

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций



**Кафедра электропривода и электрооборудования
береговых установок**

Курсовая работа

**По курсу "Преобразовательная техника"
Тиристорный преобразователь
переменного напряжения в постоянное напряжение**

Специальность: 180400 "Электропривод и автоматика
промышленных установок и
технологических комплексов"

Вариант N11

Выполнил: Красовский А.В.

Преподаватель: Белоусова Н.В.

Санкт-Петербург

2009г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Техническое задание на проектирование тиристорного преобразователя.
2. Расчет силовой части тиристорного преобразователя.
 - 2.1. Выбор силовых вентилях преобразователя.
 - 2.2. Выбор защитных цепей силовых вентилях.
 - 2.3. Выбор силового согласующего трансформатора.
 - 2.4. Выбор сглаживающих дросселей, расчет параметров цепи постоянного тока.
3. Расчет и выбор элементов системы управления. Схема системы управления. Временные диаграммы токов и напряжений системы импульсно-фазового управления.
4. Статические характеристики силовой части тиристорного преобразователя.
 - 4.1. Временные диаграммы выпрямленных токов и напряжений.
 - 4.2. Передаточные функции системы управления, силовой части и преобразователя в целом.
5. Общая схема тиристорного преобразователя, включающая в себя систему управления, защиту и сигнализацию.

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Число пульсаций выпрямленного напряжения

$m=6$

Параметры нагрузки цепи постоянного тока

№	2
$I_{dном}[A]$	200
$U_{dном}[B]$	220
$R_n^*[OM]$	0,02
$L_n^*[ГН]$	0,09

Требования к управлению реверсивным преобразователем

№	1
управление	совместное согласованное

Наибольшее значение уравнивающего тока и гранично-непрерывного тока

№	4
$I_v^* [%]$	20
$I_0^* [%]$	12

Коэффициент пульсации выпрямленного тока в процентах от номинального тока

№	6
$q_i [%]$	3

Требования к форме опорных напряжений СИФУ

№	1
опорные напряжения	синусоидальные

Значения напряжений управления преобразователя в долях от базового значения напряжения управления, при которых строятся нагрузочные характеристики и временные диаграммы

№	5
$u_0^{(1)*}$	0,75
$u_0^{(2)*}$	0,4
$u_0^{(3)*}$	-0,2
$u_0^{(4)*}$	-0,85

ВАРИАНТ ЗАДАНИЯ

Номер варианта	Номера пунктов задания						
	1	2	3	4	5	6	7
11	6	2	1	4	6	1	5

Коэффициенты тиристорных преобразователей

1. Число пульсаций выпрямленного напряжения за период напряжения сети $m=6$
2. Коэффициент схемы по фазному напряжению $k_{схф}=2,34$
3. Коэффициент схемы по линейному напряжению $k_{схл}=1,35$
4. Коэффициент искажений тока трансформатора вторичной обмотки $k_{i2}=0,955$
5. Коэффициент искажений тока трансформатора первичной обмотки $k_{i1}=0,955$
6. Коэффициент схемы по току $k_{схт}=0,816$
7. Коэффициент искажений мощности $k=0,955$

Справочные данные по тиристорам

1. Предельный ток (стандартный радиатор, обдув со скоростью 6 м/с) [А] – 200
2. Прямое падение напряжения [В] - 1,2
3. Время включения [μ с] – 20
4. Ток удержания [mA] – 100
5. Отпирающий ток управления [mA] – 300
6. Критическая скорость нарастания прямого напряжения $(du/dt)_{кр}$ [В/ μ с] – 100

1.1. Справочные данные по силовым трансформаторам

Тип	S_n [кВА]	U_1 [В]	U_2 [В]	u_k [%]	s_k [%]	Схема
ТСЗ-48	48	230	133	5,2	2,9	Δ/Δ

2. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

2.1 Источник питания

Цепь переменного тока преобразователя - трехфазная сеть переменного синусоидального напряжения

2.1.1 Действующее значение фазного напряжения $U_{1\phi} := 220 \text{ В}$

2.1.2 Частота сетевого напряжения $f := 50 \text{ Гц}$

2.1.3 Мощность сети неограниченна.

2.2 Требования к цепи постоянного тока.

2.2.1 Число пульсаций выпрямленного напряжения $m := 6$

2.2.2 Тип нагрузки: источник э.д.с. с заданными внутренними параметрами:
активным сопротивлением $R_H := 0.02 \text{ Ом}$
и индуктивностью $L_H := 0.09 \text{ Гн}$

2.2.3 Диапазон регулирования выпрямленного тока $[-I_{dном}, I_{dном}]$

$$I_{dном} := 200 \text{ А}$$

2.2.4 Диапазон регулирования выпрямленного напряжения: $(-U_{dном}, U_{dном})$

$$U_{dном} := 220 \text{ В}$$

2.2.5 Наибольшее значение уравнивающего % от $I_{dном}$

$$I_y := I_{dном} \cdot 0.2 \quad I_y = 40 \text{ А}$$

или гранично-непрерывного % от $I_{dном}$

$$I_0 := I_{dном} \cdot 0.12 \quad I_0 = 24 \text{ А}$$

2.2.5 Коэффициент пульсаций выпрямленного тока при номинальной нагрузке

$$q := 3$$

$$U_0 := 10 \text{ В} \quad - \text{напряжение базовое}$$

$$U_{пит} := 15 \text{ В} \quad - \text{напряжение питания}$$

2.3 Требования к системе управления

2.2.5 Управление реверсивным преобразователем совместное согласованное

2.2.6 Тип опорного напряжения СИФУ синусоидальное, блок линеаризации в систему управления не включается.

2.2.7 Четыре значения э.д.с. преобразователя, при которых строятся нагрузочные характеристики (п.7.7) и временные диаграммы.

$$U_{01} := 0.75 \cdot U_{\text{б}} \quad U_{01} = 7.5 \quad \text{В}$$

$$U_{02} := 0.4 \cdot U_{\text{б}} \quad U_{02} = 4 \quad \text{В}$$

$$U_{03} := -0.2 \cdot U_{\text{б}} \quad U_{03} = -2 \quad \text{В}$$

$$U_{04} := -0.85 \cdot U_{\text{б}} \quad U_{04} = -8.5 \quad \text{В}$$

2.4 Базовые значения и относительные единицы

В задании на курсовое проектирование параметры нагрузки (R_n, L_n) и средние значения э.д.с. преобразователя (0.75;0.4;-0.2;-0.85) приведены в относительных единицах (в долях от базовых значений этих величин).

2.4.1 В качестве основных базовых величин принимаются:

$$E_{\text{б}} := E_{\text{д0}} \quad - \text{максимальное значение э.д.с. преобразователя;}$$

$$I_{\text{б}} := I_{\text{дном}} \quad - \text{номинальное значение тока нагрузки;}$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad - \text{угловая частота напряжения источника питания.}$$

2.4.1 Производные базовые величины находятся через основные базовые величины. Например, базовые значения активного сопротивления и индуктивности нагрузки:

$$R_{\text{б}} := \frac{E_{\text{б}}}{I_{\text{б}}}, \quad L_{\text{б}} := \frac{E_{\text{б}}}{\omega \cdot I_{\text{б}}}$$

Значения величин в абсолютных единицах определяются по формуле $A = A^* \cdot A_{\text{б}}$,

где $A_{\text{б}}$ базовое значение основной величины; A^* значение этой величины в относительных единицах. Например, средние значения выпрямленной э.д.с. $E_{\text{д}n}$ определяются по формуле

$$E_{\text{д}n} = E_{\text{д}n}^* \cdot E_{\text{б}}, \quad n = 1, 2, 3, 4,$$

а сопротивление и индуктивность нагрузки (по данным таблицы 7.2) по формулам

$$R_{\text{н}} = R_{\text{н}}^* \cdot R_{\text{б}} = R_{\text{н}}^* \cdot \frac{E_{\text{д0}}}{I_{\text{дном}}} \quad R_{\text{н}} = R_{\text{н}}^* \cdot R_{\text{б}} = R_{\text{н}}^* \cdot \frac{E_{\text{д0}}}{I_{\text{дном}}}$$

2.4.3 При расчете системы управления в качестве базового значения сигналов принимается базовое значение напряжения системы управления $U_{\text{б}}$. Значения сигналов в абсолютных единицах определяются по формуле

$$A = A^* U_{\text{б}},$$

где A значение сигнала в абсолютных единицах; A^* - значение сигнала в относительных единицах. В качестве базового значения напряжения системы управления рекомендуется принять : $U_{\text{б}} = 10 \text{ В}$

при этом напряжение питания системы управления рекомендуется принять:

$$U_{\text{пит}} = 15 \text{ В}$$

3 . РАСЧЕТ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В данном пункте проекта, исходя из требований технического задания, приводится словесное обоснование выбора типа преобразователя: нулевой, мостовой; реверсивный, нереверсивный. Обосновывается необходимость использования трансформатора для согласования напряжения питающей сети и напряжения на нагрузке. В зависимости от типа преобразователя для его питания необходимо использовать либо один, либо два согласующих трансформатора.

Описываются необходимые виды защит: максимальной токовой, тепловой, от перенапряжения на тиристорах. Приводится схема силовой части тиристорного преобразователя. Производится выбор основных силовых элементов. Строятся регулировочная и нагрузочная характеристики преобразователя, временные диаграммы выпрямленного тока и напряжения.

Тиристорные преобразователи с числом пульсаций выпрямленного напряжения $m=6$ проектируются реверсивными и содержат два комплекта нереверсивных преобразователей. Схема силовой части преобразователей приведены на .

3.1 Выбор согласующего трансформатора

Согласующий трансформатор выбирается по мощности и напряжению первичной и вторичной обмоток.

3.1.1 Выбор мощности трансформатора рекомендуется производить в следующем порядке:

3.1.1.1 Определяется номинальная мощность нагрузки преобразователя

$$P_{\text{ном}} := U_{\text{дно}} \cdot I_{\text{дно}} \quad P_{\text{ном}} = 44000 \quad \text{Вт}$$

3.1.1.2 Рассчитывается номинальная мощность потерь энергии на вентилях преобразователя

ΔU - прямое падение напряжения на вентиле

n_0 - число вентилях обтекаемых током в каждый момент времени в режиме непрерывного тока (при нулевой схеме включения вентилях $n_0=1$, при мостовой схеме $n_0=2$)

$$\Delta U := 1.2 \quad n_0 := 2$$

$$\Delta P_{\text{ном}} := \Delta U \cdot I_{\text{дном}} \cdot n_0 \quad \Delta P_{\text{ном}} = 480 \quad \text{Вт}$$

3.1.1.3 Рассчитывается коэффициент полезного действия преобразователя при номинальной мощности нагрузки

$$\eta_{\text{пр}} := \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{ном}}} \quad \eta_{\text{пр}} = 0.989$$

3.1.1.4 Минимальная допустимая мощность согласующего трансформатора определяется по формуле

$k_p := 0.955$ - коэффициент искажений мощности из тб. 6.1

$$S_{\text{min}} := \frac{P_{\text{ном}}}{k_p \cdot \eta_{\text{пр}}} \quad S_{\text{min}} = 46575.92 \quad \text{кВА}$$

3.1.2 Выбор трансформатора по напряжению

Фазные напряжение первичных обмоток трансформатора должно быть равно фазному напряжению сети U_1 . При этом первичные обмотки трансформатора могут соединяться как звездой, так и треугольником.

Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора должно быть выбрано так, чтобы гарантированно было обеспечено номинальное напряжение на нагрузке цепи постоянного тока при номинальном токе с учетом потерь напряжения на обмотках трансформатора и вентилях. Выбор номинального фазного значения напряжению вторичной обмотки рекомендуется производить в следующем порядке:

3.1.2.1 Производится оценка активного сопротивления короткого замыкания трансформатора

$p'_k := 0.03$ - мощность короткого замыкания в относительных единицах
(выбирается в пределах 0.01-0.03)

$k_{схф} := 2.34$ - коэффициент схемы по фазному напряжению тб. 6.1

$$R'_k := p'_k \cdot \frac{U_{дном} \cdot k_p \cdot \eta_{пр}}{k_{схф}^2 \cdot I_{дном}^2} \quad R'_k = 0.006 \quad \text{Ом}$$

3.1.2.2 Производится оценка коммутационного сопротивления, вносимого источником питания в цепь выпрямленного тока

$u'_k := 0.08$ - где u_k напряжение короткого замыкания в относительных единицах выбирается в пределах 0,04-0,11

$\lambda := \frac{2 \cdot (\pi)}{m}$ - угол повторяемости

$$X'_d := u'_k \cdot \frac{3 \cdot U_{дном} \cdot k_p \cdot \eta_{пр}}{k_{схф}^2 \cdot \lambda \cdot I_{дном}^2} \quad X'_d = 0.043 \quad \text{Ом}$$

3.1.2.3 Производится оценка необходимого значения фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора по формуле

$d := 2$ - количество обмоток трансформатора, обтекаемых током в каждый момент времени в режиме непрерывного тока. При нулевой схеме включения вентилях $d=1$

$$U'_2 := \frac{U_{дном} + \Delta U \cdot \eta_0 + (X'_d + d \cdot R'_k) \cdot I_{дном}}{k_{схф}} \quad U'_2 = 99.733 \quad \text{В}$$

3.1.3 По данным $S_{ном}, U_1, U_2$ производится выбор трансформатора.

При выборе вторичного напряжения трансформатора следует учесть, что трансформаторы имеют на вторичной обмотке отпайки, позволяющие регулировать напряжение вниз на 20% с шагом 5%, выбрать значение фазного напряжения U_2 , как ближайшее большее к оценочному значению U_2 . После выбора трансформатора выписываются его паспортные данные: $S_{ном}, U_1, U_2, u_k, p_k$.

$$S_{ном} := 48000$$

$$U_1 := 230 \quad u_k := 0.052 \quad \text{В}$$

$$U_2 := 106.4 \quad p_k := 0.029 \text{ В}$$

3.1.4 По данным U_1, U_2 рассчитывается коэффициент трансформации

$$k_{\text{тр}} := \frac{U_2}{U_1} \quad k_{\text{тр}} = 0.463$$

3.1.5 По данным $S_{\text{ном}}, U_1, U_2, u_k, p_k$ трансформатора рассчитываются активное, полное и индуктивное сопротивления короткого замыкания трансформатора, приведенные к вторичной обмотке и коммутационное сопротивление преобразователя:

$$R_k := p_k \cdot \frac{U_2^2}{3 \cdot S_{\text{ном}}} \quad R_k = 0.002 \text{ Ом}$$

$$Z_k := u_k \cdot \frac{U_2^2}{S_{\text{ном}}} \quad Z_k = 0.012 \text{ Ом}$$

$$X_k := \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad X_k = 0.012 \text{ Ом}$$

$$X_d := \frac{X_k}{\lambda} \quad X_d = 0.012 \text{ Ом}$$

3.1.6 Определяется максимальное значение ЭДС преобразователя при выбранном значении фазного напряжения U_2

$$E_{d0} := k_{\text{схф}} \cdot U_2 \quad E_{d0} = 248.976 \text{ В}$$

3.1.7 Определяется коэффициент запаса по напряжению при выбранном значении фазного напряжения U_2

$$k_3 := \frac{E_{d0}}{U_{\text{дном}} + \Delta U \cdot n_0 + (X_d + d \cdot R_k) \cdot I_{\text{дном}}} \quad k_3 = 1.104$$

Если полученное значение коэффициента запаса удовлетворяет условию $k_3 = 1,02..1,05$, то трансформатор выбран правильно.

Если полученное значение коэффициента запаса не удовлетворяет

приведенному соотношению, изменить значение U_2 выбором регулирующих отпаяк.

Данное условие невозможно выполнить при выборе любой отпайки, необходимое значение напряжения вторичной обмотки трансформатора 100В

3.1.8 При расчете преобразователя с совместным согласованным управлением выбираются два одинаковых трансформатора по методике, изложенной в п.п. 3.1.1-3.1.7. Полученное значение коэффициента запаса по напряжению должно удовлетворять условию $k_z=1,05-1,1$

3.2 Выбор силовых вентиля преобразователя и расчет их защитных цепей.

Тиристоры выбираются по среднему значению протекающего по ним тока и максимальному значению напряжения, прикладываемому к ним в обратном направлении.

3.2.1 Рассчитывается среднее значение тока, протекающего по тиристорам при номинальном токе нагрузки.

$k_v := \frac{1}{3}$ коэффициент загрузки вентиля по току, равный отношению среднего значения тока вентиля к среднему значению выпрямленного тока. Для трехфазных преобразователей $kV=1/3$ как при нулевой, так и при мостовой схеме включения вентилялей.

$$I_v := I_{\text{дном}} \cdot k_v \quad I_v = 66.667 \text{ А}$$

3.2.2 Определяется максимальное значение напряжения, прикладываемое к тиристорам в обратном направлении

$$U_{\text{max}} := \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_2 \quad U_{\text{max}} = 260.6 \text{ В}$$

3.2.3 Выбирается тип охлаждения тиристоров. Тиристор, работающий с естественным охлаждением, выбирается на ток, превосходящий ток

3.2.4 Тиристор выбирается на напряжение, превосходящее напряжение U_{max} в

3.2.5 По справочнику выбирается тип тиристора Т-200-6 и выписываются его основные параметры:

$I_{\max} := 200 \text{ А}$ - предельный ток тиристора при заданных условиях

$U_{\text{ном}} := 600$ - номинальное напряжение

$U_{\text{VS}} := 1.2 \text{ В}$ - прямое падение напряжения

$t_{\text{вкл}} := 20 \text{ мс}$ - время включения

$I_{\text{уд}} := 0.1 \text{ А}$ - ток удержания

$\frac{dU}{dt}_{\text{кр}} := 100 \text{ В/мкс}$ - критическая скорость нарастания прямого напряжения

$I_{\text{отп}} := 0.3 \text{ А}$ - отпирающий ток управления

3.2.6 Для защиты силовых вентилях от самопроизвольного включения при высокой скорости нарастания прямого напряжения и от перенапряжений применяют специальные защитные (снаберные) цепи. При индивидуальной защите тиристоров снаберные цепи представляют собой последовательные R-C цепи, подключаемые параллельно каждому тиристор преобразователя.

Значения активного сопротивления R_3 и емкости C_3 конденсатора защитной цепи выбираются из нормализованного ряда таким образом, чтобы выполнялись условия:

$R_3 = 10..100 \text{ Ом};$

$R_3 := 30 \text{ Ом}$

$R_H = 0.02 \text{ Ом}$

$C_3 := 10^{-1}$

$C_3 = 0.1 \text{ мФ}$

$$(R_3 + R_H) \cdot C_3 = 3.002 \quad \frac{U_{\max}}{100} = 2.606 \quad (R_3 + R_H) \cdot C_3 \geq \frac{U_{\max}}{(du/dt)_{\text{кр}}}$$

где: $(du/dt)_{\text{кр}}$ критическая скорость нарастания прямого напряжения;

3.3 Расчет параметров цепи выпрямленного тока и выбор дросселей

В схему замещения цепи выпрямленного тока входят последовательно соединенные активное сопротивление R_d , индуктивность L_d и ЭДС нагрузки E_H .

3.3.1 Активное сопротивление цепи выпрямленного тока без учета активных сопротивлений дросселей:

$$R_{d0} := R_H + d \cdot R_k + X_d \quad R_{d0} = 0.036 \quad \text{Ом}$$

где R_H - сопротивления нагрузки; $d \cdot R_k$ - сопротивление, вносимое трансформатором; X_d - коммутационное сопротивление

3.3.2 Индуктивность цепи выпрямленного тока без учета индуктивностей дросселей:

$$L'_H := \frac{E_{d0} \cdot L_H}{I_{d\text{ном}} \cdot \omega} \quad L'_H = 0.0004 \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$\omega = 314.159$$

$$L_k := \frac{X_k}{\omega} \quad \text{- индуктивность К.З. трансформатора}$$

$$L_k = 3.836 \times 10^{-5} \quad \text{Гн}$$

$$L_{d0} := L'_H + L_k \quad L_{d0} = 0.0004 \quad \text{Гн}$$

3.3.3 Выбор дросселя для ограничения уравнивающего тока

Данный пункт выполняется лишь для преобразователей с совместным согласованным управлением. При других способах управления преобразователем следует принять индуктивность дросселя для ограничения уравнивающего тока $L_{dy} = 0$.

Среднее значение уравнивающего тока определяется по формуле

$$L_{dy} := 0.0010 \quad \text{Гн} \quad I'_{y} := I_{d\text{ном}} \cdot 20\% \quad I_y = 40 \quad \text{А} \quad \text{- } I_y \text{ в тех.задании}$$

$$I_y := \frac{E_{d0}}{\omega \cdot (L_k + 2 \cdot L_{dy})} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{m \cdot \tan\left(\frac{\pi}{m}\right)} \right) \quad I_y = 36.197 \quad \text{А}$$

Индуктивность дросселя для ограничения уравнивающего тока L_{dy}

выбирается таким, чтобы уравнивающий ток не превосходил указанного в техническом задании значения.

3.3.4 Выбор сглаживающего дросселя по уровню пульсаций выпрямленного тока

3.3.4.1 Рассчитывается действующее значение гармоники низшего порядка выпрямленного напряжения для угла управления, при котором наблюдаются наибольшие пульсации тока

$$U_{d1} := \sqrt{2} \cdot E_{d0} \cdot \left(\frac{m}{m^2 + 1} \right) \quad U_{d1} = 57.098 \text{ В}$$

где m – число пульсаций выпрямленного напряжения за период напряжения сети

3.3.4.2 Рассчитывается амплитуда пульсаций выпрямленного тока

$$R_d := 0.075 \text{ Ом}$$

$$L_{dc} := 0.008$$

$$I_{d1} := \frac{U_{d1}}{\sqrt{R_d^2 + [m \cdot \omega \cdot (L_{d0} + L_{dc})]^2}} \quad I_{d1} = 3.608$$

3.3.4.3 Рассчитывается коэффициент пульсаций выпрямленного тока

$$q_1 := 5\% \cdot I_{dном} \quad q_1 = 10$$

$$q_i := \frac{I_{d1} \cdot 100}{I_{dном}} \quad q_i = 1.804 \%$$

Если коэффициент пульсаций выпрямленного тока превосходит заданную величину, то индуктивность цепи постоянного тока следует увеличить включением в цепь нагрузки дросселя, имеющего индуктивность L_{dc} (значение L_{dc} выбирается из нормализованного ряда).

3.3.5 Выбор сглаживающего дросселя по значению гранично-непрерывного выпрямленного тока

$$I_0 := I_{\text{дном}} \cdot 9\% \quad I_0 = 18 \quad \text{А}$$

$$I_0 := \frac{E_{\text{d0}}}{\omega \cdot (L_{\text{d0}} + L_{\text{dc}})} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{m \cdot \tan\left(\frac{\pi}{m}\right)} \right) \quad I_0 = 8.789 \quad \text{А}$$

Если максимальное значение гранично-непрерывного тока I_0 превосходит заданную техническим заданием величину, то индуктивность дросселя L_{dc} в цепи выпрямленного тока следует увеличить. $I_0' = 18.0 \text{ А}$

3.3.6 Рассчитывается значение индуктивности цепи выпрямленного тока с учетом индуктивностей дросселей

$$L_{\text{d}} := R_{\text{d0}} + 2 \cdot L_{\text{dy}} + L_{\text{dc}} \quad L_{\text{d}} = 0.046 \quad \text{мГн}$$

3.3.6 Рассчитывается значение активного сопротивления цепи выпрямленного тока с учетом активных сопротивлений дросселей

$$R_{\text{dy}} := 0.001 \cdot \omega \cdot L_{\text{dy}} \quad R_{\text{dy}} = 0.0003 \quad \text{Ом}$$

$$R_{\text{dc}} := 0.001 \cdot \omega \cdot L_{\text{dc}} \quad R_{\text{dc}} = 0.003 \quad \text{Ом}$$

$$R_{\text{d}} := R_{\text{d0}} + 2 \cdot R_{\text{dy}} + R_{\text{dc}} \quad R_{\text{d}} = 0.039 \quad \text{Ом}$$

4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Тиристорные преобразователи с числом пульсаций выпрямленного напряжения $m=3$ и 6 проектируются реверсивными и содержат два комплекта нереверсивных преобразователей и, соответственно, содержат две системы импульсно фазового управления (СИФУ).

Двенадцатипульсные преобразователи ($m=12$) выполняются нереверсивными, но комплектуются также двумя нереверсивными преобразователями и, соответственно, содержат две системы импульсно фазового управления (СИФУ). Реверсивные преобразователи содержат систему управления реверсивным преобразователем

4.1 Требования к системе управления преобразователя

4.1.1 Система управления преобразователем должна быть реализована на операционных усилителях

4.1.2 Система управления преобразователем должна обеспечивать изменение выходного напряжения преобразователя в пределах $U_{ном} > U_d > U_{ном}$ при изменении управляющего напряжения u_{0i} от U_b до U_b , при этом должно выполняться условие: $U_d=0$ при $u_{0i} = 0$

4.1.3 Базовое напряжение системы управления $U_b = (0,6 \div 0,8)U_{пит}$, где $U_{пит}$ - напряжение питания операционных усилителей.

При любых значениях управляющего напряжения угол управления преобразователем должен принадлежать интервалу $[\alpha; \alpha_{max}]$ (при расчете преобразователя с совместным согласованным управлением - $[\alpha; \alpha_{max}]$), где $\alpha_{max} = 30 \div 50$ угол запаса по углу управления; α_{max} - максимальное значение угла коммутации

$$U_b = 10 \text{ В} \quad U_{пит} = 15 \text{ В} \quad e := 3$$

4.1.4 Амплитуда управляющего импульса должна превышать значение тока гарантированного включения тиристора не должна превышать значения допустимого тока управления тиристора.

4.1.5 Длительность управляющего импульса должна быть достаточной для того, чтобы тиристор открывался при заданных параметрах цепи выпрямленного тока.

4.1.6 Система управления должна быть устойчива к высокочастотным помехам

4.1.7 Форма опорных напряжений СИФУ - синусоидальные.

4.1 Система импульсно-фазового управления нереверсивного тиристорного преобразователя (СИФУ)

Система импульсно-фазового управления m -пульсного нереверсивного тиристорного преобразователя является многоканальной и содержит m устройств фазового смещения управляющих импульсов (ФСУ), устройство распределения импульсов и канала формирования управляющего воздействия рис. 4.1

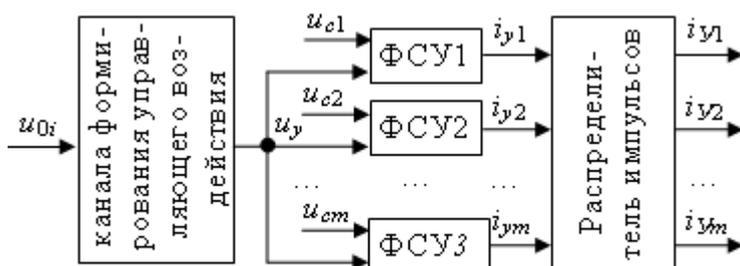


Рис. 4.1. Структура системы импульсно-фазового управления

4.2.1 Устройство фазового смещения управляющих импульсов СИФУ (ФСУ) предназначено для фазового сдвига импульсов управления тиристорами относительно сетевого напряжения.

Импульсы канала, имеющего номер k , сдвигаются по фазе относительно точки естественной коммутации на угол управления $[0, \pi]$. Величина угла управления регулируется управляющим напряжением u_{yi} . Устройство фазового смещения управляющих импульсов СИФУ состоит из датчика сетевого напряжения (ДСН); формирователя опорного напряжения (ФОН), элемента сравнения (ЭС), формирователя импульсов (ФИ) и усилителя импульсов (УИ) рис.4.0

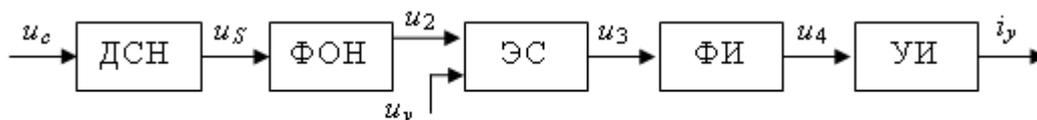


Рис. 4.2. Структура фазового смещения импульсов устройства (ФСУ)

4.2.1.1 Датчик сетевого напряжения служит для получения информации с сетевом напряжении.

Система управления преобразователем и сетевые напряжения должны быть гальванически развязаны. В качестве датчиков сетевого напряжения используются трансформаторы или транзисторные оптопары. При синусоидальной форме опорных напряжений, как правило, применяют трансформаторную развязку. Для получения линейно изменяющихся опорных напряжений может применяться как трансформаторная, так и оптоэлектронная развязка. При трансформаторной развязке напряжение с синхронизирующего трансформатора подается на вход компаратора, реализующего знаковую функцию. Выходное напряжение компаратора принимается за выходное напряжение датчиков сетевого напряжения u_S . Выходное напряжение датчиков сетевого напряжения u_S подается на формирователь опорного напряжения.

4.2.1.2 Формирователь опорного напряжения

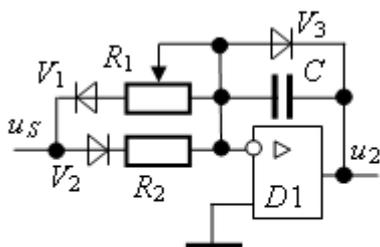


Рис. 4.3. Формирователь опорного напряжения (ФОН)

(ФОН) формирует на интервале $[0, \pi]$ монотонно возрастающее или монотонно убывающее напряжение, при этом наибольшее распространение получили линейная и синусоидальная формы опорного напряжения. В начале интервала опорное напряжение равно нулю, к концу интервала его величина достигает базового значения U_b . Пример схемной реализации ФОН приведен на .

На вход ФОН должны подаваться сигналы, синхронизированные с питающей сетью. В качестве синхронизирующего напряжения для канала с номером k выбирают напряжение сети, которое сохраняет знак на интервале , начинающемся

При положительном напряжении на входе выходное напряжение ФОН равно нулю, при отрицательных входных напряжениях происходит интегрирование входного сигнала с постоянной времени $T=R_1C$. Постоянная времени интегрирующей цепи ФОН выбирается так, чтобы было

выполнено условие

$$T = R_1 \cdot C > \frac{0,8 - 0,9}{\omega}$$

$$R1 := 5.6 \cdot 10^4 \text{ Ом}$$

$$R2 := (1 \cdot 10)^4 \text{ Ом} \quad C1 := 0.051 \cdot 10^{-6} \text{ пФ}$$

$$T := R1 \cdot C1$$

$$T = 2.856 \times 10^{-3}$$

$$\frac{0.8}{\omega} = 2.546 \times 10^{-3}$$

4.2.1.3 Элемент сравнения сравнивает опорное напряжение с напряжением управления и в момент их равенства скачком изменяет напряжение на своем выходе. Схема элемента сравнения представлена на рис 4.4

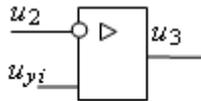


Рис. 4.4. Элемент сравнения

4.2.1.4 Формирователь импульсов предназначен для формирования прямоугольных импульсов заданной длительности.

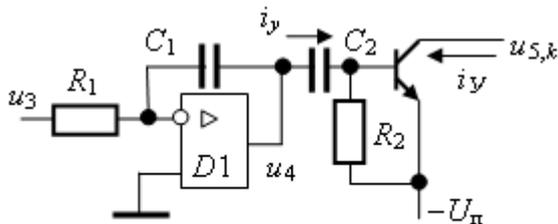


Рис. 4.5. Схема усилителя-формирователя импульсов

Пример схемы объединяющей формирователь и усилитель импульсов приведен на рис 4.5. Длительность импульса должна быть больше времени нарастания тока тиристора до тока удержания $I_{уд}$. Необходимая длительность импульса должна удовлетворять условию:

$$t_{II} = R_1 C_1 \geq \frac{2 \cdot L \cdot I_{уд}}{\omega \cdot U_m}$$

$$U_m := \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\phi}$$

$$U_m = 538.888$$

$$t_{II} := \left(\frac{2 \cdot L_d \cdot I_{уд}}{\omega \cdot U_m} \right)$$

$$t_{II} = 5.442 \times 10^{-8}$$

$$t_{иRC} := 2.2 \cdot 10^3 \cdot 3.6 \cdot 10^{-9}$$

$$t_{иRC} = 7.92 \times 10^{-6}$$

$$R11 := 2.2 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$C11 := 3.6 \cdot 10^{-9} \text{ нФ}$$

где $R11$, $C11$ параметры элементов, входящих в состав одновибратора; L индуктивность в цепи выпрямленного тока; ω и U_m частота сети и амплитуда

напряжения, $I_{уд}$ ток удержания тиристора. $R_{11}=5\text{кОм}$ $C_{11}=0.36\text{нФ}$

4.2.1.5 Усилитель импульса обеспечивает заданную амплитуду импульсов тока управления.

Амплитуда импульса тока управления должна удовлетворять условию:

$$I_{y\max} = \beta \cdot C_2 \cdot p u_4 = \beta \cdot \frac{2 \cdot C_2 \cdot U_n}{C_1 \cdot R_1} > I_y,$$

I_y - отпирающий ток управления = $I_{отп} = 0.3$ А

$\beta := 100$ - коэффициент усиления транзистора

$U_n := 15$ - напряжение питания системы управления

$C_{22} := 0.82 \cdot 10^{-9}$

$$I_{y\max} := \beta \cdot 2 \cdot C_{22} \cdot \frac{U_{\text{пит}}}{C_{11} \cdot R_{11}} \quad I_{y\max} = 0.311 \text{ А}$$

4.2.2 Устройство распределения импульсов распределяет импульсы каналов управления СИФУ по цепям управления тиристорам.

4.2.2.1 В тиристорных преобразователях с нулевой схемой включения импульсов каждый канал работает на свой тиристор. Соответствие между напряжением синхронизации и тиристором фазы в трехфазной нулевой схеме: $VA - u_{AC}$; $VB - u_{BA}$; $VC - u_{CB}$

где u_{AC} , u_{BA} , u_{CB} линейные напряжения трехфазной сети, снимаемые с датчиков напряжений;

VA ; VB ; VC - тиристоры, включенные в фазы A, B, C . На рис 4,6 показано соответствие синхронизирующих напряжений каналов включаемых ими тиристорам

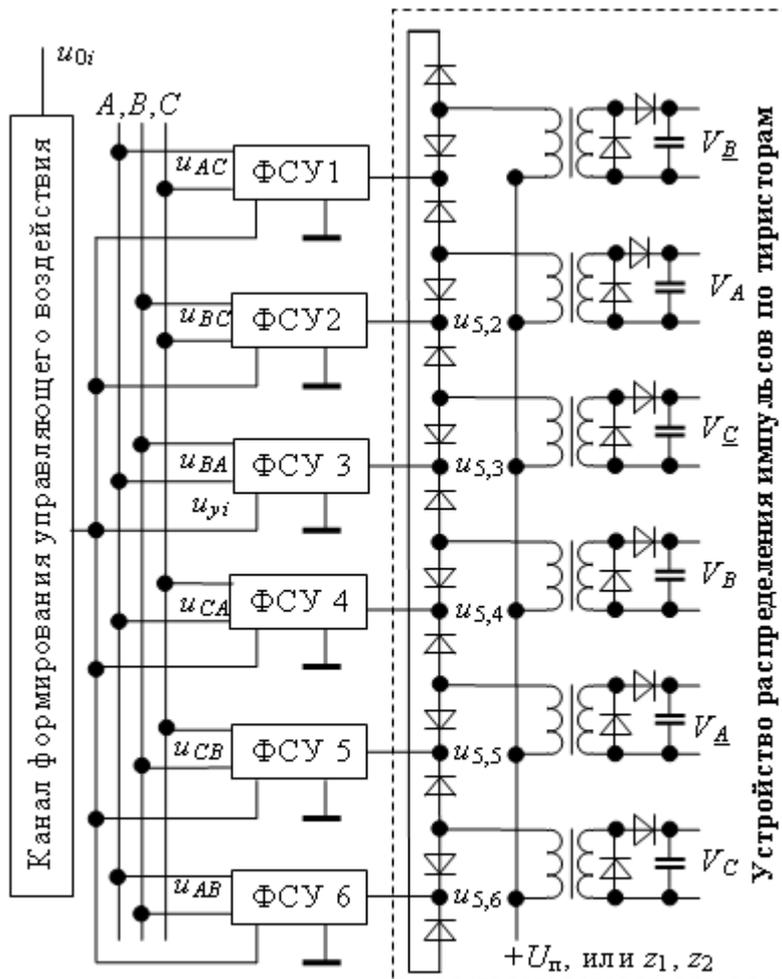


Рис. 4.6. Схема СИФУ трехфазного мостового преобразователя

4.2.3 Канал формирования управляющего воздействия состоит из блока нормализации управляющего напряжения, блока ограничения управляющего напряжения, входной фильтра и блока линеаризации рис 4.7.

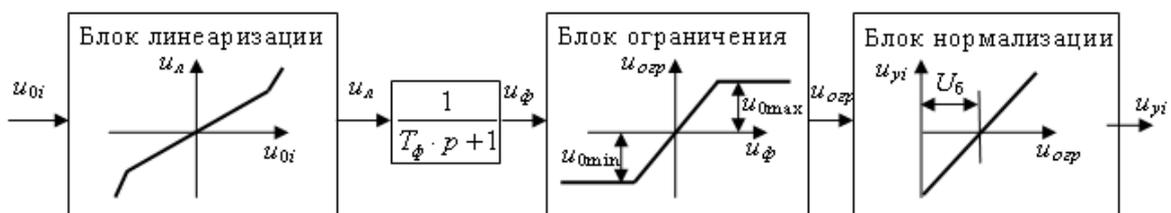


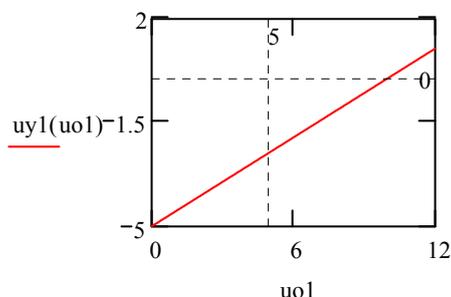
Рис. 4.7. Структурная схема канала формирования управляющего воздействия

4.2.3.1 Блок нормализации управляющего напряжения обеспечивает равенство нулю выходного напряжения преобразователя при нулевом значении входного напряжения.

Для этого блок нормализации сигнала управления СИФУ, который должен выполнять преобразование:

$$u_{yi} = (u_{0i} - U_6)/2.$$

$$u_{01} := 0, 0.1..12 \quad u_{y1}(u_{01}) := \frac{u_{01} - U_6}{2}$$



4.2.3.2. Блок ограничения управляющего напряжения обеспечивает изменение управляющего напряжения в допустимых пределах.

При любых значениях управляющего напряжения угол управления преобразователем должен принадлежать интервалу $\alpha \in [\alpha_{\min}; \alpha_{\max}]$.

Для преобразователей всех преобразователей кроме преобразователей с совместным согласованным управлением

$$\alpha \in [\varepsilon + \gamma_{\max}; \pi - \gamma_{\max} - \varepsilon],$$

а для преобразователей с совместным согласованным управлением

$$\alpha \in [\varepsilon + \gamma_{\max}; \pi - \gamma_{\max} - \varepsilon].$$

Для этого на область изменения сигнала управления СИФУ u_{0i} должны быть наложены ограничения

$$u_{01}, u_{02} \in [-u_{0\min}, u_{0\max}].$$

При линейном опорном напряжении

$$u_{0\min} = U_6 \cdot (1 - \alpha_{\max} / \pi); \quad u_{0\max} = U_6 \cdot (1 - \alpha_{\min} / \pi).$$

При синусоидальном опорном напряжении

$$u_{0\min} = U_6 \cdot \cos(\alpha_{\max}); \quad u_{0\max} = U_6 \cdot \cos(\alpha_{\min}).$$

4.2.3.3 Входной RC-фильтр уменьшает амплитуду высокочастотных помех в составе входного напряжения, что позволяет устранить появление в каналах управления случайных импульсов.

Пример технической реализации блока нормализации сигнала управления СИФ, блока ограничения управляющего напряжения и фильтра приведен на рис. 4.9

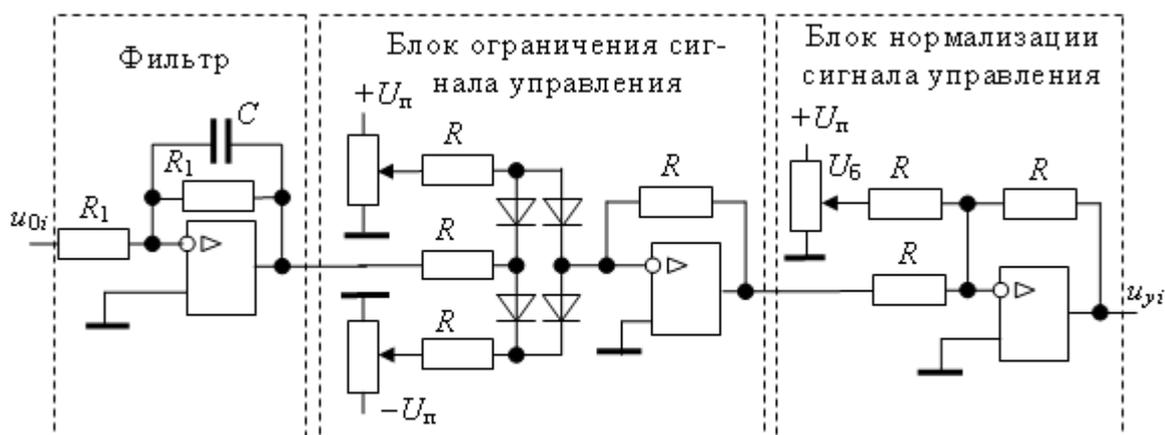


Рис. 4.9. Пример технической реализации канала формирования управляющих импульсов: блока нормализации, блока ограничения и фильтра

4.2.3.4 Блок линеаризации включается на входе системы управления и предназначен для линеаризации регулировочной характеристики преобразователя.

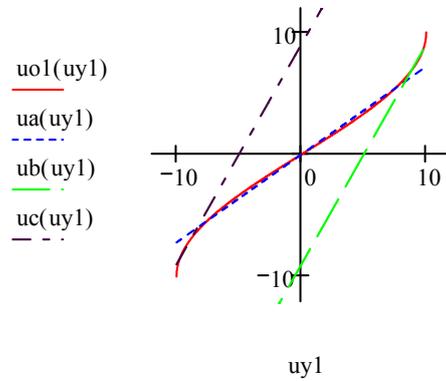
Форма опорных напряжений СИФУ выбирается в соответствии с заданием на курсовое проектирование. При линейных опорных напряжениях на входе СИФ должно быть установлено звено линеаризации характеристики «вход-выход» передаточной функцией

$$u_{0i} = \frac{2}{\pi} \cdot U_{\delta} \cdot \arcsin\left(\frac{u_{yi}}{U_{\delta}}\right),$$

$$uy1 := -10, -9.99 \dots 10 \quad ua(uy1) := 0.72 \cdot uy1 \quad ub(uy1) := 1.8 \cdot uy1 - 9 \quad uc(uy1) := 9 + 1.8 \cdot uy1$$

$$uo1(uy1) := 2 \cdot \frac{U_{\delta}}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{uy1}{U_{\delta}}\right)$$

$$u0 := \min(uc(uy1)), \max(ua(uy1), ub(uy1))$$



Пример технической реализации блока линейризации приведен на . В проекте необходимо рациональным образом выбрать значения напряжений U_1 , U_2 , U_3 . в соответствии с формулами, приведенными на полях выбрать значения сопротивлений

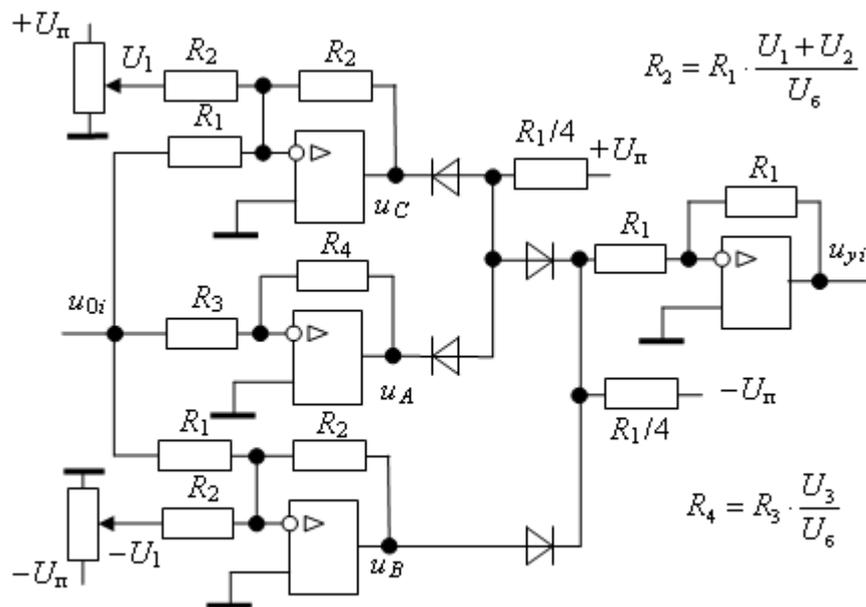


Рис. 4.11. Пример технической реализации блока линейризации

4.3 Система управления реверсивного тиристорного преобразователя

4.3.1 Для преобразователей с согласованным управлением напряжения управления СИФУ1 и СИФУ2 u_{01} и u_{02} должны быть связаны с напряжением управления реверсивного

преобразователя u_0 соотношениями:

$$u_{01} = u_0; u_{02} = -u_0.$$

5 Статические и динамические характеристики тиристорных преобразователей

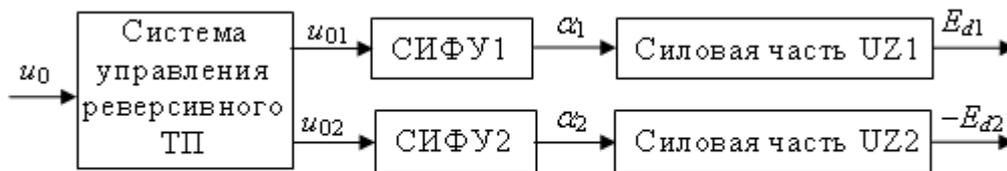


Рис. 5.1. Структурная схема реверсивного тиристорного преобразователя

5.1.1 Максимальный угол коммутации

$$\gamma_{\max} := \arccos \left(1 - 2 \cdot X_d \cdot \frac{I_{\text{дном}}}{E_{d0}} \right)$$

$$\gamma_{\max} = 0.193$$

5.1.2 Интервал изменения напряжений управления углов управления СИФУ1 и СИФУ2

$$\varepsilon := 3 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \varepsilon = 0.052 \text{ рад}$$

$$\alpha_{\max} := \pi - \gamma_{\max} - \varepsilon \quad \alpha_{\max} = 2.897 \text{ рад}$$

$$\alpha_{\min} := \varepsilon + \gamma_{\max} \quad \alpha_{\min} = 0.245 \text{ рад}$$

$$\alpha \in [\alpha_{\min}; \alpha_{\max}], \quad \alpha := (14..166) \text{ град}$$

$$u_{0\min} := U_G \cdot \cos(\alpha_{\max}) \quad u_{0\min} = -9.702$$

$$u_{0\max} := U_G \cdot \cos(\alpha_{\min}) \quad u_{0\max} = 9.702$$

-для блока ограничения упр. напряжения

5.1.3 Напряжение рассогласования

$$\sigma := 0$$

$$u\sigma := U_{\sigma} \cdot \sin(\sigma) \quad u\sigma = 0$$

где $\sigma=0$ для согласованном управлении

5.1.4 Интервал изменения напряжений управления СИФУ1 и СИФУ2

$$u_{01}, u_{02} \in [u_{0\min}, u_{0\max}],$$

$$u_{0\min} := U_{\sigma} \cdot \cos(\alpha_{\max}) \quad u_{0\min} = -9.702 \text{ В}$$

$$u_{0\max} := U_{\sigma} \cdot \cos(\alpha_{\min}) \quad u_{0\max} = 9.702 \text{ В}$$

5.1.5 Формулы для построения функций $u_{01}(u_0)$ и $u_{02}(u_0)$:

$$u_{01}(u_0) = \text{if}(u_0 > u_{0\max} + u\sigma, u_{0\max}, \text{if}(u_0 < u_{0\min} + u\sigma, u_{0\min}, u_0 - u\sigma));$$

$$u_{02}(u_0) = \text{if}(u_0 < -u_{0\max} - u\sigma, u_{0\max}, \text{if}(u_0 > -u_{0\min} - u\sigma, u_{0\min}, -u_0 - u\sigma)).$$

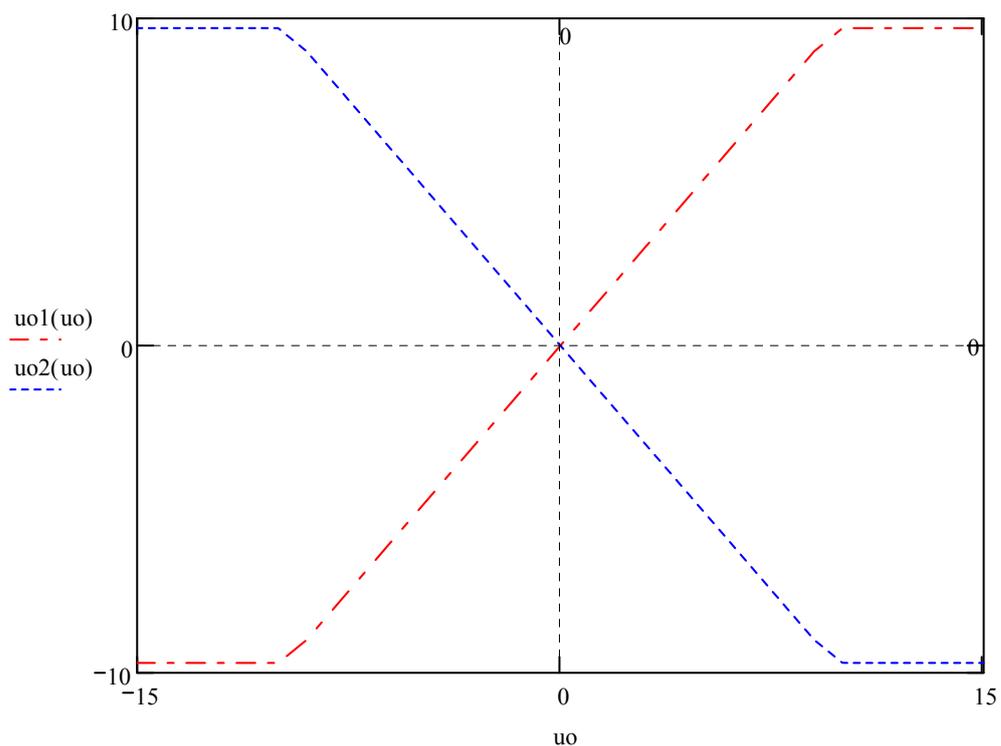
где $u_0 \in [-15, 15]$ Вольт.

Зависимости $u_{01}(u_0)$ и $u_{02}(u_0)$ строятся на одном рисунке.

$$u_0 := -15..15$$

$$u_{01}(u_0) := \text{if}(u_0 > u_{0\max} + u\sigma, u_{0\max}, \text{if}(u_0 < u_{0\min} + u\sigma, u_{0\min}, u_0 - u\sigma))$$

$$u_{02}(u_0) := \text{if}(u_0 < -u_{0\max} - u\sigma, u_{0\max}, \text{if}(u_0 > -u_{0\min} - u\sigma, u_{0\min}, -u_0 - u\sigma))$$



5.2 Передаточная функция СИФУ тиристорного преобразователя (регулирующая характеристика СИФУ)

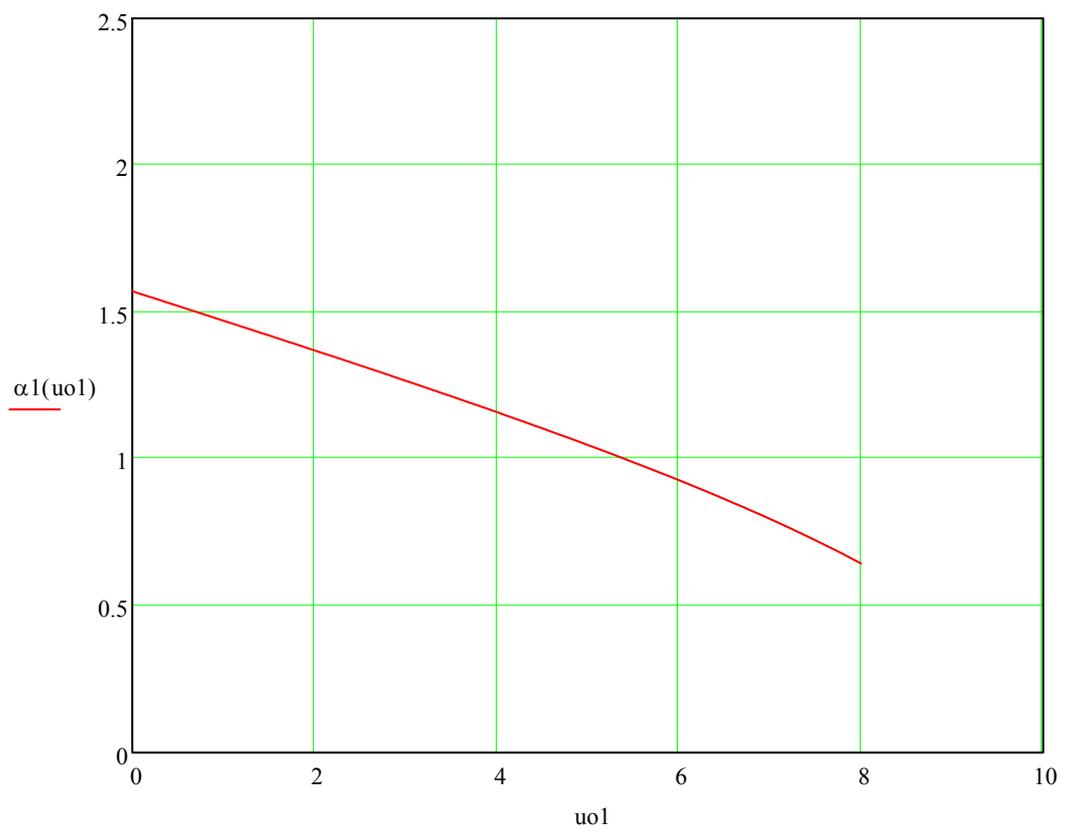
$$\alpha_1(u_{01}); \alpha_2(u_{02})$$

Передаточная функция СИФУ тиристорного преобразователя $\alpha_1(u_{01}); \alpha_2(u_{02})$ совпадают. Поэтому строится одна зависимость.

где $u \in [u_{0min}, u_{0max}]$

$u_{01} := u_{0min}..u_{0max}$

$$\alpha_1(u_{01}) := \arccos\left(\frac{u_{01}}{U_6}\right) \quad - \text{при синусоидальном опорном напряжении}$$



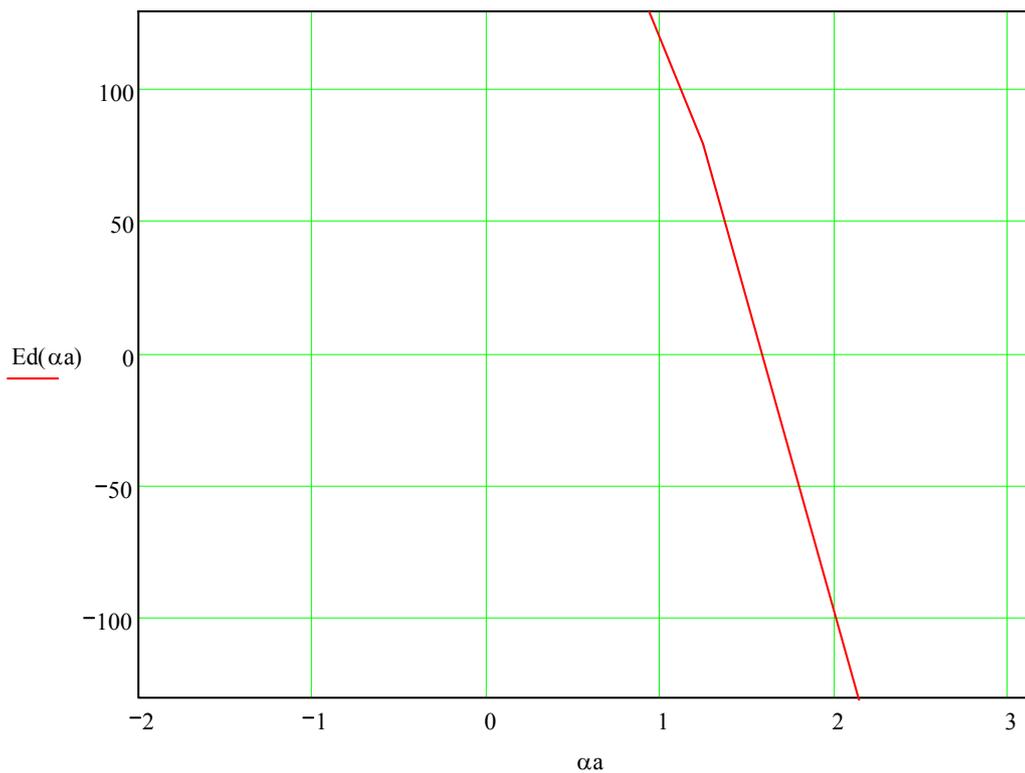
5.3 Статическая передаточная функция силовой части тиристорного преобразователя (регулирующая характеристика силовой части)

Передаточная функция СИФУ тиристорного преобразователя $E_{d1}(\alpha_1)$; $E_{d2}(\alpha_2)$ совпадают. Поэтому строится одна зависимость $E_d(\alpha) = E_{d0} \cdot \cos(\alpha)$, где $\alpha \in [\alpha_{\min}; \alpha_{\max}]$.

$$\alpha \in [\alpha_{\min}; \alpha_{\max}]$$

$$E_d(\alpha) := E_{d0} \cdot \cos(\alpha)$$

$$\alpha := 0.1 \cdot \pi, 0.2 \cdot \pi \dots 0.9 \cdot \pi$$



$$E_{d11} := E_{d0} \cdot \cos\left(\frac{14 \cdot \pi}{180}\right)$$

$$E_{d11} = 241.58$$

$$E_{d22} := E_{d0} \cdot \cos\left(166 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$E_{d22} = -241.58$$

$$u_0 := -10, -9.9..10$$

$$u_{01}(u_0) := u_0$$

$$u_{02}(u_0) := -u_0$$

5.4 Статическая передаточная функция тиристорного преобразователя (регулировочная характеристика тиристорного преобразователя)

Статическая передаточная функция преобразователей (регулировочная характеристика) - статическая зависимость среднего значения выпрямленной э.д.с. от напряжения управления u_0 :

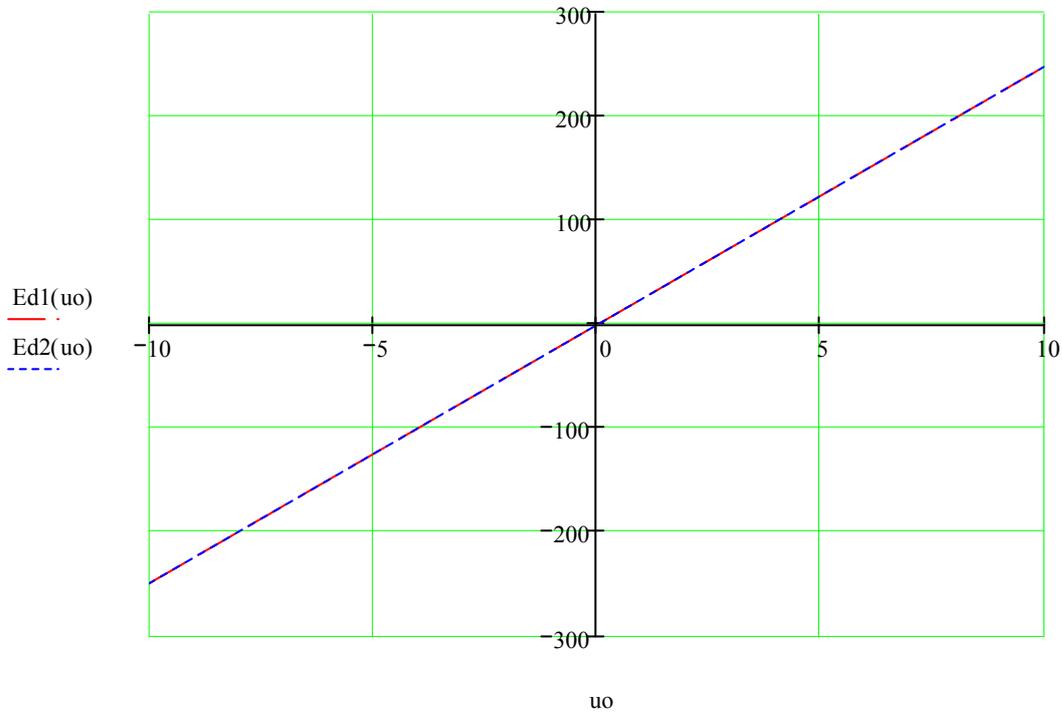
$$E_{d1}(u_0) = E_{d0} \cdot \cos(\alpha(u_{01}(u_0))); E_{d2}(u_0) = -E_{d0} \cdot \cos(\alpha(u_{02}(u_0)))$$

, где $u_0 \in [-U_B - u_\alpha, U_B + u_\alpha]$.

Зависимости $E_{d1}(u_0)$; $E_{d2}(u_0)$ строятся на одном рисунке.

$$E_{d1}(u_o) := E_{d0} \cdot \cos(\alpha_1(u_{o1}(u_o)))$$

$$E_{d2}(u_o) := -E_{d0} \cdot \cos(\alpha_2(u_{o2}(u_o)))$$



5.5 Переходная характеристика тиристорного преобразователя

Тиристорный преобразователь, работающий в режиме непрерывного тока, может быть представлен апериодическим звеном первого порядка. Статический коэффициент передачи звена $k = E_{d0} / U_6$, постоянная времени $T \geq 2 \cdot \pi / (\omega \cdot m)$ (T – постоянная времени высокочастотного фильтра). $T > 0.02$

В пояснительной записке необходимо привести графики переходных функций тиристорного преобразователя. Переходная функция преобразователя является реакцией преобразователя на управляющий сигнал $u_0 = u_0^{(n)} \cdot 1(t)$ и строится по формуле

$$U_d(t) = E_{d1}(u_0^{(n)}) \cdot (1 - \exp(-t/T)), \text{ где } n = 1, 2, 3, 4; t \in [0; 5 \cdot T].$$

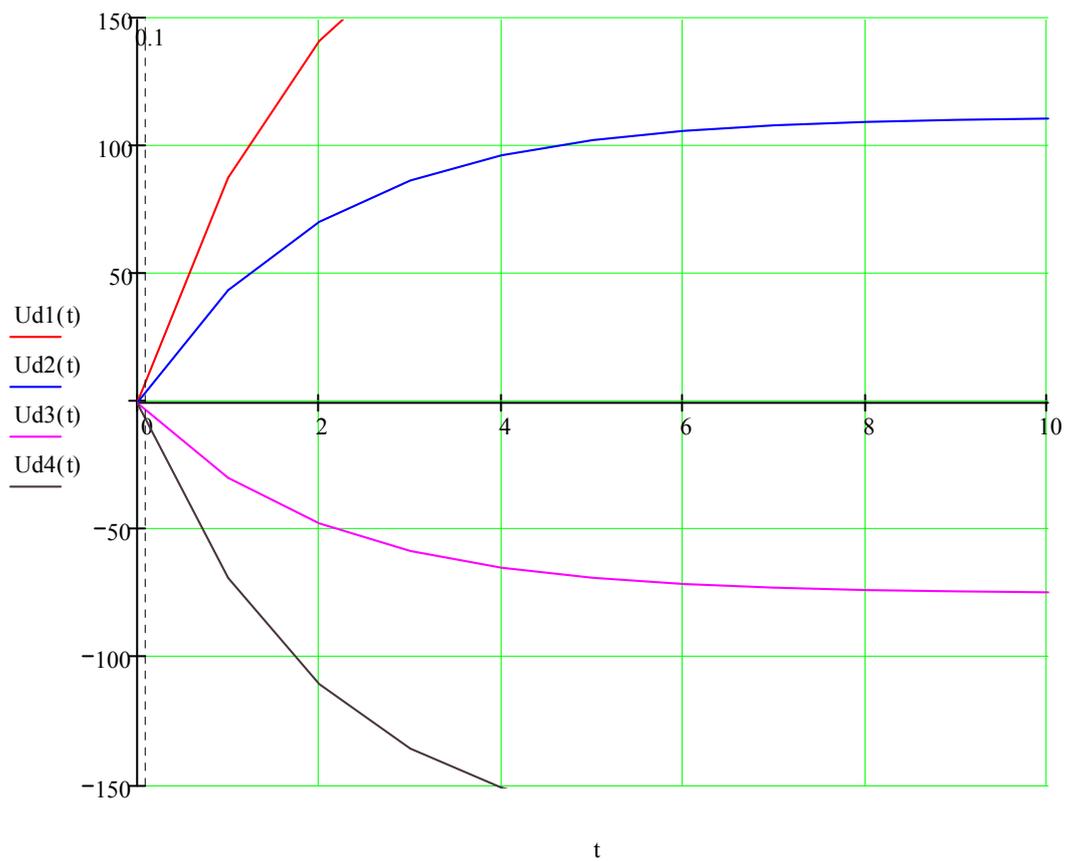
$$\text{ORIGIN} := 1 \quad T := 2 \cdot \frac{\pi}{\omega \cdot m} \quad T = 0.003$$

$$T := 2 \quad t := 0..5 \cdot T$$

$$k := \frac{E_{d0}}{U_6} \quad k = 24.898 \quad u_0(t) := \begin{pmatrix} 9 \\ 4.5 \\ -3 \\ -7 \end{pmatrix} \quad u_0 := u_0(t)$$

$$U_{d1}(t) := E_{d1}(u_{01}) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{T}\right)\right) \quad U_{d2}(t) := E_{d1}(u_{02}) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{T}\right)\right)$$

$$U_{d3}(t) := E_{d1}(u_{03}) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{T}\right)\right) \quad U_{d4}(t) := E_{d1}(u_{04}) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{T}\right)\right)$$



5.6 Нагрузочные характеристики тиристорных преобразователей

Нагрузочные характеристики тиристорного преобразователя строятся для четырех значений напряжения управления $u_0^{(n)}$, $n = 1, 2, 3, 4$, определенных в задании на курсовое проектирование.

5.6.1 Нагрузочные характеристики строятся по формуле

$$U_d(I_d, u_0^{(n)}) = \text{if}(I_d > 0, E_{d1}(u_0^{(n)}), -E_{d2}(u_0^{(n)})) - n_0 \cdot \Delta U - R_d \cdot I_d.$$

$$I_d := -I_{d\text{НОМ}} \cdot I_{d\text{НОМ}}$$

$$U_{d0}(I_d) := E_{d0} - R_d \cdot |I_d|$$

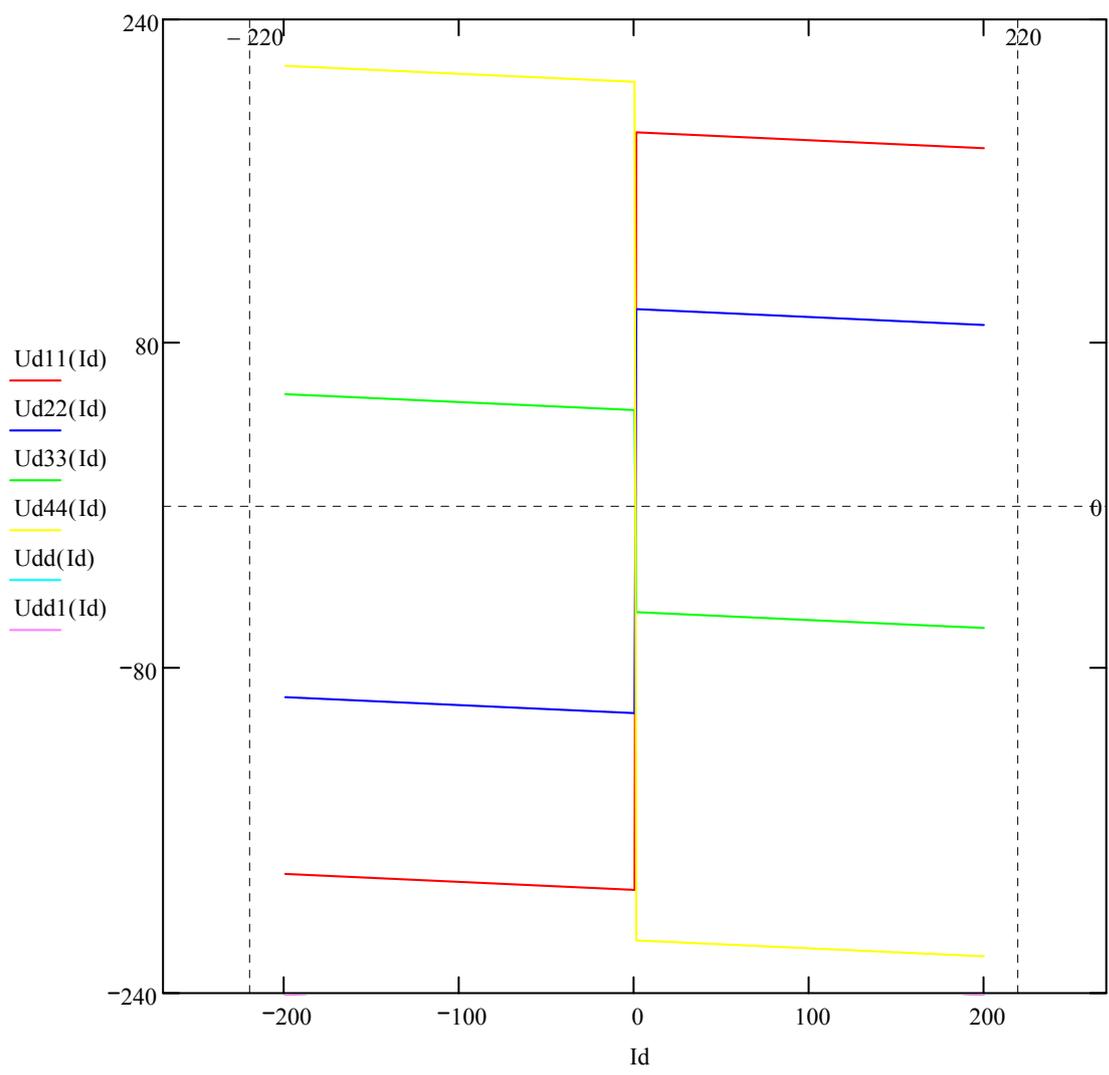
$$U_{d1}(I_d) := -(E_{d0} - R_d \cdot |I_d|)$$

$$U_{d11}(I_d) := \text{if}(I_d > 0, E_{d1}(U_{01}), -E_{d2}(U_{01})) - n_0 \cdot \Delta U - R_d \cdot I_d$$

$$U_{d22}(I_d) := \text{if}(I_d > 0, E_{d1}(U_{02}), -E_{d2}(U_{02})) - n_0 \cdot \Delta U - R_d \cdot I_d$$

$$U_{d33}(I_d) := \text{if}(I_d > 0, E_{d1}(U_{03}), -E_{d2}(U_{03})) - n_0 \cdot \Delta U - R_d \cdot I_d$$

$$U_{d44}(I_d) := \text{if}(I_d > 0, E_{d1}(U_{04}), -E_{d2}(U_{04})) - n_0 \cdot \Delta U - R_d \cdot I_d$$



5.7 Временные диаграммы токов и напряжений

$$\alpha_{12} := \alpha_1(u_{01}(U_{02}))$$

$$\alpha_{22} := \alpha_1(u_{02}(U_{02}))$$

5.7.1 при угле управления $\alpha < (\pi - \lambda)/2$

$$I_d := I_{dНОМ}$$

$$\alpha := \alpha_{12}$$

$$t := 0 .. 2 \cdot \pi$$

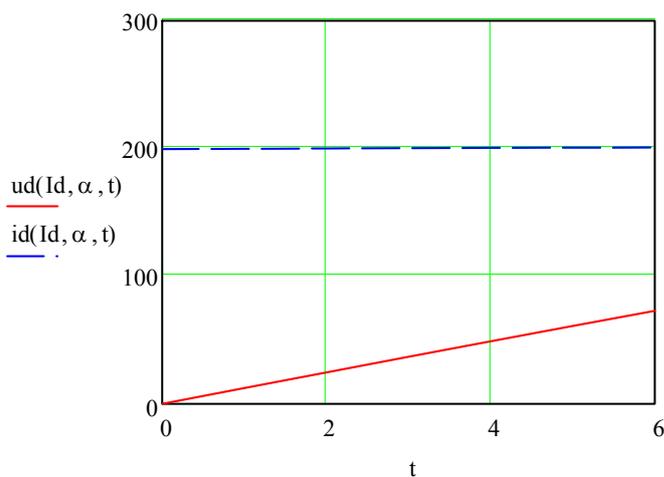
$$\tau(\alpha, t) := \lambda \cdot \left[\left(\frac{t - \alpha}{\lambda} \right) - \text{floor} \left(\frac{t - \alpha}{\lambda} \right) \right]$$

$$e(k, \alpha, t) := \left(\frac{\lambda \cdot E_{d0}}{2 \cdot \sin \left(\frac{\lambda}{2} \right)} \right) \cdot \cos \left[\tau(\alpha, t) + \lambda \cdot \left(\frac{1 - 2 \cdot k}{2} \right) + \alpha \right]$$

$$\gamma(I_d, \alpha) := \arccos \left(\cos(\alpha) - \frac{2 \cdot X_d \cdot I_d}{E_{d0}} \right) - \alpha \qquad \gamma(I_d, \alpha) = 0.02$$

$$u_d(I_d, \alpha, t) := \text{if} \left[\tau(\alpha, t) < \gamma(I_d, \alpha), \left(\frac{e(1, \alpha, t) + e(0, \alpha, t)}{2} \right), e(1, \alpha, t) \right]$$

$$i_d(I_d, \alpha, t) := I_d + \left(\frac{E_{d0}}{\omega \cdot L_d} \right) \cdot \left[\frac{\lambda \cdot \sin \left[\tau(\alpha, t) - \left(\frac{\lambda}{2} \right) + \alpha \right]}{2 \cdot \sin \left(\frac{\lambda}{2} \right)} + \left[\left(\frac{\lambda}{2} \right) - \tau(\alpha, t) \right] \cdot \cos(\alpha) - \sin(\alpha) \right]$$



$i_d(I_d, \alpha, t) =$	$u_d(I_d, \alpha, t) =$
199.416	1.596·10 ⁻¹⁴
199.721	12.301
199.986	24.575
200.21	36.794
200.395	48.931
200.541	60.959
200.648	72.851

$$I_d := -I_{dНОМ}$$

$$\alpha := \alpha_{22}$$

$$t := 0 .. 2 \cdot \pi$$

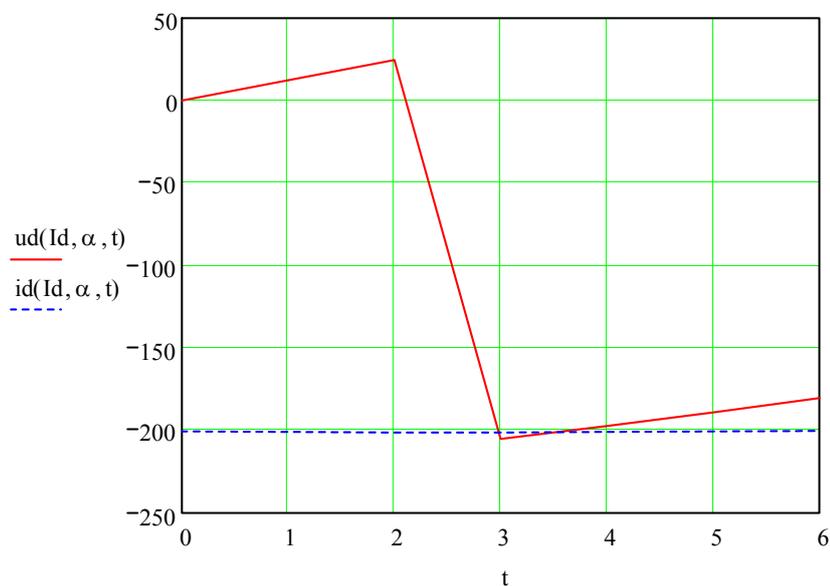
$$\tau(\alpha, t) := \lambda \cdot \left[\left(\frac{t - \alpha}{\lambda} \right) - \text{floor} \left(\frac{t - \alpha}{\lambda} \right) \right]$$

$$e(k, \alpha, t) := \left(\frac{\lambda \cdot E_{d0}}{2 \cdot \sin \left(\frac{\lambda}{2} \right)} \right) \cdot \cos \left[\tau(\alpha, t) + \lambda \cdot \left(\frac{1 - 2 \cdot k}{2} \right) + \alpha \right]$$

$$\gamma(\text{Id}, \alpha) := \text{acos} \left(\cos(\alpha) - \frac{2 \cdot X_d \cdot \text{Id}}{E_{d0}} \right) - \alpha$$

$$\text{ud}(\text{Id}, \alpha, t) := \text{if} \left[\tau(\alpha, t) < \gamma(\text{Id}, \alpha), \left(\frac{e(1, \alpha, t) + e(0, \alpha, t)}{2} \right), e(1, \alpha, t) \right]$$

$$\text{id}(\text{Id}, \alpha, t) := \text{Id} + \left(\frac{E_{d0}}{\omega \cdot L_d} \right) \cdot \left[\frac{\lambda \cdot \sin \left[\tau(\alpha, t) - \left(\frac{\lambda}{2} \right) + \alpha \right]}{2 \cdot \sin \left(\frac{\lambda}{2} \right)} + \left[\left(\frac{\lambda}{2} \right) - \tau(\alpha, t) \right] \cdot \cos(\alpha) - \sin(\alpha) \right]$$



5.7.2 Временные диаграммы при угле управления $\alpha > (\pi - \lambda)/2$

5.7.2 Временные диаграммы при угле управления $\alpha > (\pi - \lambda)/2$

$$I_d := I_{d\text{ном}}$$

$$\alpha := \alpha_{12}$$

$$t := 0 \dots 2 \cdot \pi$$

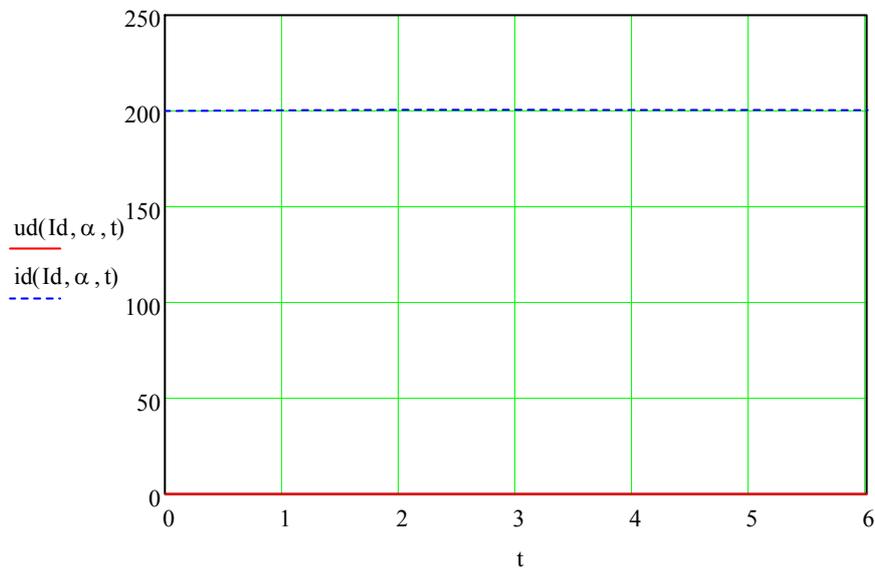
$$s(\alpha) := \lambda \cdot \left[\left(\frac{\pi - 2 \cdot \alpha}{\lambda} \right) - \text{floor} \left(\frac{\pi - 2 \cdot \alpha}{\lambda} \right) \right]$$

$$i1(I_d, \alpha, t) := I_d + \left(\frac{E_{d0} \cdot \cos(\alpha)}{\omega \cdot L_d} \right) \cdot \left(1 - \frac{s(\alpha)}{\lambda} \right) \cdot \left(\tau(\alpha, t) - \frac{s(\alpha)}{2} \right)$$

$$i2(I_d, \alpha, t) := I_d + \left(\frac{E_{d0} \cdot \cos(\alpha)}{\omega \cdot L_d} \right) \cdot \left(\frac{s(\alpha)}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{\lambda + s(\alpha)}{2} - \tau(\alpha, t) \right)$$

$$ud(I_d, \alpha, t) := \text{if} \left[\tau(\alpha, t) < \gamma(I_d, \alpha), \left(\frac{e(1, \alpha, t) + e(0, \alpha, t)}{2} \right), \text{if} \left[(\tau(\alpha, t) - s(\alpha)) \cdot \text{sign} \left[\left(\frac{\pi}{2} \right) - \alpha \right], 0, e(1, \alpha, t) \right] \right]$$

$$id(I_d, \alpha, t) := \text{if}(\tau(\alpha, t) < s(\alpha), i1(I_d, \alpha, t), i2(I_d, \alpha, t))$$



$$\text{Id} := -I_{\text{dHOM}}$$

$$\alpha := \alpha 2$$

$$t := 0 .. 2 \cdot \pi$$

$$s(\alpha) := \lambda \cdot \left[\left(\frac{\pi - 2 \cdot \alpha}{\lambda} \right) - \text{floor} \left(\frac{\pi - 2 \cdot \alpha}{\lambda} \right) \right]$$

$$i1(\text{Id}, \alpha, t) := \text{Id} + \left(\frac{E_{\text{d}0} \cdot \cos(\alpha)}{\omega \cdot L_{\text{d}}} \right) \cdot \left(1 - \frac{s(\alpha)}{\lambda} \right) \cdot \left(\tau(\alpha, t) - \frac{s(\alpha)}{2} \right)$$

$$i2(\text{Id}, \alpha, t) := \text{Id} + \left(\frac{E_{\text{d}0} \cdot \cos(\alpha)}{\omega \cdot L_{\text{d}}} \right) \cdot \left(\frac{s(\alpha)}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{\lambda + s(\alpha)}{2} - \tau(\alpha, t) \right)$$

$$\text{ud}(\text{Id}, \alpha, t) := \text{if} \left[\tau(\alpha, t) < \gamma(\text{Id}, \alpha), \left(\frac{e(1, \alpha, t) + e(0, \alpha, t)}{2} \right), \text{if} \left[(\tau(\alpha, t) - s(\alpha)) \cdot \text{sign} \left[\left(\frac{\pi}{2} \right) - \alpha \right], 0, e(1, \alpha, t) \right] \right]$$

$$\text{id}(\text{Id}, \alpha, t) := \text{if}(\tau(\alpha, t) < s(\alpha), i1(\text{Id}, \alpha, t), i2(\text{Id}, \alpha, t))$$

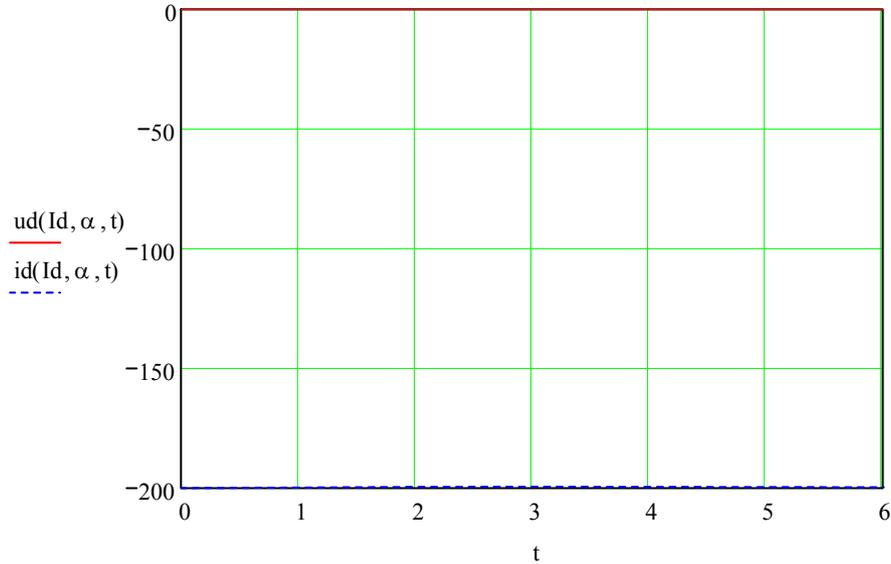
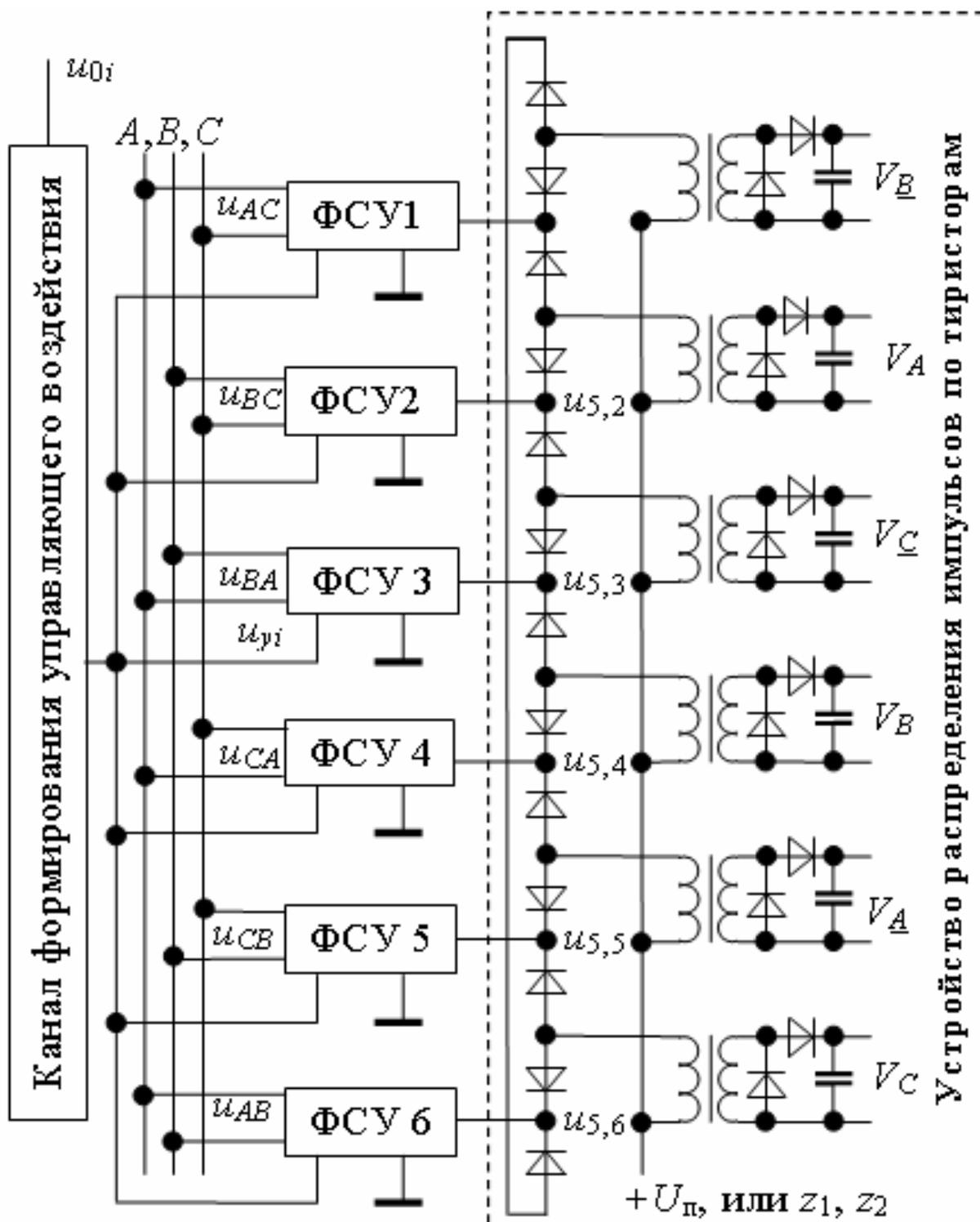
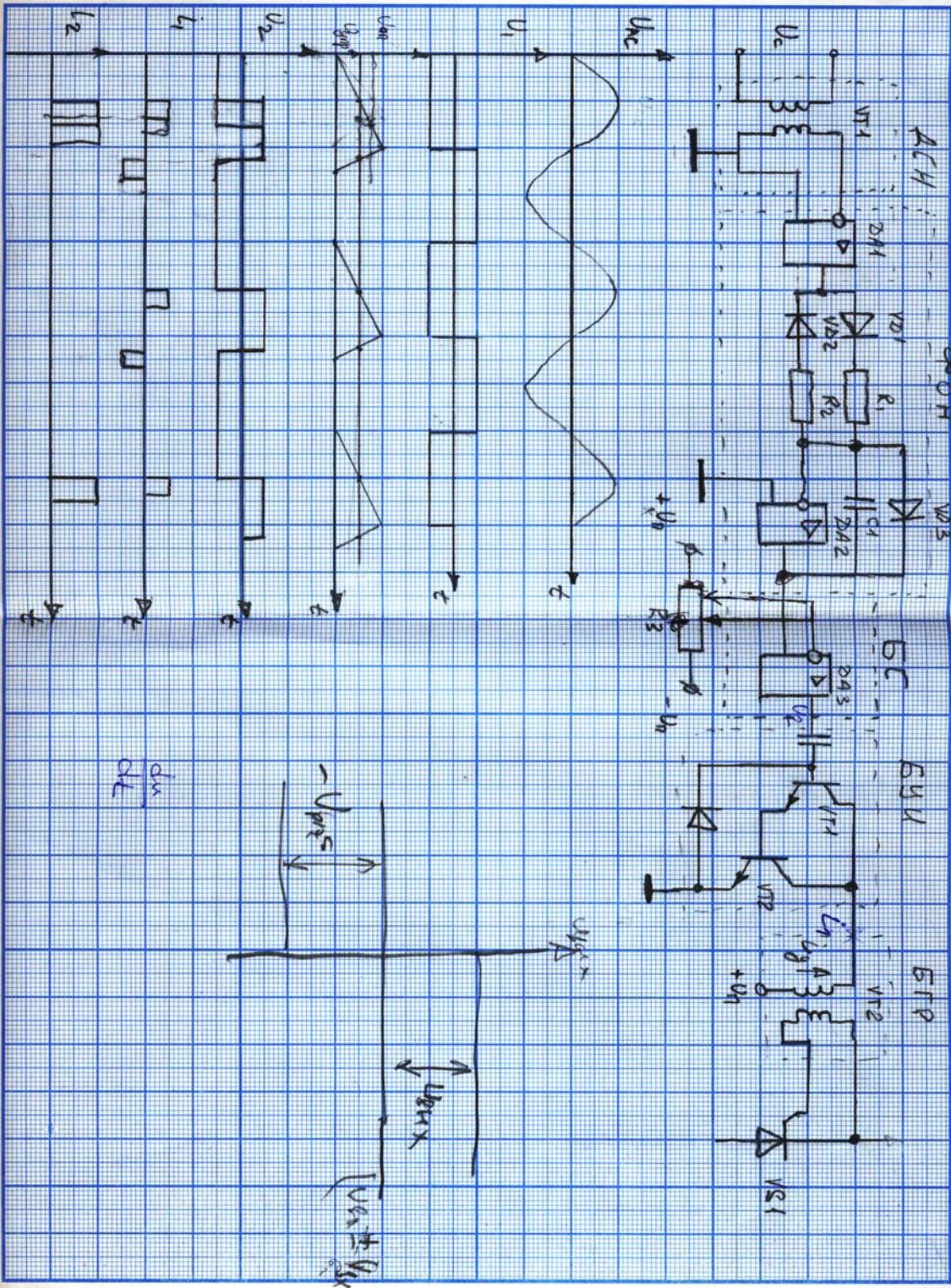


Схема СИФУ трехфазного мостового преобразователя.



Сигнал



$$\frac{du}{dt}$$

