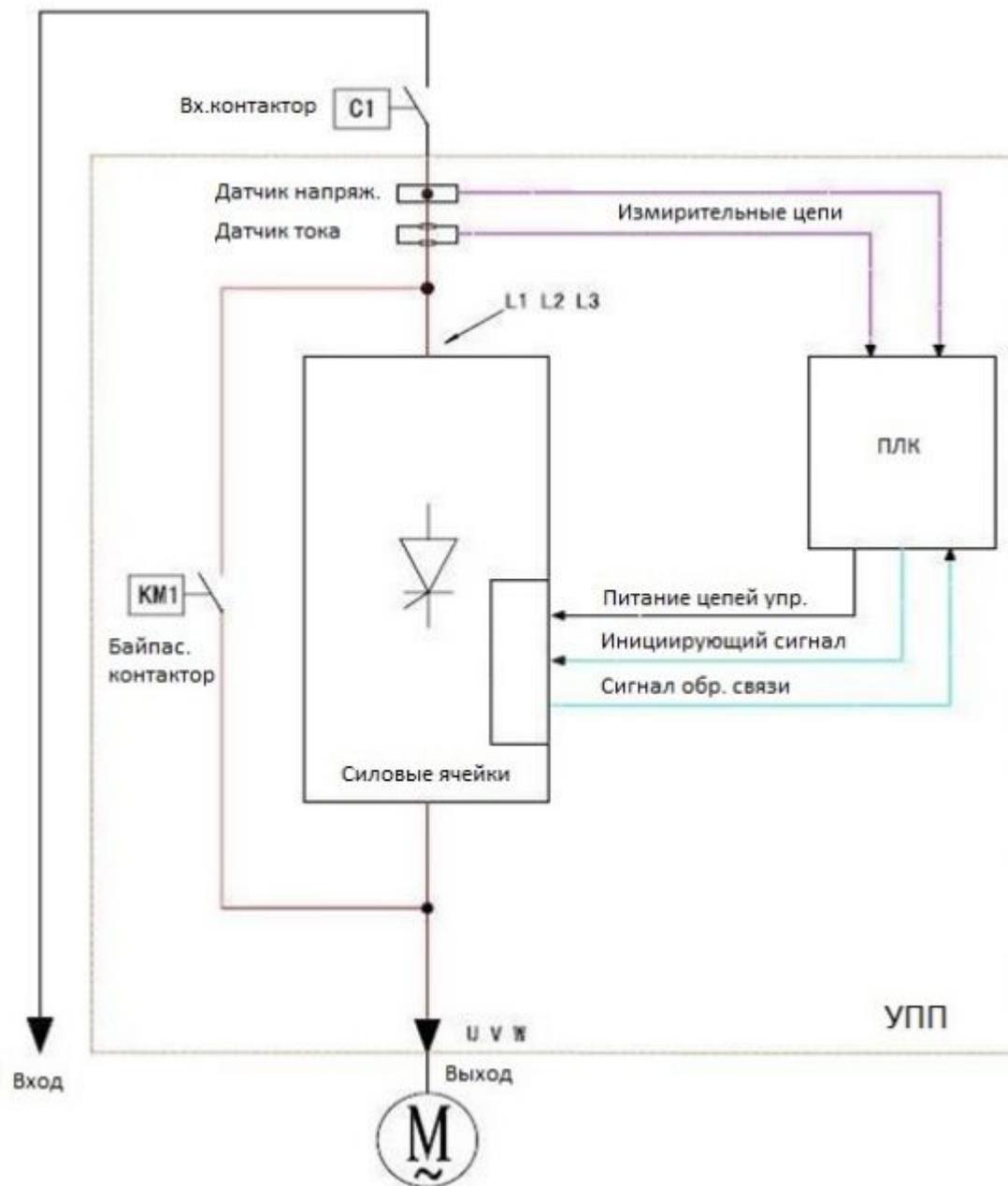


Рисунок 36 — Схема циклоконвертора











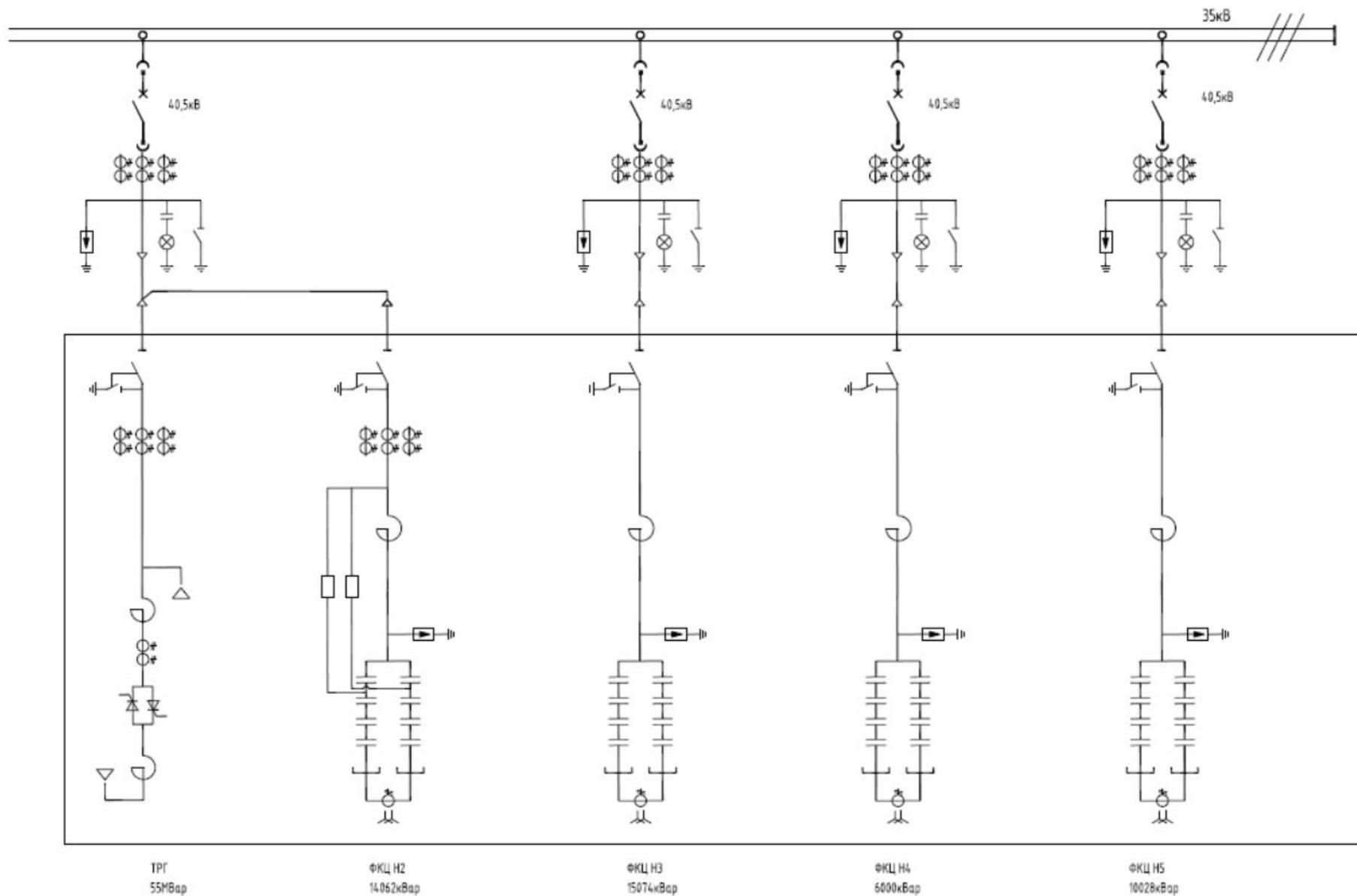
Модуль запуска
тиристоров

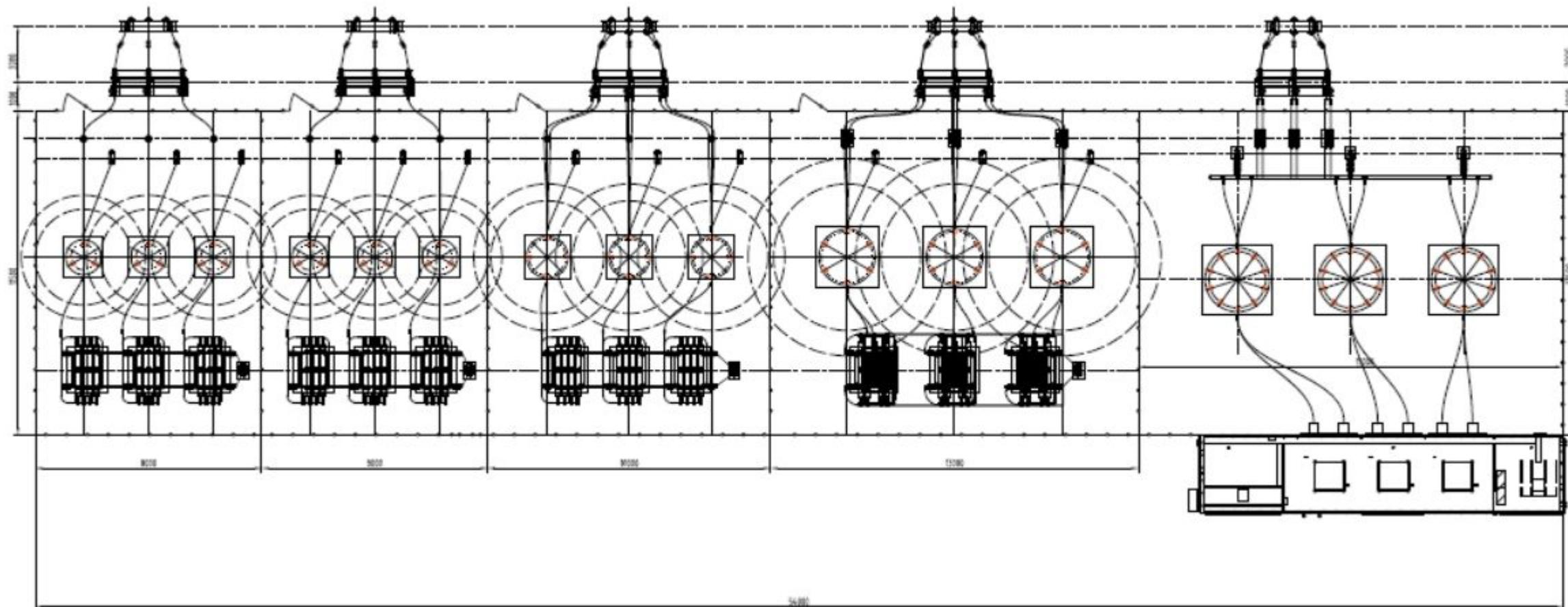
Блок тиристоров

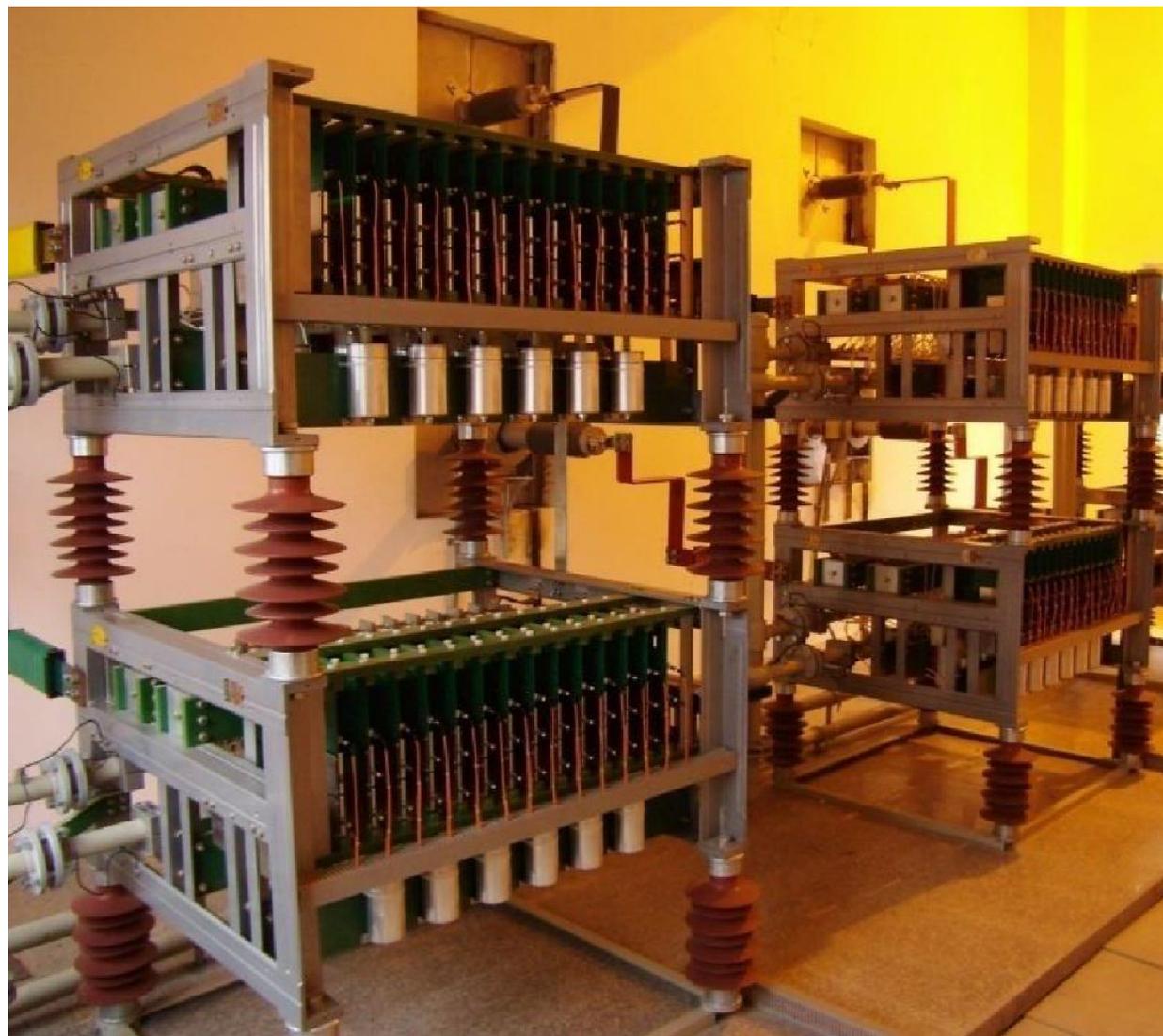
RC-фильтр

Блок питания

Модуль распределения
оптических сигналов



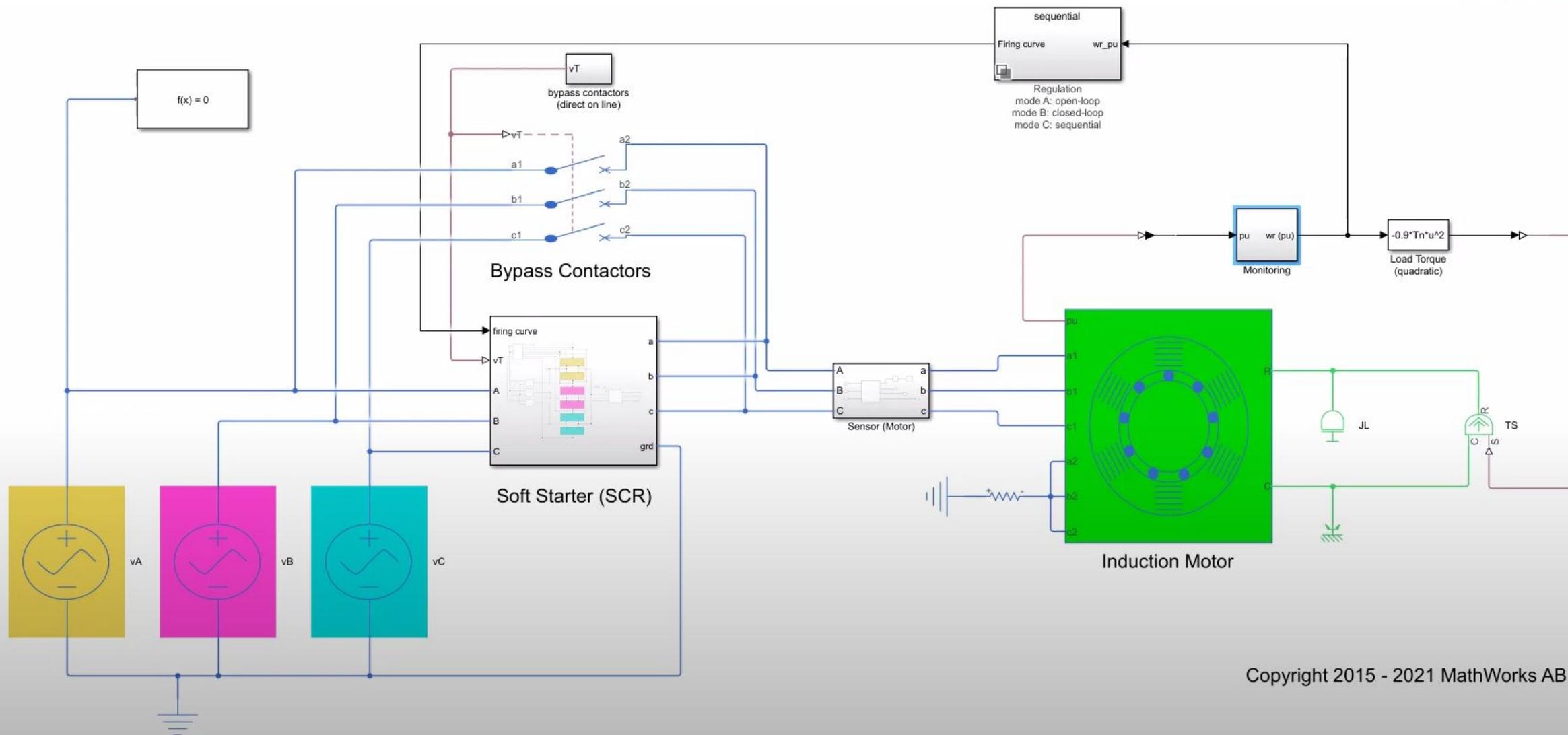




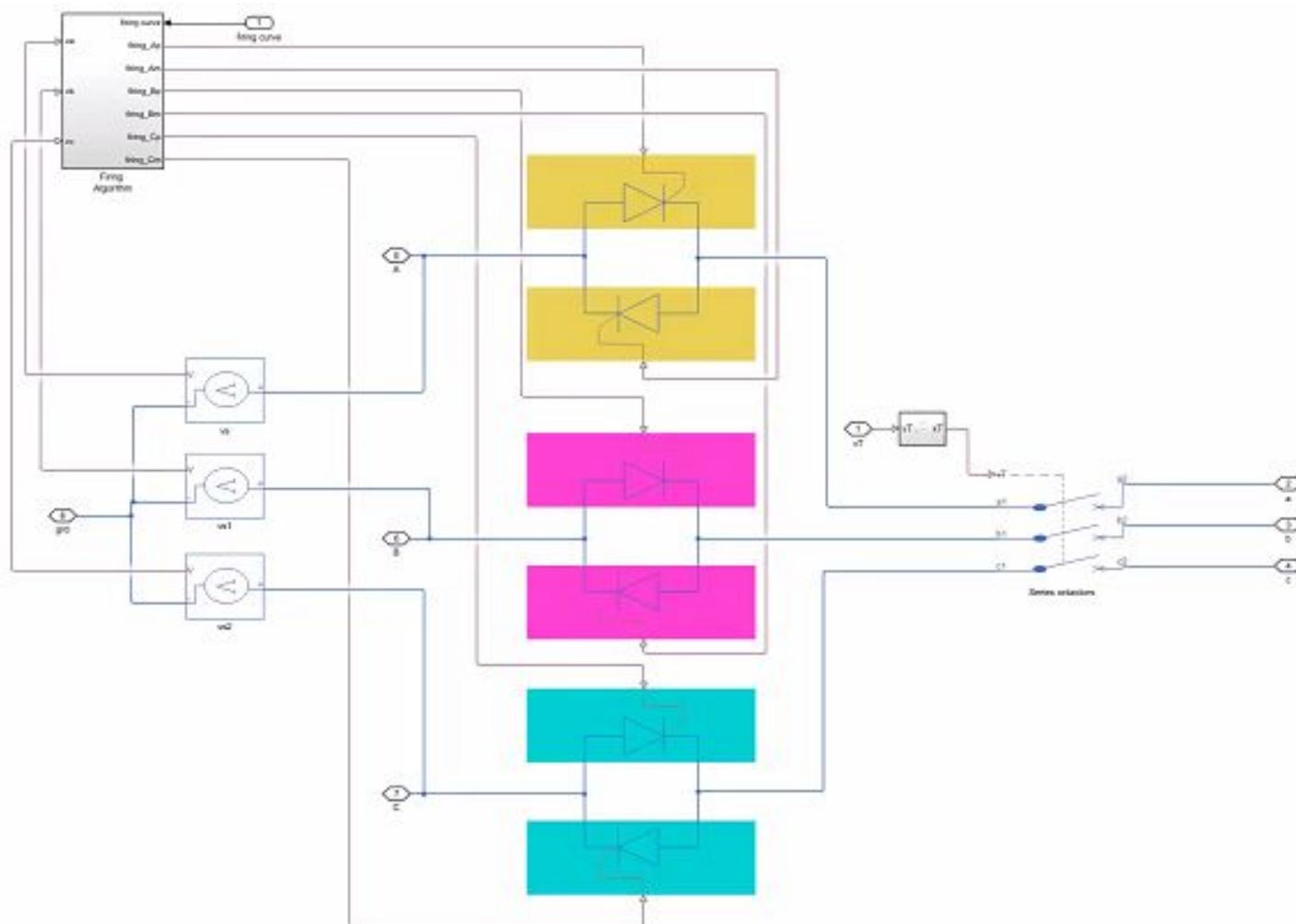


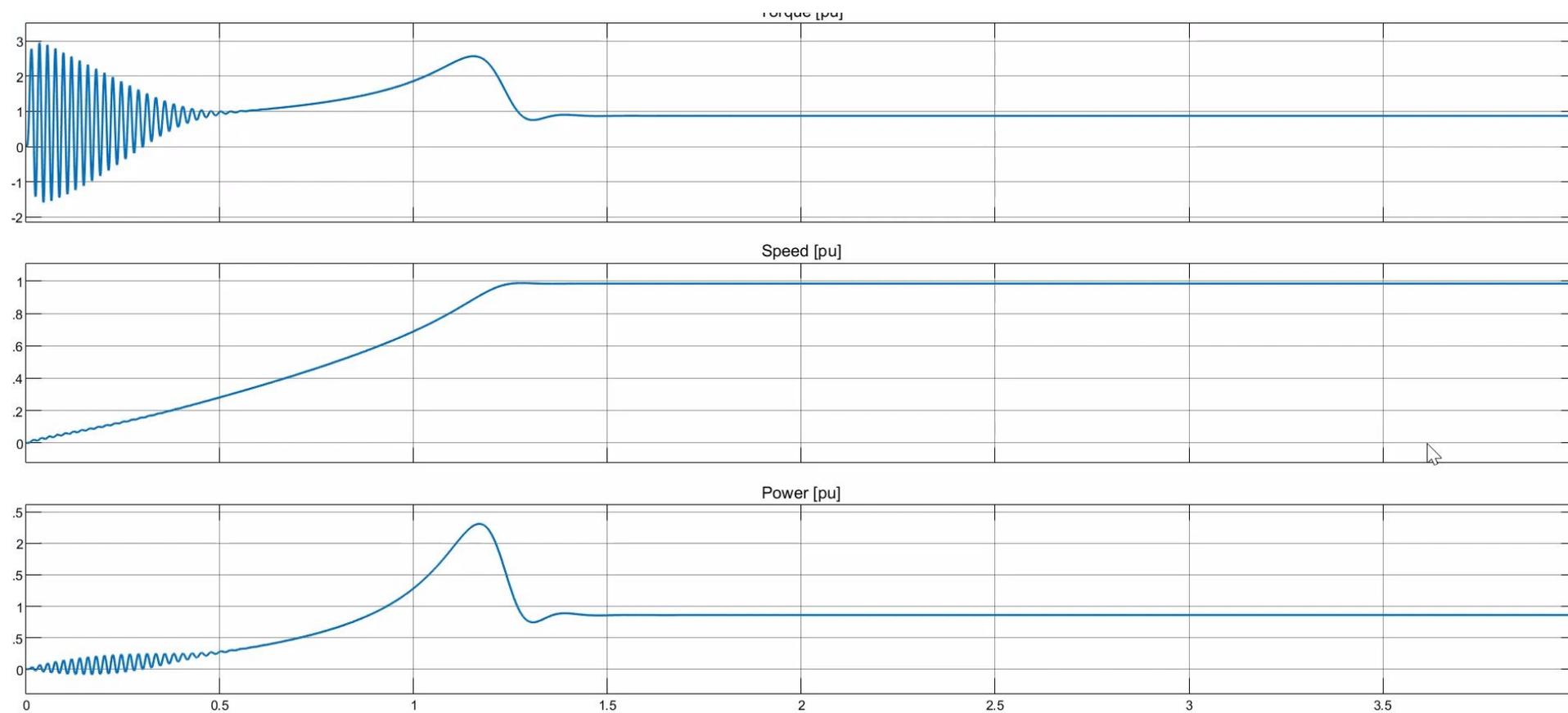


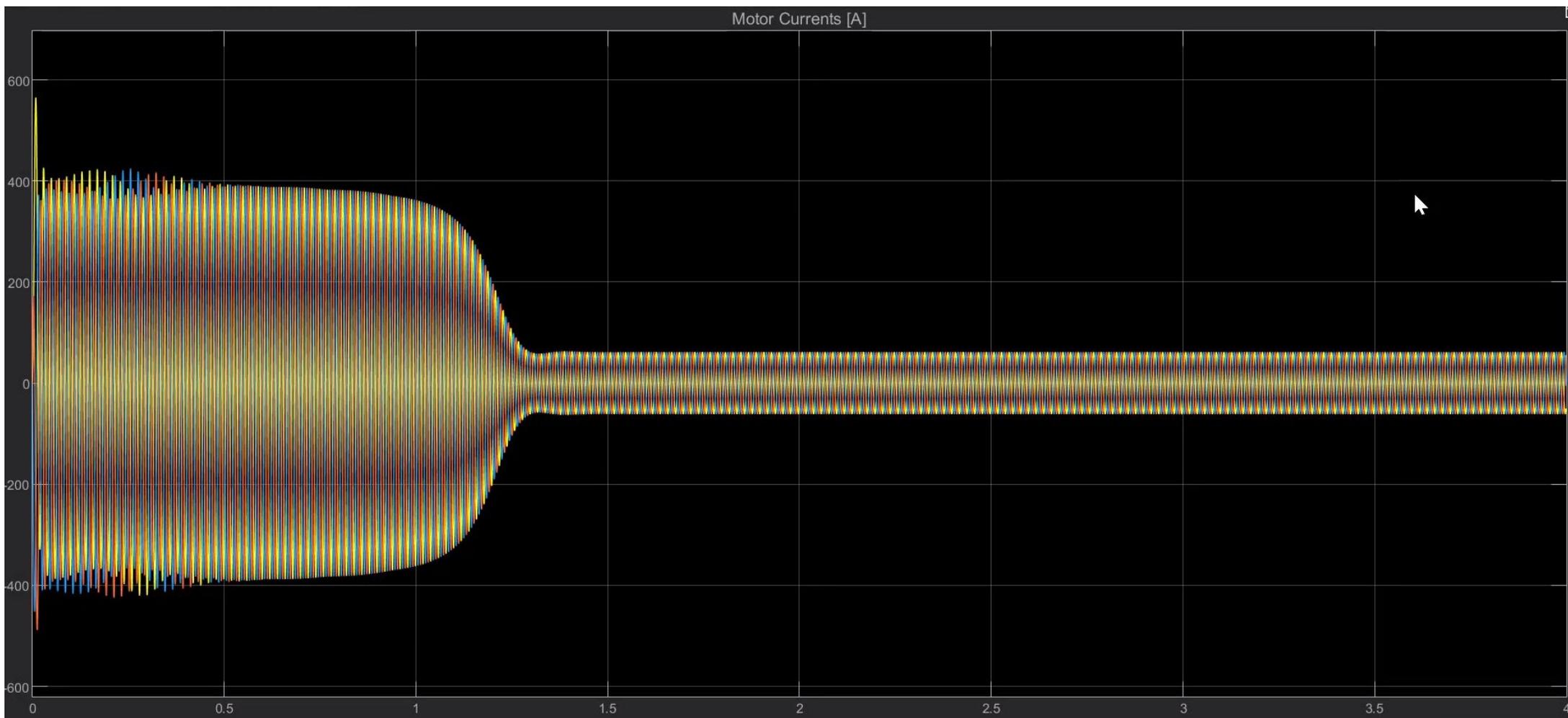


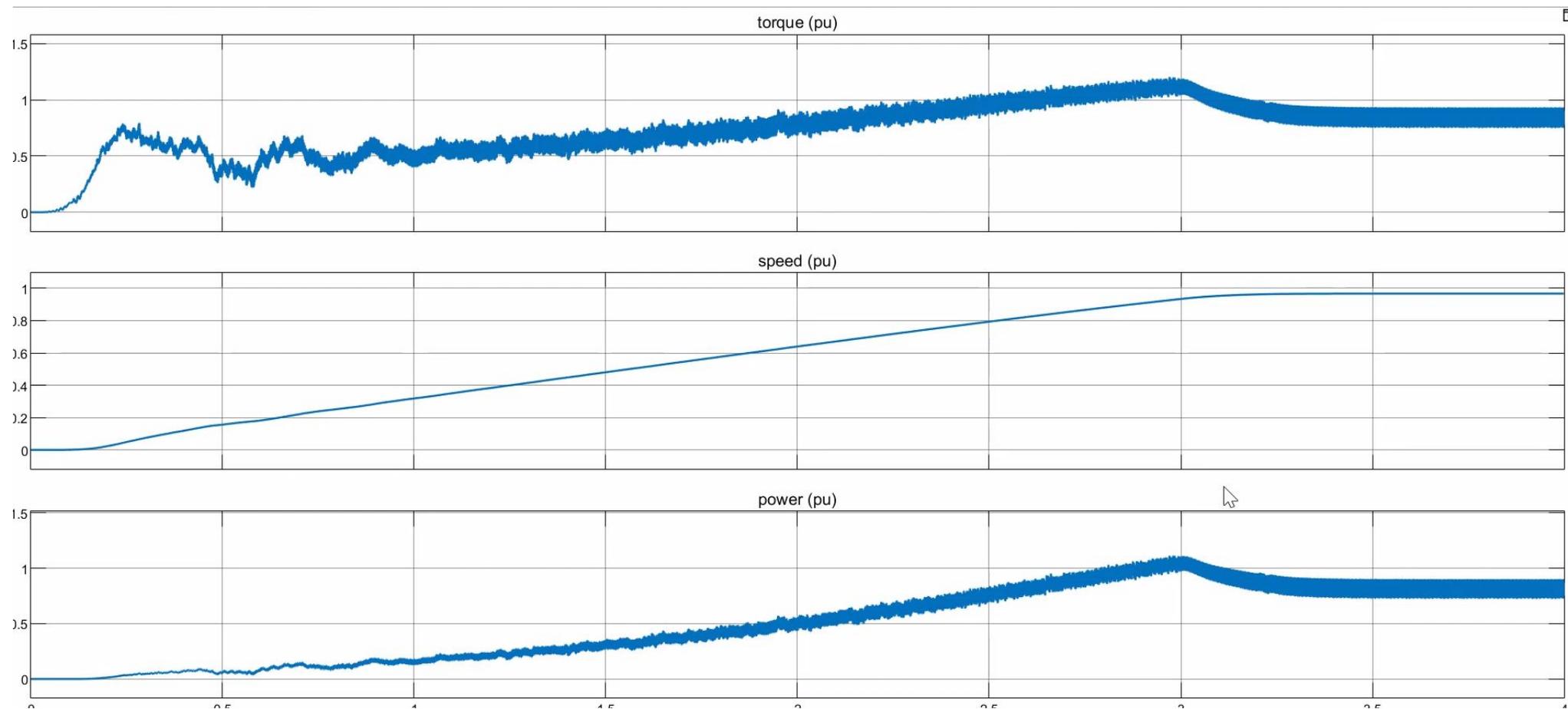


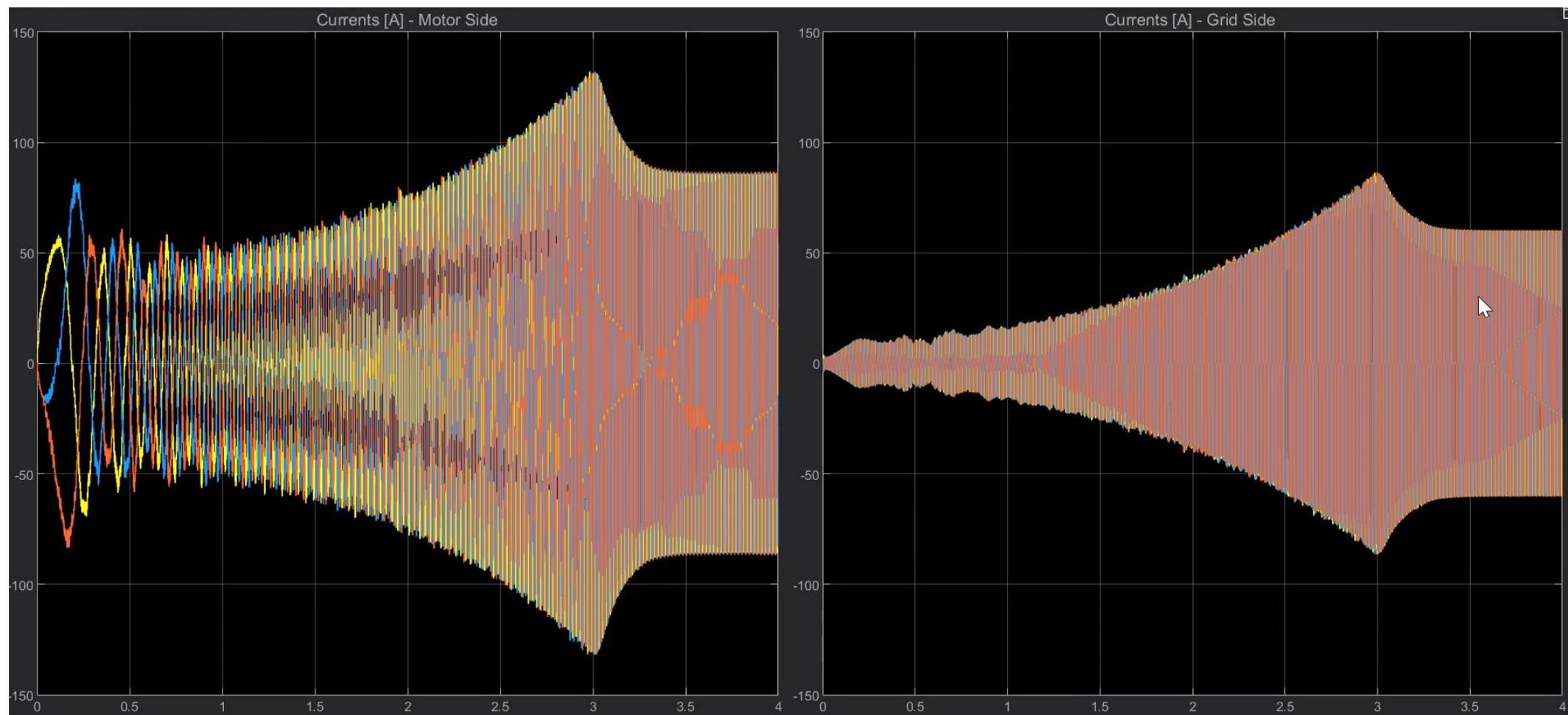
Copyright 2015 - 2021 MathWorks AB

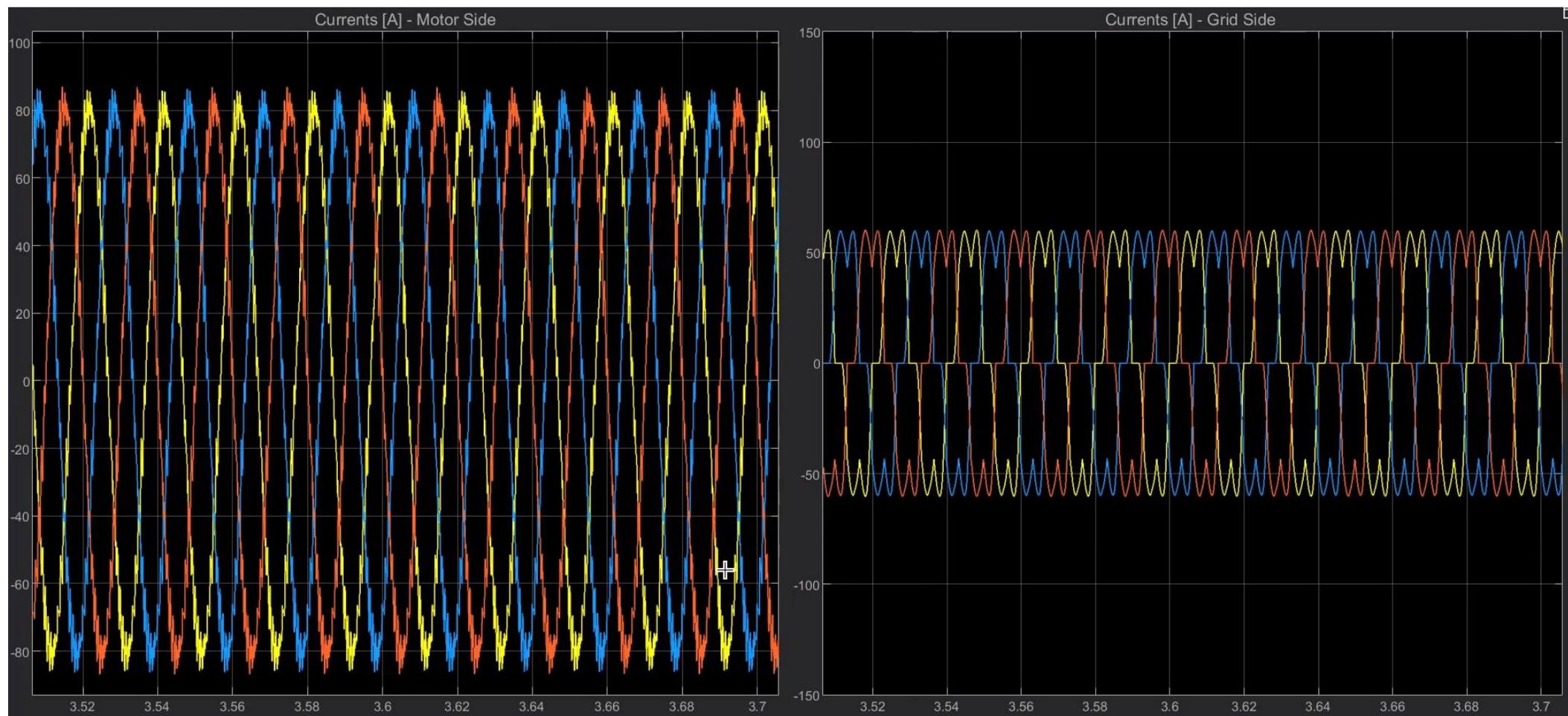












- Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М. М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
- Справочник по силовой электронике / Ю.К. Розанов, П.А. Воронин, С.Е. Рывкин, Е. Е. Чаплыгин ; под ред. Ю.К. Розанова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014. — 472 с., ил.
- Розанов Ю.К., Силовая электроника : учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. 2-е изд., стереотипное. — М. : Издательский дом МЭИ, 2009. — 632 с.: ил.
- <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/49605-soft-starter-induction-motor-model>

Ваши вопросы?

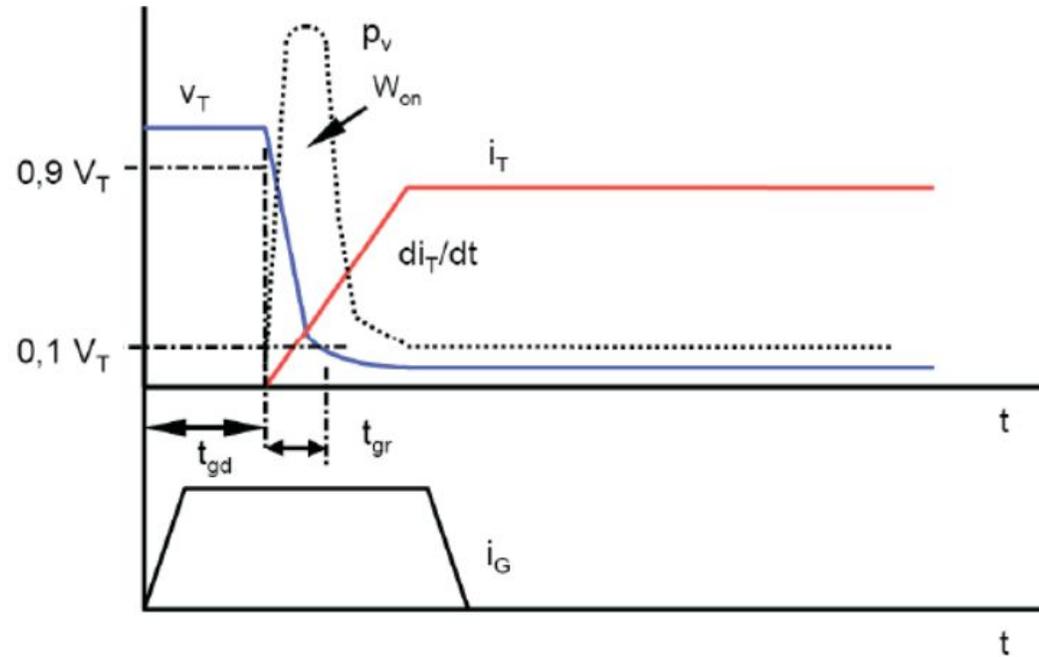
Макаров Алексей Витальевич
ст. Преподаватель каф. ЭО,
КНИТУ-КАИ

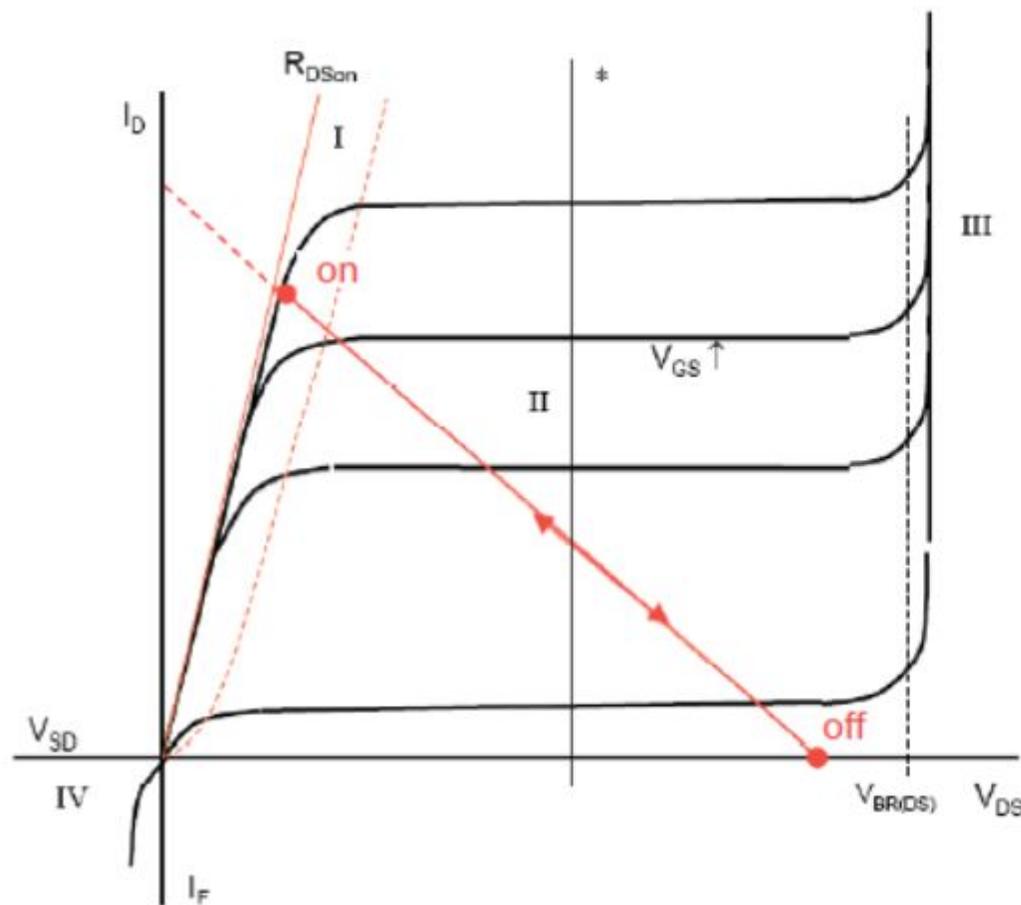
Email: AMakarov.kai@gmail.com

Тел. +7 (963) 120 20 23



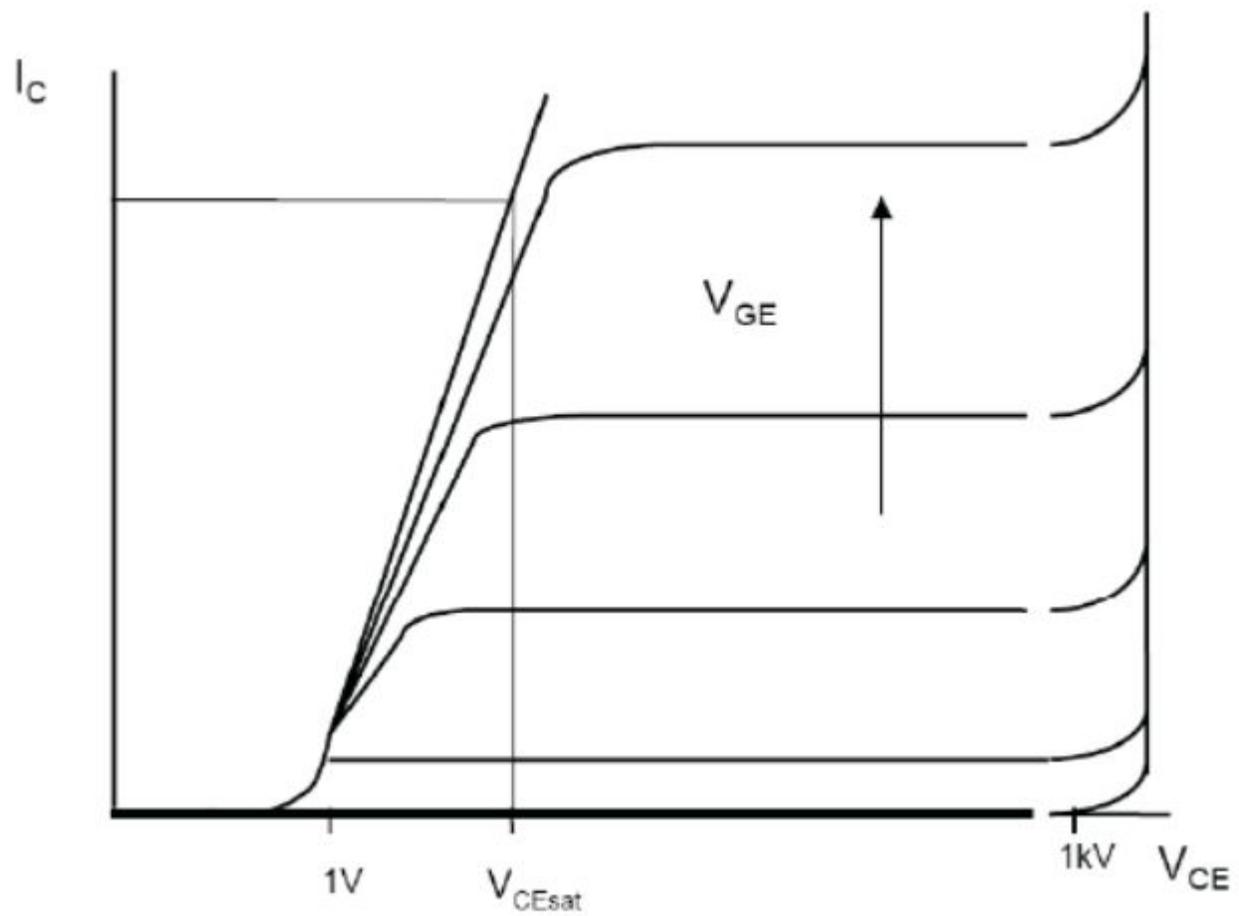
Динамические характеристики тиристора (вкл.)

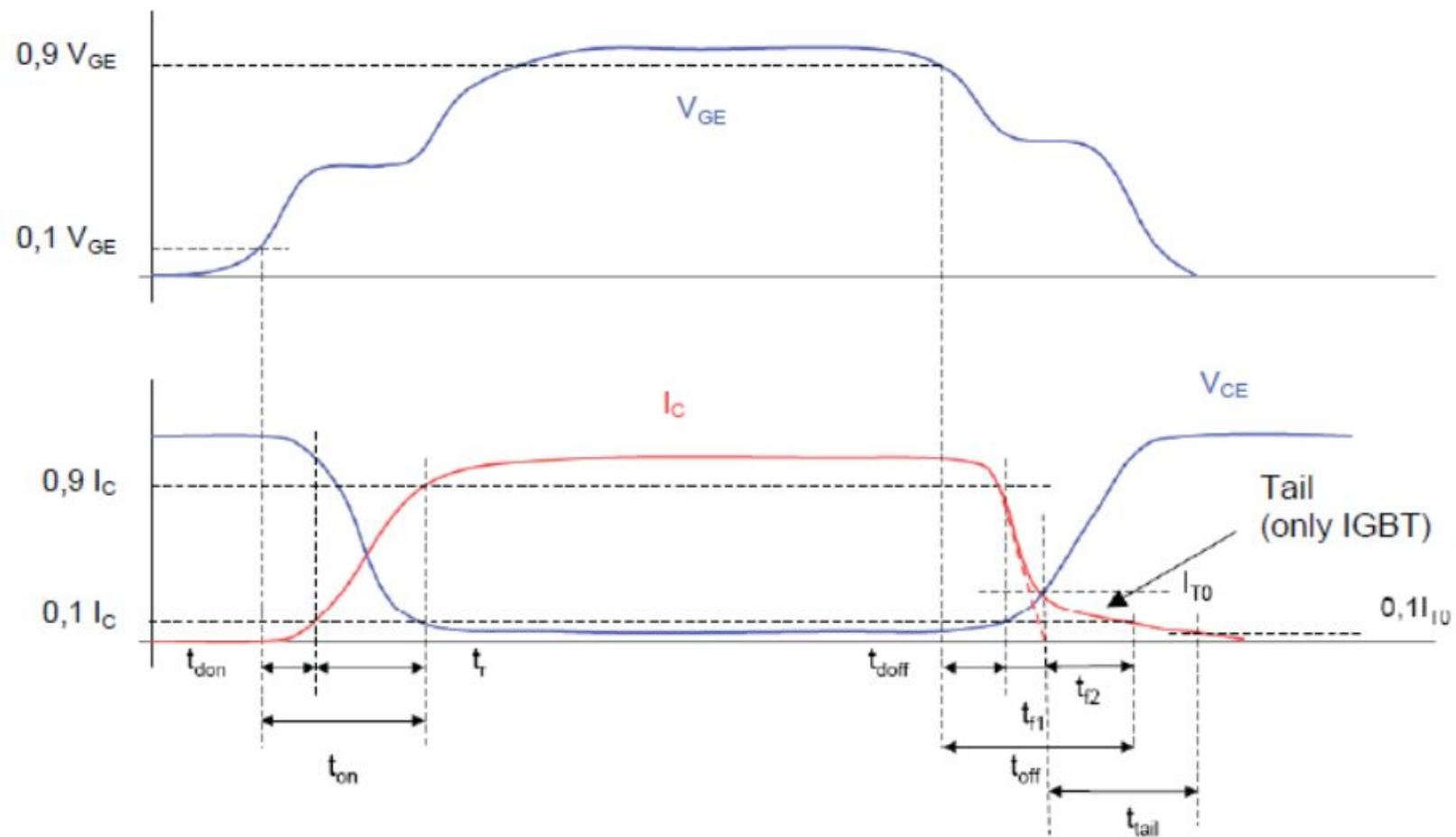




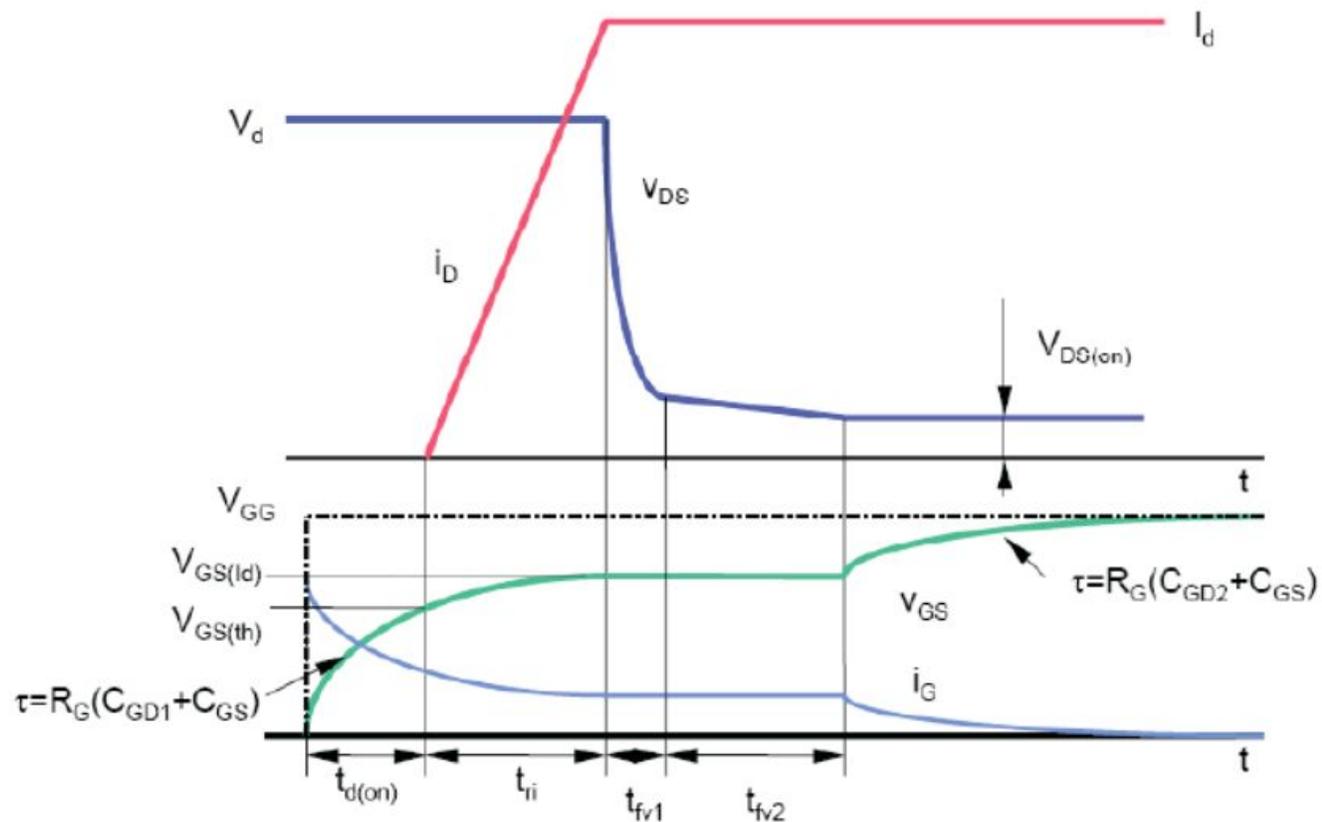
- I ohmic region
- II active region
- III breakdown
- IV inverse region

* concerning transfer characteristic





turn-on (hard switching due to constant-current load)



turn-off (hard switching due to constant-current load)

