

Введение

Электропривод на основе двигателей постоянного тока используется в различных отраслях промышленности – металлургии, машиностроении, химической, угольной, деревообрабатывающей и др. Развитие электропривода направлено на создание высокопроизводительных машин с высокой степенью автоматизации.

Регулирование скорости двигателей постоянного тока занимает важное место в автоматизированном электроприводе. Применение с этой целью тиристорных преобразователей является одним из самых современных путей создания регулируемого электропривода постоянного тока.

Важным элементом при регулировании скорости двигателя является реверс (изменение направления вращения), для осуществления которого используется реверсивный тиристорный преобразователь.

Тиристорные преобразователи обладают рядом достоинств по сравнению с электромашинными преобразователями:

- высокий КПД, обусловленный незначительным падением напряжения на тиристоре (менее 1 В);
- незначительная инерционность, обусловленная фильтрами в цепях управления и неуправляемостью тиристоров в течение интервала проводимости (10—20 мс).
- высокая надежность при использовании быстродействующей защиты в модульно-блочном исполнении ТП.

К недостаткам ТП следует отнести:

- низкий коэффициент мощности при глубоком регулировании напряжения;

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Ашомко М.В.				Реверсивный тиристорный преобразователь для электропривода постоянного тока	Лист	Лист	Листов
Пров.	Погоуляев М.Н.					у		
Н. контр.								
Утв.								
					ГГТУ, гр. ЭП-21			

- искажения питающего напряжения, вносимые работой ТП;
- повышенный уровень излучаемых радиопомех.

Целью данного проекта является разработка тиристорного преобразователя.

При этом решаются следующие задачи:

- выбор силовой схемы преобразователя;
- расчет и выбор элементов силовой схемы;
- расчет и выбор силовой коммутационной и защитной аппаратуры;
- выбор структуры и основных узлов системы управления преобразователем;
- расчет и выбор основных элементов СИФУ преобразователя;
- разработка задатчика интенсивности;
- разработка схемы электронной защиты преобразователя;
- расчет и построение характеристик преобразователя;
- расчет энергетических показателей.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

1. Выбор силовой схемы преобразователя

В зависимости от мощности и назначения электропривода могут применяться различные силовые схемы реверсивных тиристорных преобразователей. Нужно стремиться к применению наиболее простых схем, содержащих минимальное количество вентилях. Однако упрощение схемы обычно приводит к ухудшению ее технических показателей. Поэтому при проектировании обычно принимается компромиссное решение, основанное на технико-экономическом сравнении вариантов.

Все реверсивные преобразователи делятся на два класса: однокомплектные и двухкомплектные. В настоящее время наиболее распространенными являются двухкомплектные тиристорные преобразователи, выполненные по встречно-параллельной или перекрестной схемам соединения вентильных групп. Вентили в группах могут соединяться по нулевой или мостовой схемам.

В данном курсовом проекте рекомендуется использовать трехфазную мостовую схему соединения вентилей в группах тиристорного преобразователя, так как она обладает следующими преимуществами над нулевой:

- при одинаковой фазной ЭДС среднее значение выпрямленного напряжения в мостовой схеме в два раза больше;
- частота пульсаций выпрямленного напряжения в два раза выше (300 Гц против 150 Гц), а амплитуда пульсаций меньше;
- при одинаковой мощности нагрузки типовая мощность трансформатора меньше, чем для нулевой схемы;
- индуктивность в цепи переменного тока в мостовой схеме в два раза больше;

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Ашомко М.В.			Реверсивный тиристорный преобразователь для электропривода постоянного тока	Лит	Лист	Листов
Пров.		Погоуляев М.Н.				у		
						ГГТУ, гр. ЭП-21		
Н. контр.								
Утв.								

– данная схема дает большой диапазон регулирования скорости.

Вентильные группы, входящие в схему реверсивного выпрямителя, могут, как указывалось выше, соединяться двумя способами: по перекрестной или встречно-параллельным схемам. Схемы отличаются количеством вторичных обмоток силового трансформатора. Из-за простой конструкции трансформатора в схеме со встречно-параллельным соединением следует ей отдавать предпочтение. Силовая схема трехфазного мостового реверсивного преобразователя с устройствами коммутации и защиты представлена на рисунке 1.1.

По заданию, в курсовом проекте управление вентильными группами – совместное согласованное. Для ограничения возникающих при этом уравнивающих токов используются два ненасыщающихся уравнивающих реактора LR1 и LR2.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

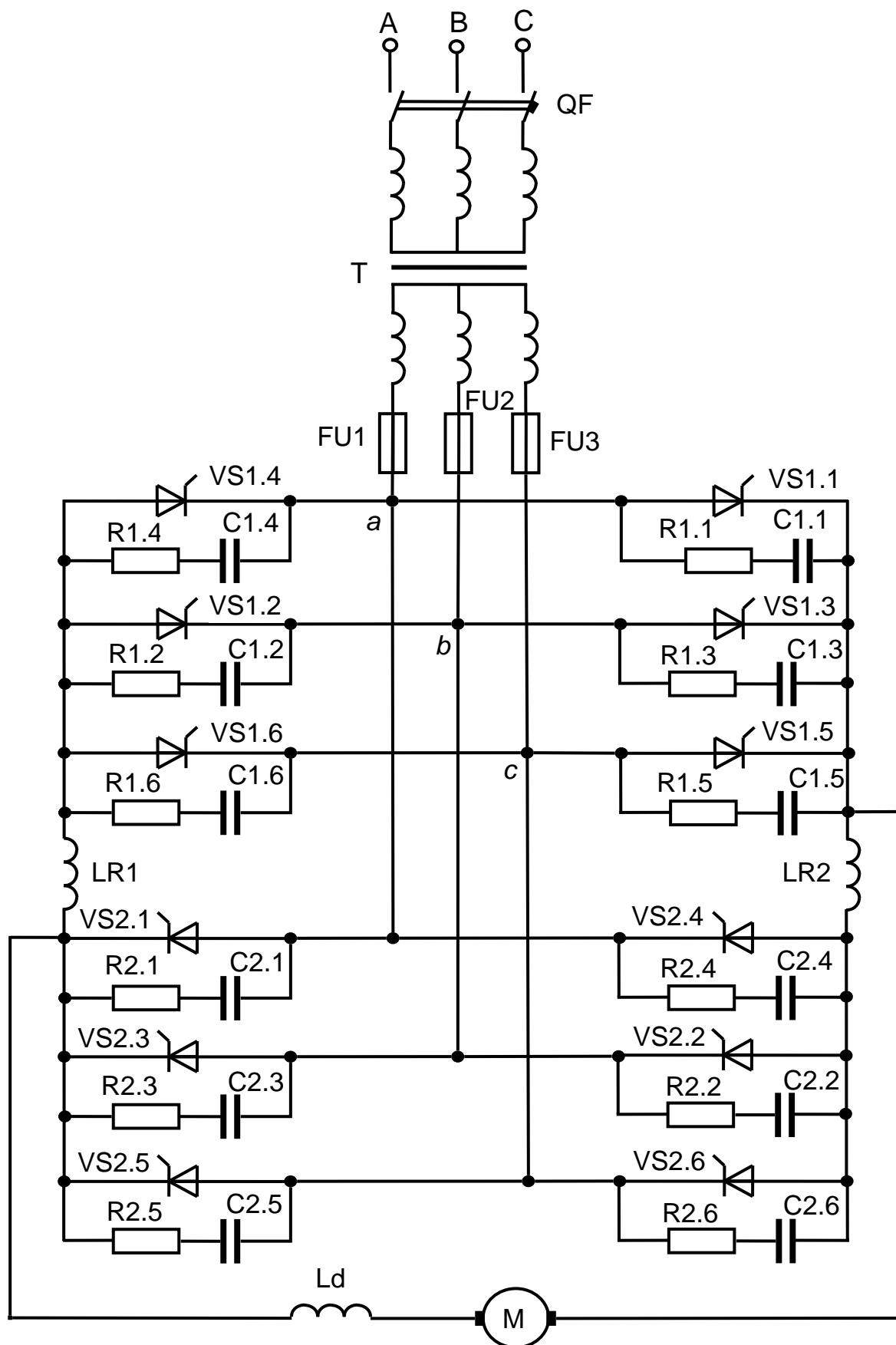


Рисунок 1.1 – Электрическая схема трехфазного реверсивного мостового ТП со встречно-параллельным соединением вентильных групп

КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ					Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	

2. Расчет и выбор элементов силовой схемы преобразователя

2.1 Расчет и выбор трансформатора

Выбор силового трансформатора производится по расчетным значениям тока $I_{2ф.расч}$, напряжению $U_{2ф.расч}$, и типовой мощности S_T . Напряжение первичной обмотки $U_{1ф}$ должно соответствовать напряжению питающей сети.

Расчетное значение напряжения $U_{2ф.расч}$ вторичной обмотки трансформатора, имеющего ТП с нагрузкой в режиме непрерывных токов, с учетом необходимого запаса на падение напряжения в силовой части, определяется формулой

$$U_{2ф.расч} = k_u k_c k_\alpha k_R U_d = 0,427 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,05 \cdot 440 = 238,7 \text{ В}, \quad (2.1)$$

где $k_u = 0,427$ – коэффициент, характеризующий отношение напряжений $U_{2ф}/U_d$ в идеальном трехфазном мостовом выпрямителе;

$k_c = 1,1$ – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий возможное снижение напряжения сети;

$k_\alpha = 1,1$ – коэффициент запаса, учитывающий неполное открытие вентилях при максимальном управляющем сигнале;

$k_R = 1,05$ – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий падение напряжения в обмотках трансформатора, в вентилях и за счет перекрытия анодов;

$U_{дном}$ – номинальное напряжение двигателя, $U_{дном} = U_H$.

Расчетное значение тока вторичной обмотки

$$I_{2расч} = k_I k_i I_{дн} = 0,815 \cdot 1,1 \cdot 22.862 = 20,57 \text{ А}, \quad (2.2)$$

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Ашомко М.В.				Реверсивный тиристорный преобразователь для электропривода постоянного тока	Лист	Лист	Листов
Пров.	Погоуляев М.Н.					у		
Н. контр.						ГГТУ, гр. ЭП-21		
Утв.								

где $k_1 = 0,815$ – коэффициент схемы, характеризующий отношение токов $I_{2\phi}/I_d$ в идеальной схеме;

$k_i = 1,1$ – коэффициент, учитывающий отклонение формы анодного тока вентилей от прямоугольной;

$I_{d.ном}$ – значение номинального тока двигателя.

$$I_{d.ном} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном} \cdot U_{ном}} = \frac{8500}{0,845 \cdot 440} = 22.862 \text{ A}, \quad (2.3)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность электродвигателя;

$\eta_{ном}$ – КПД электродвигателя;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение электродвигателя.

Рассчитываем (предварительно) действующее значение тока первичной обмотки трансформатора

$$I_1' = \frac{1}{k_{тр}} \cdot k_{i1} \cdot I_{d.ном} = \frac{1}{0,92} \cdot 0,815 \cdot 22.862 = 20,25 \text{ A}, \quad (2.4)$$

где $k_{тр}$ – расчетный коэффициент трансформации трансформатора.

$$k_{тр} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi.расч}} = \frac{220}{238,7} = 0,92, \quad (2.5)$$

где $U_{1\phi}$ – фазное напряжение первичной обмотки трансформатора, $U_{1\phi}=220 \text{ В}$;

k_{i1} – схемный коэффициент первичного тока. Принимаем $k_{i1}=0,815$.

Находим мощность первичной обмотки трансформатора

$$S_1 = m_1 \cdot I_1' \cdot U_{1\phi} = 3 \cdot 20,25 \cdot 220 = 13,365 \text{ кВА}, \quad (2.6)$$

где m_1 – число фаз первичной обмотки, $m_1 = 3$.

Находим мощность вторичной обмотки трансформатора

$$S_2 = m_2 \cdot I_{2расч} \cdot U_{2\phi} + 0.5\% \cdot P_{ном} = 3 \cdot 20,57 \cdot 238,7 + 0,005 \cdot 8500 = 14,772 \text{ кВ} \quad (2.7)$$

где m_2 – число фаз вторичной обмотки трансформатора, $m_2 = 3$;

$I_{2расч}$ – действующее значение вторичного тока трансформатора;

$U_{2\phi}$ – фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора. Ориентировочно принимаем

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

$$U_{2ф} = U_{2ф.расч} = 238,7 \text{ В}.$$

Находим типовую мощность трансформатора по формуле

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{13,365 + 14,722}{2} = 14,043 \text{ кВА.} \quad (2.8)$$

Трансформатор выбираем из условий:

– номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора должно быть близким к значению $U_{2ф.расч}$: $0.95 \cdot U_{2ф.расч} \leq U_{2ф.расч} \leq 1.2 \cdot U_{2ф.расч}$;

$$226,76 \leq 238,7 \leq 286,44 \text{ В} ;$$

– ток вторичной обмотки трансформатора должен быть больше или равен $I_{2.расч}$: $I_{2н} \geq I_{2.расч} \geq 20,57 \text{ А}$;

– номинальная мощность трансформатора должна быть больше или равна типовой мощности: $S_H \geq S_T \geq 14,043 \text{ кВА}$.

Трансформатор выбираем по [2, таблица 8.5]: ТСП – 16/0,7 – УХЛ4.

Параметры выбранного трансформатора сводим в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры трансформатора ТСП – 16/0,7 – УХЛ4

Наименование	Обозначение	Величина
Номинальная мощность, кВА	$S_{ном}$	14,6
Напряжение вентильной обмотки (линейное), В	$U_{2ном}$	410
Ток вентильной обмотки, А	$I_{2ном}$	20,5
Напряжение сетевой обмотки(линейное), В	$U_{1ном}$	380
Мощность холостого хода, Вт	P_{xx}	140
Мощность короткого замыкания, Вт	$P_{кз}$	550
Напряжение короткого замыкания, %	$U_{кз}$	5,2
Ток холостого хода, %	I_{xx}	10

Рассчитываем действительный коэффициент трансформации выбранного трансформатора

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

$$k_{mp} = \frac{U_{1н}}{U_{2н}} = \frac{U_{1фн}}{U_{2фн}} = \frac{380/\sqrt{3}}{410/\sqrt{3}} = 0,92. \quad (2.9)$$

Действительные значения рабочих токов первичной и вторичной обмоток

$$I_2 = I_{2расч} = 20,57 \text{ A},$$

$$I_1 = \frac{I_2}{k_{mp}} = \frac{20,57}{0,92} = 22,21 \text{ A}. \quad (2.10)$$

2.2 Расчет и выбор тиристоров

Тиристоры выбираются по среднему значению тока, протекающему через них и величине обратного напряжения. При этом должен быть обеспечен достаточный запас по току и напряжению.

Среднее значение тока тиристора

$$I_a = k_{zi} \frac{k_{вэ} \cdot I_d}{k_{ох}} = 1,7 \cdot \frac{0,333 \cdot 22,862}{0,35} = 36,977 \text{ A}, \quad (2.11)$$

где $k_{zi} = 1,7$ – коэффициент запаса по току;

$k_{ох}$ – коэффициент, учитывающий интенсивность охлаждения силового вентиля. При естественном охлаждении $k_{ох} = 0,35$;

$k_{вэ}$ – коэффициент, принимаем по [1, таблица 1.9], $k_{вэ} = 0,333$.

Максимальная величина обратного напряжения

$$U_{b.max} = k_{зU} k_{Uобр} U_{d0} = 1,8 \cdot 1,045 \cdot 594,03 = 1041,88 \text{ B}, \quad (2.12)$$

где $k_{зU} = 1,8$ – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий возможные повышения напряжения питающей сети (включая режим холостого хода) и периодические выбросы $U_{обр}$, обусловленные процессом коммутации вентиля;

$k_{Uобр}$ – коэффициент обратного напряжения, равный отношению напряжений U_{bmax}/U_{d0} , для мостовой схемы выпрямления $k_{Uобр} = 1,045$;

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

U_{d0} – наибольшая величина выпрямленного напряжения преобразователя (среднее значение за период). Для трехфазной мостовой схемы выпрямления:

$$U_{2\phi \text{ ном}} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{410}{\sqrt{3}} = 236,71 \text{ В};$$

$$U_{d0} = 2,34 \cdot U_{2\phi \text{ н}} = 2,34 \cdot 236,71 = 553,9 \text{ В}.$$

Условия выбора тиристоров:

– максимальный средний ток тиристорov открытom состоянии должен быть больше или равен значению I_a , $I_{\text{ос.ср.мах}} \geq 36,977 \text{ А}$;

– повторяющееся обратное напряжение тиристора должно быть больше или равно значению $U_{\text{б.мах}}$, $U_{\text{обр.п}} \geq 1041,88 \text{ В}$.

Из справочника [3] выбираем марку тиристорov (низкочастотных): Т131-40-11

Параметры выбранных тиристорov сводим в таблицу 2.2

Таблица 2.2 – Параметры тиристорov марки Т131-40-11

Наименование	Обозначение	Значение
Максимальный средний ток в открытом состоянии, А	$I_{\text{ос.ср.мах}}$	40
Повторяющееся импульсное обратное напряжение, В	$U_{\text{обр.п}}$	1100
Ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии, А	$I_{\text{ос.удр}}$	750
Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии, В/мкс	$(du_{\text{зс}}/dt)_{\text{кр}}$	50...1000
Ток удержания, мА	$I_{\text{уд}}$	90
Импульсное напряжение в открытом состоянии, В	$U_{\text{ос,и}}$	1,75
Отпирающий постоянный ток управления, мА	$I_{\text{упр}}$	100
Время включения, мкс	$t_{\text{вкл}}$	10
Время выключения, мкс	$t_{\text{выкл}}$	100
Отпирающее постоянное напряжение, В	$U_{\text{упр}}$	3,5

2.3 Расчет и выбор уравнильных реакторов

В мостовом преобразователе с совместным управлением присутствуют уравнильные токи.

Для уменьшения уравнильных токов в схему вводят 4 насыщающихся или 2 ненасыщающихся уравнильных реактора. Для расчета принимаем схему с двумя не насыщающимися уравнильными реакторами.

Определяем индуктивность уравнильных реакторов по формуле [4, страница 133]

$$L_{ур} = k_D \cdot \frac{U_{2m}}{\omega \cdot I_{ур}} = 0,62 \cdot \frac{334,74}{314 \cdot 3,2} = 0,2 \text{ Гн}, \quad (2.13)$$

где k_D – коэффициент действующего значения уравнильного тока, принимаем по [4, страница 158] $k_D = 0,62$;

$U_{2ф.мах}$ – амплитуда фазного напряжения, $U_{2ф.мах} = \sqrt{2} \cdot U_{2ф.ном} = \sqrt{2} \cdot 236,71 = 334,75 \text{ В}$.

ω – круговая частота сети, $\omega = 314 \frac{рад}{с}$;

$I_{ур}$ – действующее значение уравнильного тока.

$$I_{ур} = \left[\frac{I_{гp}}{I_{дн}} \right] \cdot I_{дн} = 0,14 \cdot 22,862 = 3,2 \text{ А}. \quad (2.14)$$

Для схемы выбираем 2 ненасыщающихся уравнильных реактора LR1 и LR2 с рассчитанной индуктивностью 70 мГн.

2.4 Расчет и выбор сглаживающих дросселей

Пульсации выпрямленного напряжения приводят к пульсациям выпрямленного тока, которые ухудшают коммутацию электродвигателя и увеличивают его нагрев.

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения применяют сглаживающие дроссели.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

Определяем индуктивность сглаживающего дросселя по формуле [4]

$$L_{d2} = \frac{U_{dm}^k \cdot 100}{\sqrt{2} \cdot k \cdot p \cdot \omega \cdot p(1)\% \cdot I_{dnom}} = \frac{98,83 \cdot 100}{\sqrt{2} \cdot 1 \cdot 6 \cdot 314 \cdot 8 \cdot 22,862} = 0,00308 \text{ Гн}, \quad (2.15)$$

где k – кратность гармоники. Так как в симметричной мостовой схеме наибольшую амплитуду имеет первая гармоника, то принимаем $k=1$;

p – количество пульсаций, принимаем по [1, таблица 2.1], $p=6$;

$p(1)\%$ – допустимое действующее значение основной гармоники тока.

Принимаем $p(1)\% = 8\%$;

U_{dm}^k – амплитудное значение гармонической составляющей выпрямленного напряжения, определяем по [4, страница 131]

$$U_{dm}^k = \frac{2 \cdot \cos \alpha \cdot U_{d0}}{k^2 \cdot p^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + k^2 \cdot p^2 \cdot \tan^2 \alpha} = \frac{2 \cdot \cos 30^\circ \cdot 553,901}{1^2 \cdot 6^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + 1^2 \cdot 6^2 \cdot \tan^2 30^\circ} = 98,83 \text{ В}, \quad (2.16)$$

где α – угол управления тиристорами, $\alpha = 30^\circ$;

U_{d0} – максимальное среднее значение выпрямленного напряжения,

$$U_{d0} = 2,34 \cdot U_{2\phi, ном} = 2,34 \cdot 236,71 = 553,901 \text{ В}.$$

ω – круговая частота сети;

$I_{d, ном}$ – номинальный выпрямленный ток преобразователя.

Так как индуктивность выбранного уравнивающего реактора больше индуктивности сглаживающего дросселя ($L_{yp} > L_d$), то отказываемся от установки последнего в силовую цепь преобразователя. Уравнивающего реактора будет достаточно для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

2.5 Расчет и выбор силовой коммутационной и защитной аппаратуры

2.5.1 Расчет и выбор R-C цепочек

Для ограничения скорости нарастания прямого напряжения используем RC цепочки, которые включаем параллельно каждому тиристор.

Используя стандартный ряд сопротивлений выберем резистор с сопротивлением $R=20 \text{ Ом}$.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

Из уравнения [5, страница 81]

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{кр} = \frac{0,632 \cdot U_{уст}}{\tau}, \quad (2.17)$$

где $U_{уст}$ – установившееся напряжение на тиристоре,

$$U_{уст} = \sqrt{2} \cdot U_{2л.ном} = \sqrt{2} \cdot 410 = 579.827 \text{ В.}$$

$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\hat{e}\hat{o}}$ – максимально допустимая критическая скорость нарастания прямого напряжения на тиристоре (таблица 2.2).

Находим постоянную времени

$$\tau = \frac{0,632 \cdot U_{уст}}{\left(\frac{dU_{3c}}{dt}\right)_{кр}} = \frac{0,632 \cdot 579.827}{500} = 0,7329 \text{ мкс.}$$

Находим емкость

$$C = \frac{\tau}{R} = \frac{0,771 \cdot 10^{-6}}{20} = 38.5 \text{ нФ.}$$

Используя стандартный ряд емкостей выбираем конденсатор с емкостью $C = 38 \text{ нФ}$.

2.5.2 Расчет и выбор предохранителей

Для защит тиристорного преобразователя от внутренних коротких замыканий во вторичную обмотку трансформатора поставим предохранители. Находим амплитудное значение базового тока короткого замыкания по формуле

$$I_{2km} = \frac{U_{2ф.мах}}{\sqrt{X_{2к}^2 + r_{2к}^2}} = \frac{334,75}{\sqrt{0,6^2 + 0,43^2}} = 453,47, \quad (2.18)$$

где $U_{2ф.мах}$ – амплитудное значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{2ф.мах} = \sqrt{2} \cdot U_{2ф.ном} = \sqrt{2} \cdot 236,71 = 334,75 \text{ В.};$

$x_{2т}$ – индуктивное сопротивление трансформатора, приведенное к вторичной обмотке;

$r_{2т}$ – активное сопротивление трансформатора, приведенное к вторичной обмотке.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

Находим полное, активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки трансформатора [4, страница 105]:

$$Z_{2\kappa} = \frac{U_{\kappa\%}}{100} \cdot \frac{U_{2лн}}{\sqrt{3} \cdot I_{2\phi н}} = \frac{5,2}{100} \cdot \frac{410}{\sqrt{3} \cdot 20,5} = 0,6 \text{ Ом}, \quad (2.19)$$

где $U_{\kappa\%}$ – напряжение короткого замыкания, из таблицы 2.1; $U_{\kappa\%} = 5,2\%$;

$U_{2л.ном}$ – линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора, $U_{2л.ном} = 410$ В;

Активное сопротивление, приведенное к вторичной обмотке трансформатора:

$$r_{2\kappa} = \frac{P_{\kappa\text{з}}}{3 \cdot I_{2\phi}^2} = \frac{550}{3 \cdot 20,5^2} = 0,43 \text{ Ом}, \quad (2.20)$$

где $P_{\kappa\text{з}}$ – мощность короткого замыкания, из таблицы 2.1, $P_{\kappa\text{з}} = 550$ Вт;

$I_{2.ном}$ – ток вентиляционной обмотки, из таблицы 2.1, $I_{2.ном} = 20,5$ А.

Индуктивное сопротивление, приведенное к вторичной обмотке трансформатора

$$X_{2\kappa} = \sqrt{Z_{2\kappa}^2 - r_{2\kappa}^2} = \sqrt{0,6^2 - 0,43^2} = 0,418 \text{ Ом}, \quad (2.21)$$

где $Z_{2\kappa}$ – полное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, по формуле (2.19).

$r_{2\kappa}$ – активное сопротивление трансформатора, по формуле (2.20);

Для нахождения ударного тока внутреннего короткого замыкания определяем коэффициент k_I по графику [4, рис.1-129а] в зависимости от $\text{ctg}\phi_{\kappa}$: при

$$\text{ctg}\phi_{\kappa} = \frac{r_{2\kappa}}{X_{2\kappa}} = \frac{0,43}{0,6} = 0,716, \quad (2.22)$$

$$k_I = 1.$$

Тогда ударный ток внутреннего короткого замыкания

$$I_{y\partial} = k_I \cdot I_{2\kappa м} = 1 \cdot 453,47 = 453,47 \text{ А}.$$

Выбираем плавкий предохранитель- ПП18-33, исходя из условий:

– номинальное напряжение предохранителя должно соответствовать напряжению цепи $U_{2.ном}$, в которой он установлен, $U_{2.ном} = 410$ В;

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

– номинальный ток предохранителя должен быть больше рабочего тока, протекающего через него $I_{\text{раб}}=20,57 \text{ А}$;

– номинальный ток плавкой вставки должен быть больше рабочего тока, протекающего через вторичную обмотку трансформатора $I_2, I_2=20,57 \text{ А}$.

Параметры выбранного предохранителя сведены в таблицу 2.3:

Таблица 2.3 – Параметры предохранителя ПП18-33

Тип предохранителя	ПП18-33
Номинальное напряжение предохранителя, В.	380
Номинальный ток предохранителя, А.	100
Ток плавкой вставки предохранителя, А	25

Проводим проверку на срабатывание при коротком замыкании:

$$3 \cdot I_{\text{пл.вст.}} < I_{\text{уд}} / \sqrt{2} ,$$

$$75 < 268,7 \text{ А}.$$

2.5.3 Расчет и выбор автоматического выключателя

Для защиты тиристорного преобразователя от внешних коротких замыканий в первичную обмотку трансформатора поставим автоматический воздушный выключатель.

Для вычисления ударного тока внешнего короткого замыкания определяем коэффициент k_2 по [4, рисунок 1-127а] в зависимости от $\text{ctg}\phi_k$:

$$\text{ctg}\phi_k = \frac{r_{2k}}{X_{2k}} = \frac{0,43}{0,6} = 0,716, \quad (2.23)$$

$$k_2 = 0,82$$

Ударный ток внешнего короткого замыкания

$$I_{\text{уд2}} = k_2 \cdot I_{2km} = 0,82 \cdot 453,47 = 371,84 \text{ А}.$$

Выбираем автоматический воздушный выключатель А3140 по [6] из условий:

– номинальный ток автомата должен быть больше рабочего тока первичной обмотки трансформатора

$$I_1 = \frac{I_2}{k_{mp}} = \frac{20,57}{0,92} = 22,35 \text{ А}; \quad (2.24)$$

– номинальное напряжение автомата должно быть больше или равно сетевому напряжению 410В;

– число полюсов было равно числу фаз питающей сети, $n=3$;

– номинальный ток теплового расцепителя должен быть больше рабочего тока $I_1 = 22,35 \text{ А}$;

– номинальный ток электромагнитного расцепителя должен быть больше рабочего тока $I_1 = 22,35 \text{ А}$;

– ток срабатывания электромагнитного расцепителя должен быть меньше ударного тока внешнего короткого замыкания, протекающего через выключатель

$$\frac{I_{уд2}}{\sqrt{2} \cdot k_{тр}} = \frac{371,84}{\sqrt{2} \cdot 0,92} = 285,79 \text{ А};$$

Параметры автоматического выключателя А3130 сведены в таблицу 2.4:

Таблица 2.4 – Параметры автоматического выключателя А3140

Тип автоматического выключателя	А3140
Число полюсов	3
Номинальное напряжение, В	660
Номинальный ток автомата, А	25
Номинальный ток комбинированного расцепителя, А	25
Номинальный ток электромагнитного расцепителя, А	25
Ток срабатывания электромагнитного расцепителя, А	300

3. Выбор структуры и основных узлов системы управления тиристорным преобразователем

Система управления преобразовательным устройством предназначена для формирования и генерирования управляющих импульсов определенной формы и длительности, распределения их по фазам и изменения момента подачи на управляющие электроды вентилей преобразователя. В настоящее время широкое распространение получили электронные (полупроводниковые) системы управления вентильными преобразователями, так как они имеют ряд преимуществ перед электромагнитными системами: высокое быстродействие, надежность, малая потребляемая мощность и малые габариты.

Системы управления, в которых управляющий сигнал имеет форму импульса, фазу которого можно регулировать, называют импульсно-фазовыми.

Системы управления выполняют по синхронному и асинхронному принципам.

Синхронный принцип импульсно-фазового управления преобразователями является наиболее распространенным. Его характеризует такая функциональная связь узлов СУ, предназначенных для получения управляющих импульсов, при которой синхронизация управляющих импульсов осуществляется напряжением сети переменного тока.

Асинхронные системы управления преобразователями применяются при существенных искажениях напряжения питающей сети, в частности при значительной несимметрии трехфазных напряжений по величине и фазе. Использование в таких условиях синхронной системы невозможно ввиду получающейся недопустимой асимметрии в углах α по каналам управления тиристорами. Наиболее распространены асинхронные СУ в преобразователях, потребляющих мощность, соизмеримую с мощностью питающей сети.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Ашомко М.В.				Реверсивный тиристорный преобразователь для электропривода постоянного тока	Лист	Лист	Листов
Пров.	Погоуляев М.Н.					у		
Н. контр.						ГГТУ, гр. ЭП-21		
Утв.								

В данном проекте необходимо использовать синхронную систему управления.

Существуют системы управления, построенные по горизонтальному и вертикальному принципу. Горизонтальное управление не нашло широкого распространения, так как мостовые фазовращатели критичны к форме и частоте подаваемого напряжения. Из-за этого выбираем систему управления, построенную по вертикальному принципу.

Функциональная схема СИФУ представлена на рисунке 3.1 на функциональной схеме обозначено:

ИСН – источник синхронизирующего напряжения;

УО – управляющий орган;

ГОН – генератор опорного пилообразного напряжения;

НО1, НО2 – нуль-органы;

ФДИ – формирователь длительности импульсов;

УРИ – узел распределения импульсов;

УИ – усилители импульсов;

ВУ – выходные устройства.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

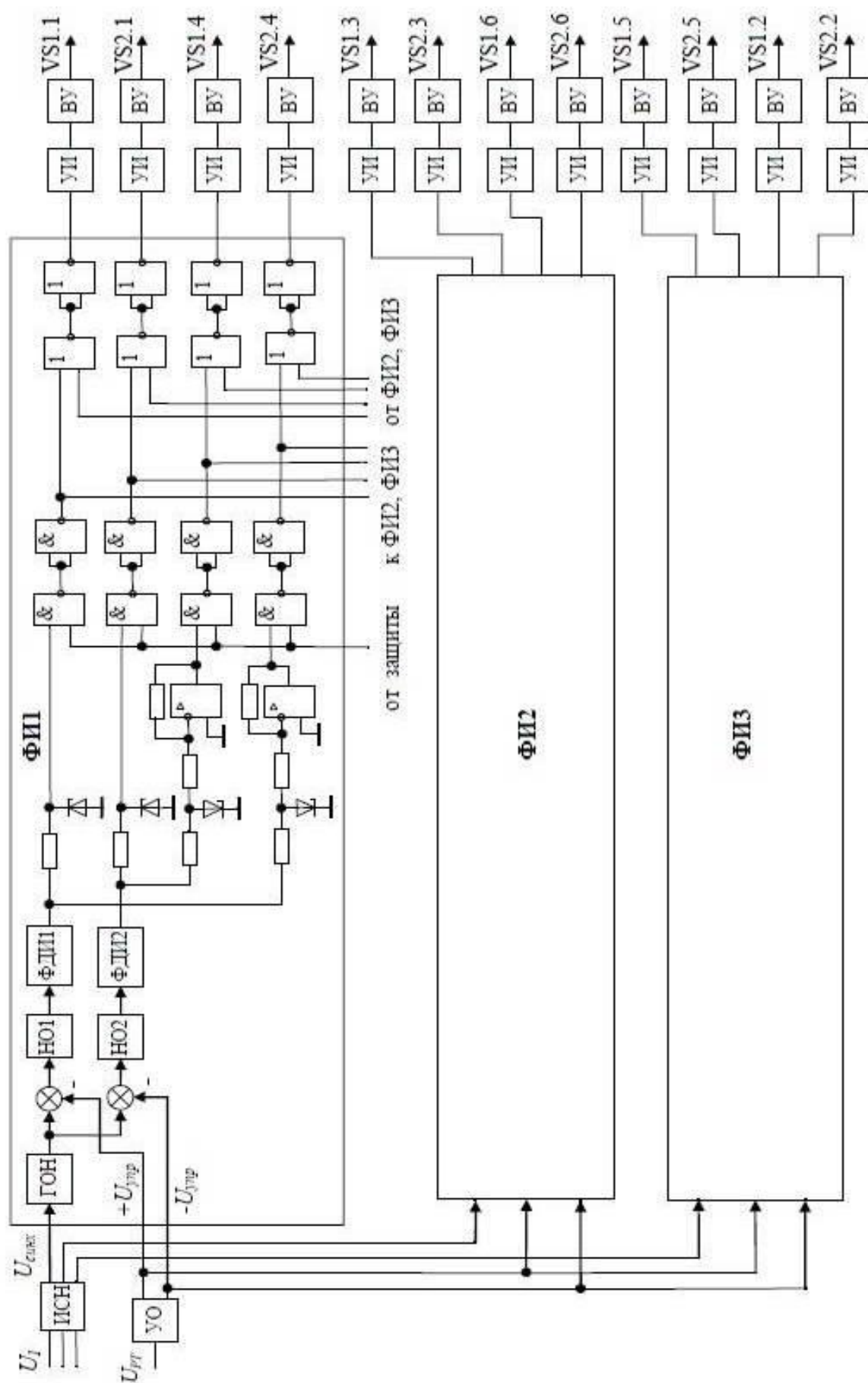


Рисунок 3.1 – Функциональная схема СИФУ

4. Расчет и выбор основных элементов системы импульсно-фазового управления (СИФУ) преобразователя

Выберем аналоговые и цифровые микросхемы для применения в узлах СИФУ.

В качестве операционных усилителей выберем аналоговую микросхему К140УД7 со следующими параметрами ([7], стр 73):

- коэффициент усиления $K_u = 50 \cdot 10^3$;
- напряжение смещения нуля $U_{см} = 4$ мВ;
- входные токи $I_{вх} = 200$ нА;
- разность входных токов $\Delta I_{вх} = 50$ нА;
- максимальный выходной ток $I_{вых\ max} = 20$ мА;
- максимальное выходное напряжение $U_{вых\ max} = 10,5$ В;
- максимальное входное напряжение $U_{вх\ max} = 12$ В;
- максимальное входное синфазное напряжение $U_{вх\ сф\ max} = 11$ В;
- напряжение питания $U_{п} = \pm 15$ В;
- входное сопротивление операционного усилителя $R_{вх.oy} = 0,4$ МОм.

Определим максимальное значение сопротивления цепей, подключаемых к входу операционного усилителя

$$R_{BX} \leq 0,1 \cdot R_{BX.OY} = 0,1 \cdot 400000 = 40 \text{ кОм.}$$

Минимальное значение сопротивления цепей, подключаемых к выходу

$$R_{BЫX} \geq 5 \cdot \frac{U_{BЫX\ MAX}}{I_{BЫX\ MAX}} = 5 \cdot \frac{10,5}{20 \cdot 10^{-3}} = 2,9 \text{ кОм.}$$

В качестве цифровых микросхем будем применять микросхемы серии К155 ([6], таблицы 2.3):

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Разраб.	Ашомко М.В.				<div>Литература</div>					
Пров.	Погоуляев М.Н.									
Н. контр.										
Утв.										
					Лит		Лист		Листов	
						у				
					ГГТУ, гр. ЭП-21					

- К155ЛА3 – 4 логических элемента “2И-НЕ”;
- К155ЛЕ1 – 4 логических элемента “2ИЛИ-НЕ”;
- параметры микросхем серии К155 ([15], таблица 3.9, 3.10):
- максимальное напряжение питания $U_{\text{п}} = 6 \text{ В}$;
- максимальное напряжение на входе $U_{\text{вх max}} = 5,5 \text{ В}$;
- минимальное напряжение на входе $U_{\text{вх min}} = -0,4 \text{ В}$;
- входной ток “нуля”, не более $I_{\text{вх}}^0 = -1,6 \text{ мА}$;
- входной ток “единицы”, не более $I_{\text{вх}}^1 = 0,04 \text{ мА}$;
- выходной ток “нуля”, не более $I_{\text{вых}}^0 = 16 \text{ мА}$;
- выходной ток “единицы”, не более $I_{\text{вых}}^1 = 0,4 \text{ мА}$;
- выходное напряжение “нуля”, не более $U_{\text{вых}}^0 = 0,4 \text{ В}$;
- выходное напряжение “единицы”, не менее $U_{\text{вых}}^1 = 2,4 \text{ В}$;
- коэффициент разветвления по выходу $K_{\text{раз}} = 10$;
- коэффициент объединения по входу $K_{\text{об}} = 8$.

4.1 Расчет и выбор генератора опорного напряжения

Для работы СИФУ используется косинусоидальное опорное напряжение, максимальное и минимальное значения которого должны находиться в точках естественной коммутации клапанов. Для трехфазных систем преобразователей точки естественной находятся в точках пересечения фазных напряжений

Схема генератора с косинусоидальным напряжением представлена на рисунке 4.1

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

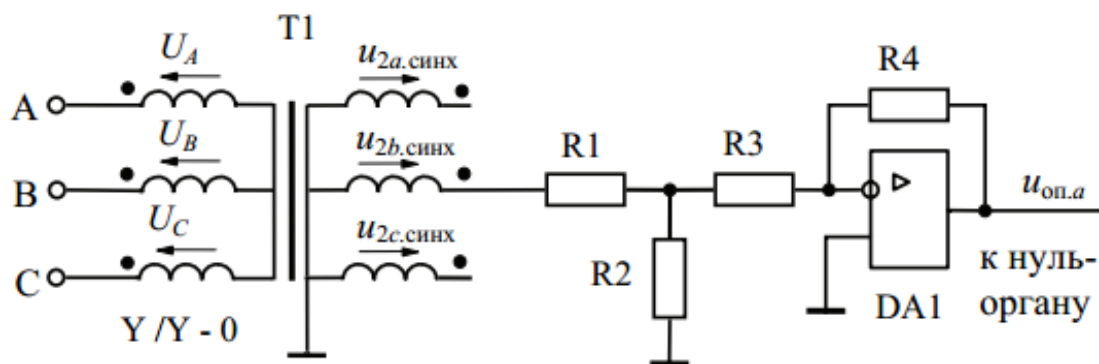


Рисунок 4.1 – Схема генератора опорного напряжения

Чтобы максимальное и минимальное значения опорного напряжения находились в точках естественной коммутации вентилях, необходимо напряжение последующей фазы трансформатора синхронизации, имеющего такую же группу соединения обмоток, как и силовой трансформатор (Y\Y-0), проинвертировать. Этим достигается нужный сдвиг косинусоиды опорного напряжения относительно силового напряжения (рис.4.2).

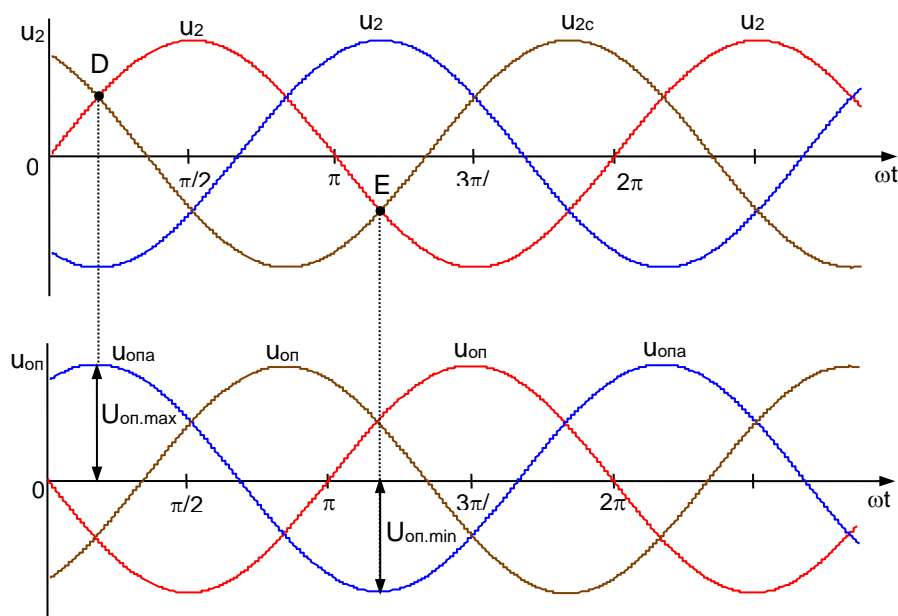


Рисунок 4.2 – Диаграммы напряжения u_2 , действующего на силовых тиристорах, и соответствующие опорные напряжения $u_{оп}$. Точки D и E – точки естественной коммутации для тиристоров фазы A

Выбираем значение сопротивлений резисторов R_3 и R_4 в пределах 15...30 кОм, причем $R_3=R_4$. Тогда коэффициент передачи усилителя на ОУ DA1 будет равен единице.

Амплитудное значение опорного напряжения на выходе инвертора принимается в диапазоне

$$U_{оп.мах} = 1,1 \cdot 10 = 11 \text{ В.}$$

где $U_{зад.мах} = 10\text{В}$ – максимальное напряжение задания.

При этом необходимо проверить выполнение условия

$$U_{оп.мах} \leq U_{вых.мах},$$

где $U_{вых.мах}$ – максимальное напряжение на выходе обратного ОУ DA1 (напряжение насыщения).

Поскольку амплитудное значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора синхронизации превышает $U_{оп.мах}$, тона входе инвертора необходимо применять делитель напряжения (R_1 , R_2). Коэффициент передачи делителя напряжения

$$K_{\mathcal{D}} = \frac{U_{оп.мах}}{U_{2м.синх}} = \frac{11}{16,97} = 0,648$$

где $U_{2м.синх} = \sqrt{2} \cdot 12 = 16,97 \text{ В}$ – Так как делитель напряжения является источником по отношению к инвертирующему усилителю, то должно выполняться условие $R_2 \ll R_3$. Значение сопротивления резистора R_2 принимается в пределах 1.0...2.0 кОм

и из соотношений $K_{\mathcal{D}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ получаем

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{1 - K_{\mathcal{D}}}{K_{\mathcal{D}}} = 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{1 - 0,648}{0,648} = 543 \text{ Ом}$$

Из стандартного ряда выбираем R_1 с сопротивлением близким к расчетному. Принимаем $R_1=549 \text{ Ом}$.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

4.2 Расчет и выбор нуля-органа

С помощью нуля-органа опорное напряжение генератора сравнивается с управляющим напряжением $U_{упр}$ преобразователя. Когда опорное напряжение в (процессе его увеличения или уменьшения) достигает напряжения $U_{упр}$ на выходе нуля-органа, выполненного на операционном усилителе DA4, возникает импульс, который поступает на формирователь отпирающих импульсов.

Принципиальная электрическая схема нуля-органа представлена на рисунке 4.4.

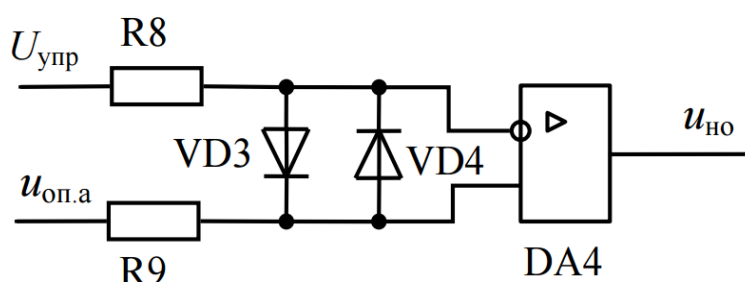


Рисунок 4.4 – Электрическая схема нуля-органа

Работает данная схема в соответствии со следующим алгоритмом

Выбираем $R_8 = R_9 = 12$ кОм. Амплитудное значение опорного напряжения равно 11 В, а максимальное напряжение управления равно 10В. Максимальное значение их разности составляет 21 В, что превышает максимально допустимое значение входного напряжения ОУ. Поэтому для защиты ОУ DA4 ставим два диода VD3 и VD4, включенных встречно-параллельно. Выбор диодов производим по прямому току I_a и по максимальной величине обратного напряжения $U_{b,max}$ с коэффициентом запаса равным 2.

$$I_a = \frac{0,45 \cdot (U_{оп. max} + U_{упр})}{(R_8 + R_9)} = \frac{0,45 \cdot (11 + 10)}{12 \cdot 10^3 + 12 \cdot 10^3} = 0,394 \text{ мА},$$

$$U_{b max} = 2 \cdot (U_{оп. max} + U_{упр}) = 2 \cdot (11 + 10) = 42 \text{ В}.$$

Исходя из условий $I_{пр} \geq I_a$, $U_{обр. max} \geq U_{b. max}$ выбираем по [8] тип диода Д220 и запишем его параметры.

Таблица 4.1 – Параметры диода

Тип диода	$U_{обр\ max},\ В$	$I_{пр\ max},\ мА$
Д220	50	50

Диаграммы работы нуль-органа приведены на рисунке 4.5.

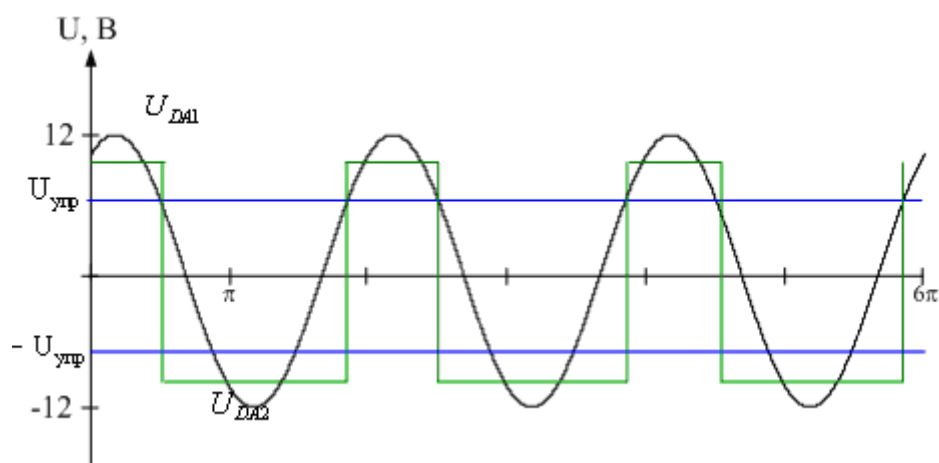


Рисунок 4.5 – Диаграммы работы нуль-органа

4.3 Расчет и выбор формирователя длительности импульсов и элементов согласования с логикой

Формирователь длительности импульсов служит для формирования отпирающих импульсов определенной длины, которые после усилителя поступают на управляемый тиристор.

Принципиальная электрическая схема формирователя длительности импульсов и элементов согласования с логикой представлена на рисунке 4.6:

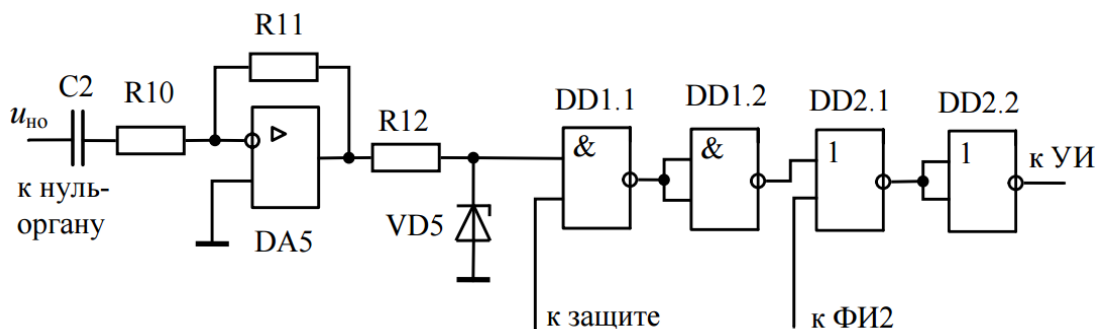


Рисунок 4.6 – Формирователь длительности импульсов

Формирователь длительности импульсов собран на ОУ DA5. Он представляет собой дифференцирующее с замедлением звено, которое описывается уравнением

$$h(t) = \frac{T_1}{T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}$$

где $T_1 = C_2 \cdot R_{11}$, $T_2 = C_2 \cdot R_{10}$ – постоянные времени.

Вход данной цепи подключён к нуль-органу и переход напряжения на входе составляет $\Delta U_{\text{вх}} = 2 \cdot U_{\text{но.мах}} = 2 \cdot U_{\text{вых.мах DA5}} = 2 \cdot 11,5 = 23 \text{ В}$.

Максимальную величину напряжения на выходе DA5 в момент переключения нуль-органа принимаем равной $U_{\text{вых.мах DA5}}$ (рисунок 4.7).

Величину напряжения импульса принимаем равным $U_{\text{упр}} = 10 \text{ В}$.

Для нормального открывания тиристорov необходимо обеспечить длительность импульса $7^\circ \div 10^\circ$.

Время импульса составляет

$$t_u = \frac{7^\circ}{360^\circ \cdot f} \div \frac{10^\circ}{360^\circ \cdot f} = 0,39 \div 0,56$$

Принимаем $t_u = 0,5 \text{ мс}$.

Величину напряжения $U_{\text{имп}}$ на выходе DA5 в момент времени $t = t_u$ принимают равным не менее уровня логической единицы элемента DD1.1 (рисунок 4.7)

Подставим в переходную функцию значения $\Delta U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых.мах.DA5}}$ в начальный момент времени $t=0$

$$U_{\text{вых. max DA5}} = \frac{T_1}{T_2} \cdot \Delta U_{\text{ex}}$$

Тогда получим

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{U_{\text{вых. max DA5}}}{\Delta U_{\text{ex}}} = \frac{11,5}{23} = 0,5$$

Далее, подставляя в соотношение

$$U_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{ex}} \cdot \frac{T_1}{T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \text{ значения } U_{\text{вых}} = U_{\text{упр}}; U_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}} = 23\text{В}; \frac{T_1}{T_2} \text{ и время } t=t_u=0,5$$

мс, находим T_2

$$T_2 = -\frac{t_u}{\ln \frac{U_{\text{упр}}}{\left(\frac{T_1}{T_2}\right) \cdot \Delta U_{\text{ex}}}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{\ln \left(\frac{10}{0,5 \cdot 23} \right)} = 3,58 \text{ мс}$$

Принимаем из стандартного ряда величину $C_2=100$ нФ, определяем сопротивление R_{10}

$$R_{10} = \frac{T_2}{C_2} = \frac{3,58 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-9}} = 35,8 \text{ кОм}$$

Выбираем ближайшее стандартное значение $R_{10}=36$ кОм.

Из соотношения $\frac{T_1}{T_2} = \frac{C_2 \cdot R_{11}}{C_2 \cdot R_{10}}$ рассчитываем значение R_{11}

$$R_{11} = \frac{T_1 \cdot R_{10}}{T_2} = 0,5 \cdot 36 \cdot 10^3 = 18 \text{ кОм},$$

Из критерия величины нагрузки для ОУ ($R_{\text{н. min}} > 2.0$ кОм) выбираем стандартное значение $R_{12}=10$ кОм.

Для согласования сигналов формирователя длительности импульсов по уровню и знаку с логическими элементами служит маломощный стабилитрон VD5, напряжение стабилизации $U_{\text{ст. ном}}$ которого выбираем в зависимости от серии используемых цифровых микросхем. Для микросхем серии K155– $U_{\text{ст. ном}}=3.9$ В.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

Таблица 4.2 – Параметры стабилитрона

Тип стабилитрона	$U_{ст, ном}, В$	$I_{ст}, мА$	$U_{ст, min}, В$	$U_{ст, max}, В$
КС407Б	3,9	20	3,7	4,1

Распределить импульсов выполнен на логических элементах И-НЕ (DD1.1, DD1.2) и ИЛИ-НЕ (DD2.1, DD2.2) и служит для формирования фронтов импульсов управления, создания связи с электронной защитой преобразователя и взаимодействия с другими формирователями импульсов. Диаграмма работы логики формирователя импульсов на рисунке 4.7.

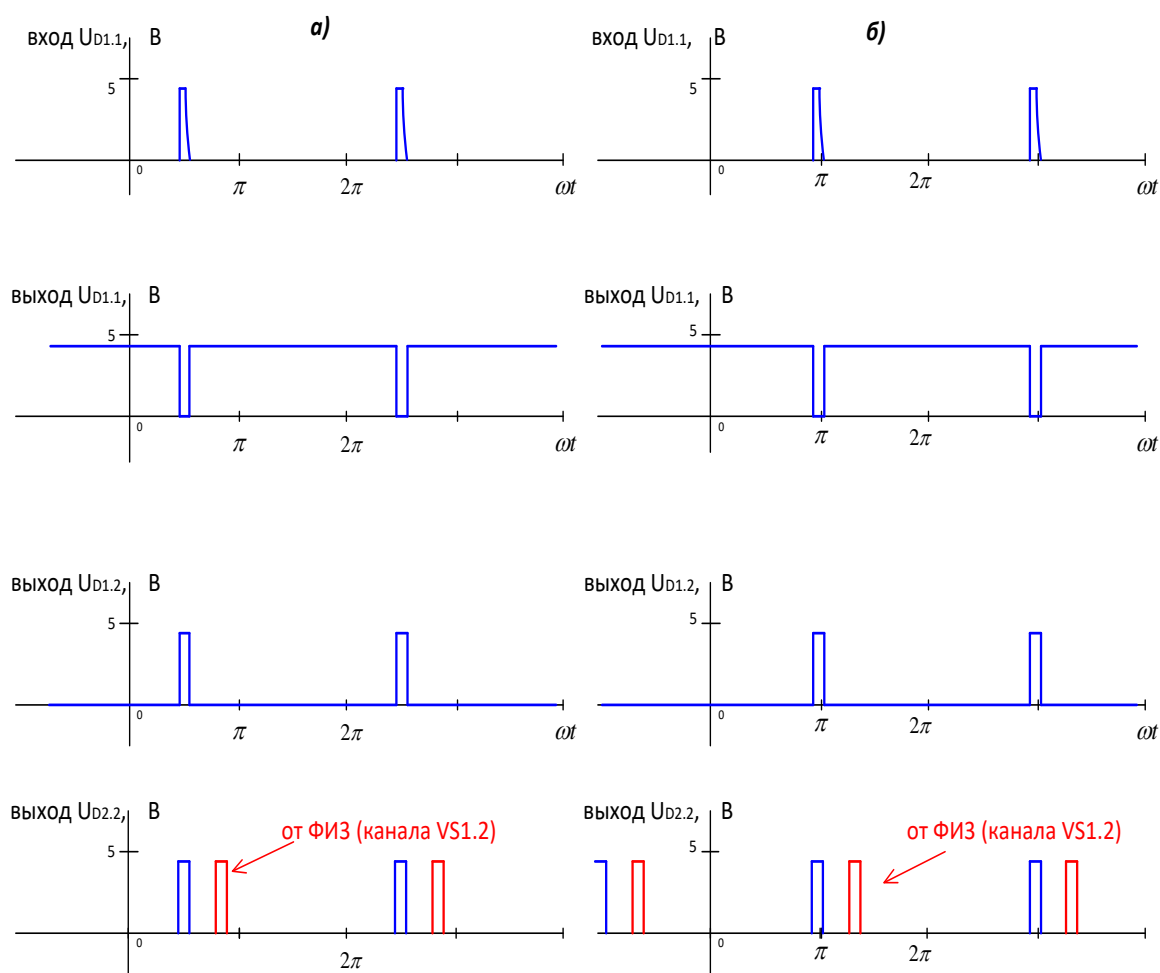


Рис. 4.7 Диаграммы работы логики формирователя импульса ФИ1 для:

- а) положительного напряжения задания;
- б) отрицательного напряжения задания .

4.4 Расчет и выбор усилителя импульсов

Мощность сигнала, получаемого из выхода формирователя длительности импульсов мала. Усилитель импульсов предназначен для усиления импульсов перед их подачей в цепь управляющего электрода силового тиристора.

Принципиальная электрическая схема усилителя импульсов представлена на рисунке 4.8.

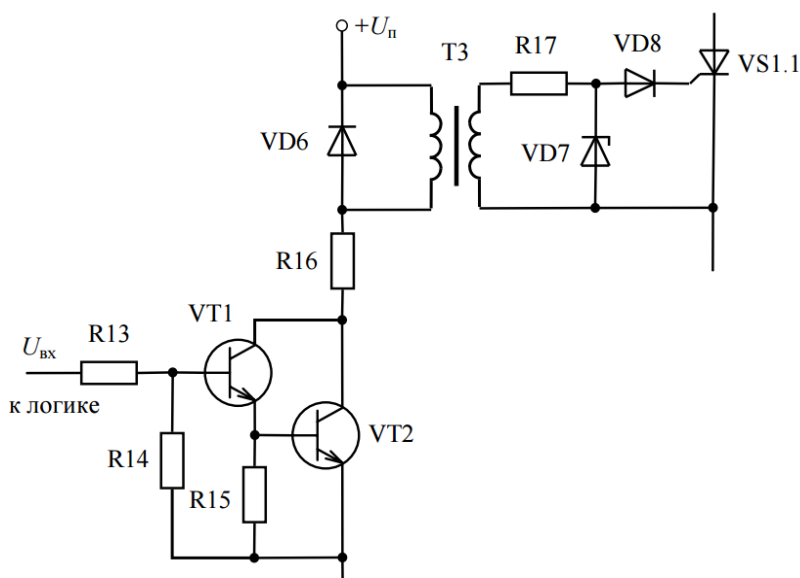


Рисунок 4.8 – Электрическая схема усилителя импульсов (предполагаемая)

На схеме (рисунок 4.8) ТЗ – импульсный трансформатор с числом витков $w_1=400$ и $w_2 = 200$. Исходя из этого, коэффициент трансформации равен

$$k_{mp} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{400}{200} = 2$$

Тогда максимальное значение напряжения импульса управления

$$U_{уп} = \frac{U_n}{k_{mp}} = \frac{24}{2} = 12 \text{ В}$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение питания выходных усилителей.

Зная величину тока управления открытия (таблица 2.2) тиристора $I_{\text{упр}}$, находим сопротивление цепи управления

$$R_{\text{цy}} = \frac{U_{\text{упр}}}{I_{\text{упр}}} = \frac{12}{100 \cdot 10^{-3}} = 120 \text{ Ом}$$

Падение напряжения на управляющем электроде VS1.1 и прямое на диоде принимаем по 0,7 В, отсюда находим их эквивалентное сопротивление

$$R_{\text{э}} = \frac{2 \cdot 0,7}{I_{\text{упр}}} = \frac{2 \cdot 0,7}{100 \cdot 10^{-3}} = 14 \text{ Ом}$$

Для ограничения тока управления VS1.1 необходимо дополнительное сопротивление $R_{17} = R_{\text{цy}} - R_{\text{э}}$, которое выбирают из стандартного ряда.

$$R_{17} = R_{\text{цy}} - R_{\text{э}} = 120 - 14 = 106 \text{ Ом.}$$

Выбираем из стандартного ряда $R_{17} = 56 \text{ Ом}$.

Напряжение стабилизации стабилитрона VD7 выбирается исходя из максимального допустимого напряжения на управляющем электроде тиристора. Ток стабилизации $I_{\text{стаб.VD7}}$ и прямой ток $I_{\text{пр.VD7}}$ через VD7 не должны превышать максимально допустимого значения для выбранного стабилитрона.

$$I_{\text{стаб}} \geq I_{\text{пр.VD7}} = \frac{(U_{\text{упр}} - U_{\text{пр.VD7}})}{R_{17}} = \frac{12 - 0,7}{56} = 0,202 \text{ А}$$

Таблица 4.3 – Параметры стабилитрона

Тип стабилитрона	$U_{\text{ст, ном, В}}$	$I_{\text{ст, мА}}$	$U_{\text{ст, min, В}}$	$U_{\text{ст, max, В}}$
Д815Д	12	500	10,8	13,3

$$R_{10} = \frac{T_2}{C_2} = \frac{3,58 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-9}} = 3,58 \text{ кОм}$$

Диод VD6 выбираем по прямому току и обратному напряжению с коэффициентом запаса равным 2

$$I_{\text{пр. max}} \geq I_{\text{пр. VD6}} = I_1 = 200 \text{ мА}, U_{\text{обр. max}} \geq U_{\text{б. max. VD6}} = 2 \cdot U_{\text{п}} = 2 \cdot 24 = 48 \text{ В.}$$

где I_1 - ток первичной обмотки импульсного трансформатора.

$$I_1 = \frac{I_{\text{уп}}}{k_{\text{мп}}} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{2} = 50 \text{ мА}$$

Таблица 4.3 – Параметры диода

Тип диода	$U_{\text{обр, max, В}}$	$I_{\text{пр, max, мА}}$
Д7А	50	300

Требуемый коэффициент передачи базового тока транзисторов VT1, VT

$$h_{21. \text{сум}} = \frac{k_s \cdot I_1}{I_6} = \frac{2 \cdot 50}{0,4} = 250$$

где $k_s = 1.5 \dots 3.0$ - коэффициент насыщения (обычно принимают $k_s = 2$)

I_6 – предварительное значение базового тока транзистора VT1.

Принимается равным выходному току $I_{\text{вых}}^1$ элемента ИЛИ – НЕ DD2.2.

Требуемый коэффициент передачи базового тока каждого транзистора должен быть не менее

$$h_{21. \text{расч}} = \sqrt{h_{21. \text{сум}}} = \sqrt{250} = 15,81$$

Вместо двух транзисторов VT1 и VT2 используем один составной типа КТ829.

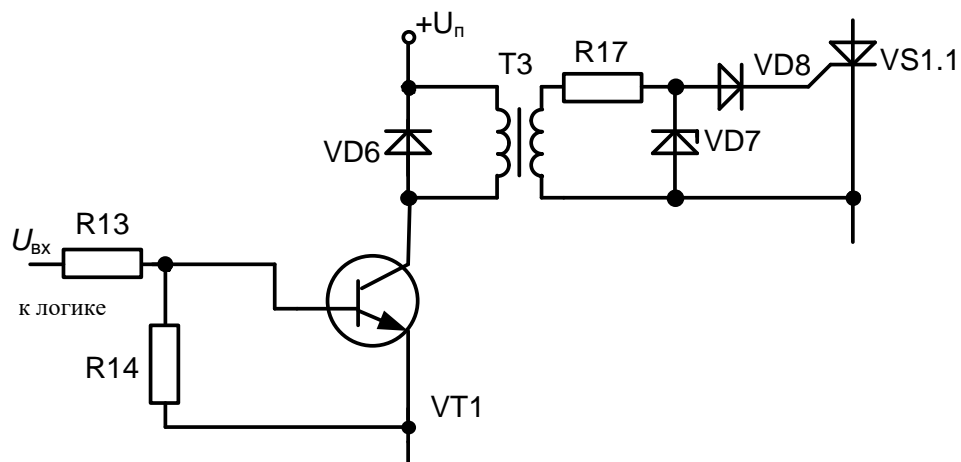


Рисунок 4.9 - Электрическая схема усилителя импульсов (окончательная)

Выбираем транзистор и выписываем его параметры [9].

Таблица 4.3 Параметры транзистора

Тип транзистора	$I_{k \max}$, мА	$h_{21э}$	$U_{кэнас}$, В	$U_{кэ.мах}$, В
КТ972А	2000	750	1,5	60

Пересчитываем базовый ток VT1

$$I_6 = \frac{2 \cdot I_1}{h_{21э}} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{15,81} = 0,00632 \text{ А}$$

Определяем значение сопротивления R_{16}

$$R_{16} = \frac{U_n - 2 \cdot U_{кэ.нас VT2}}{I_{k \max}} = \frac{24 - 2 \cdot 0,5}{2} = 11,5 \text{ Ом}$$

Принимаем $R_{16} = 12 \text{ Ом}$.

Рассчитываем и выбираем сопротивление R_{13}

$$R_{13} \leq \frac{U_{вх}}{I_6} = \frac{2,4}{0,00632} = 379 \text{ Ом}$$

где $U_{вх}$ – напряжение на входе устройства, равное $U_{вых}^1$ элемента ИЛИ-НЕ;

I_6 – базовый ток транзистора VT1.

Для уменьшения начального тока коллектора транзистора VT2 между базой и эмиттером ставим сопротивление $R_{15} = 1 \text{ кОм}$.

Этой же цели служит и резистор R_{14} , включенный между базой и эмиттером транзистора VT1. Значение сопротивления $R_{14} = 10 \text{ кОм}$.

4.5 Расчет и выбор управляющего органа

Управляющий орган (УО) в реверсивных ТП с совместным согласованным управлением предназначен для получения двух равных по модулю, но разных по знаку напряжений управления, подаваемых затем на нуль-органы СИФУ. Кроме того, УО производит ограничение по модулю максимальной величины этих напряжений. Как правило, управляющий орган усиление входного сигнала не производит, т.е. его коэффициент усиления по напряжению равен 1. Поэтому в дальнейшем будем считать, что напряжение управления на выходе УО $U_{упр}$, до момента ограничения, равно напряжению заданию $U_{зад}$.

Принципиальная схема управляющего органа представлена на рисунке 4.10.

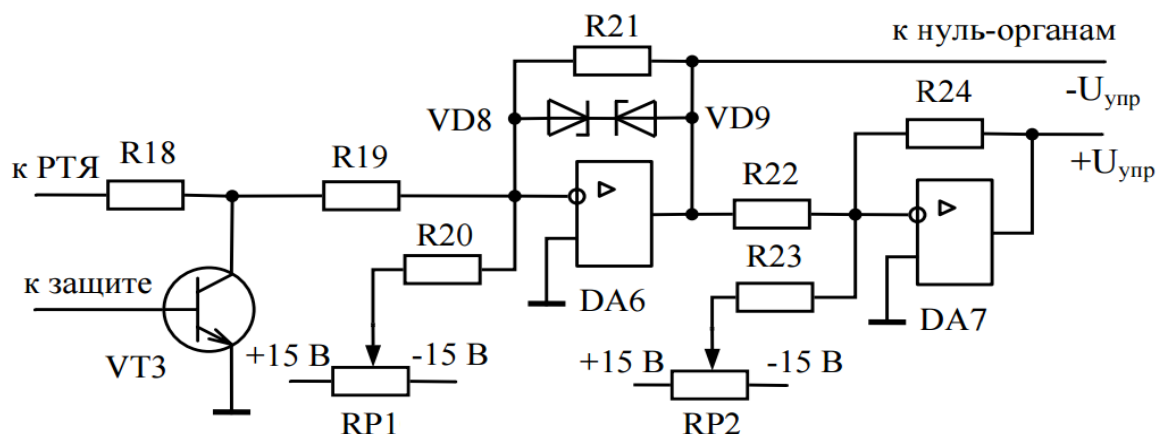


Рисунок 4.10 – Электрическая схема управляющего органа

Будем считать, что на входе ограничителя, выполненного на операционном усилителе DA6, стоит выходной резистор регулятора тока якоря $R_{18} = 6,2 \text{ кОм}$ и транзистор VT3 (элемент схемы электронной защиты).

Принимаем значение резистора $R_{19} = 12 \text{ кОм}$. Тогда для обеспечения коэффициента передачи ОУ на DA6 равного единице должно выполняться условие

$$R_{21} = R_{18} + R_{19} = 6,2 + 12 = 18,2 \text{ кОм}$$

Аналогично для второго ОУ на DA7 выбираем $R_{22}=R_{24}=R_{21}=18 \text{ кОм}$.

Для установки начального угла управления $\alpha_{\text{нач}}=90^\circ$ и компенсации ЭДС смещения операционных усилителей используются резисторы RP_1 , R_{20} и RP_2 , R_{23} . Значение сопротивления резисторов R_{20} и R_{23} выбирается равным R_{19} . Резисторы R_{20} и R_{23} являются нагрузочными для потенциометров RP_1 и RP_2 . Чтобы уменьшить их влияние на работу делителей необходимо значение сопротивления резисторов RP_1 и RP_2 выбирать в 5 – 10 раз меньше значения резисторов R_{20} и R_{23}

Принимаем $RP_1 = RP_2 = 2 \text{ кОм}$.

Стабилитроны VD8 и VD9 рассчитываются и из условия ограничения максимального и минимального углов открывания тиристоров

Минимальный угол открывания тиристоров α_{min} выбирается в пределах $10^\circ \dots 22^\circ$. В этом случае максимальное напряжение управления на выходе УО не должно превышать значения:

Принимаем $\alpha_{\text{min}}=10^\circ$, тогда

$$U_{\text{упр}} = U_{\text{оп.мах}} \cdot \cos \alpha_{\text{min}} = 11 \cdot 0,98 = 10,83 \text{ В}.$$

Стабилитроны выбираются малой мощности с номинальным напряжением стабилизации $U_{\text{ст.ном}} \approx U_{\text{упр.мах}} - U_{\text{пр}}$,

$$U_{\text{ст.ном}} \approx 10,83 - 0,7 = 10,13 \text{ В}.$$

где $U_{\text{пр}}=0,7 \text{ В}$ – учитывает прямое падение напряжения на втором стабилитроне.

Тип стабилитрона	$U_{\text{ст, ном, В}}$	$I_{\text{ст, мА}}$
КС210Б	10	10

После выбора стабилитронов и записи их параметров, рассчитываются действительные значения минимальных углов управления:

$$\alpha_{\text{min}}^{\text{действ}} = \arccos\left(\frac{U_{\text{ст.ном}} + U_{\text{пр}}}{U_{\text{оп.мах}}}\right) = \arccos\left(\frac{10 + 0,7}{11}\right) = 13,41^\circ$$

Таким образом, значения действительного и принятого угла управления α_{min} оказались близки.

КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ					Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	

5. Разработка датчика интенсивности

5.1 Расчет и выбор элементов датчика интенсивности

Предполагаемая принципиальная электрическая схема датчика интенсивности изображена на рисунке 5.1.

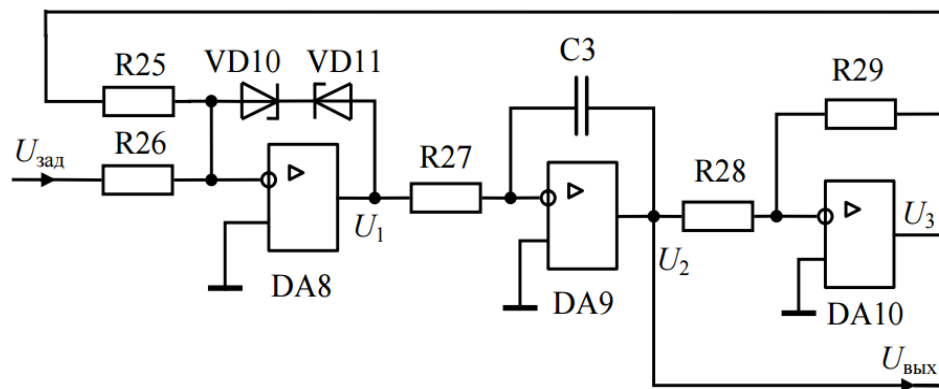


Рисунок 5.1 – Электрическая схема датчика интенсивности (предполагаемая)
Необходимые данные для расчета датчика интенсивности берем из задания на курсовой проект: $t_n = 9 \text{ с}$; $U_{\text{зад max}} = 10 \text{ В}$; $U_{\text{вых max}} = 10 \text{ В}$.

Рассчитываем интегратор на ОУ DA9.

Конденсатор C_3 должен быть неэлектролитическим, так как напряжение на выходе датчика интенсивности $U_{\text{вых}}$ может быть и положительным и отрицательным. Емкость конденсатора C_3 принимаем $C_3 = 1,4 \text{ мкФ}$.

Выбираем по [8] стабилитроны с $U_{\text{ст}} = 9 \text{ В}$. Выбираем стабилитроны серии КС109Б.

Тип стабилитрона	$U_{\text{ст, ном, В}}$	$I_{\text{ст, мА}}$	$U_{\text{ст, min, В}}$	$U_{\text{ст, max, В}}$
КС109Б	9	10	8,5	9,5

Из формулы $U_{\text{вых}} = \frac{U_1}{R_{27} \cdot C_3} \cdot t_n$ находим R_{27} .

$$R_{27} = \frac{U_1 \cdot t_n}{U_{\text{вых}} \cdot C_3} = \frac{9,7 \cdot 9}{10 \cdot 1,4 \cdot 10^{-6}} = 6,2 \text{ МОм}$$

где $U_1 = U_{\text{ст VD13}} + U_{\text{пр VD14}} = 9 + 0,7 = 9,7 \text{ В}$.

Так как значение R_{27} получается более 1 МОм, то для его уменьшения поставим делитель напряжения. Принимаем $R_{27}' = 1$ МОм.

Находим уровень напряжения U_1'

$$U_1' = \frac{U_1 \cdot R_{27}'}{R_{27}} = \frac{9,7 \cdot 1}{9,7} = 1 \text{ В}$$

Выбираем R_{30} и R_{31} из условий из условий $R_{31} \ll R_{27}'$ и $R_{30} \geq R_{\text{н min}}$, где $R_{\text{н min}}$ минимальное сопротивление нагрузки выбранного ОУ.

Принимаем $R_{30} = 9,1$ кОм и находим R_{31}

$$R_{31} = \frac{U_1' \cdot R_{30}}{U_1 - U_1'} = \frac{1 \cdot 9,1 \cdot 10^3}{9,7 - 1} = 1045,98 \text{ Ом}$$

Принимаем $R_{31} = 1,05$ кОм.

Принимаем значение сопротивлений $R_{25} = R_{26} = R_{28} = 12$ кОм и рассчитываем сопротивление R_{29}

$$R_{29} = \frac{U_{\text{зад. max}} \cdot R_{28}}{U_{\text{вых. max}}} = \frac{10 \cdot 12 \cdot 10^3}{10} = 12 \text{ кОм}$$

Окончательная схема задатчика интенсивности имеет вид (рисунок 5.2)

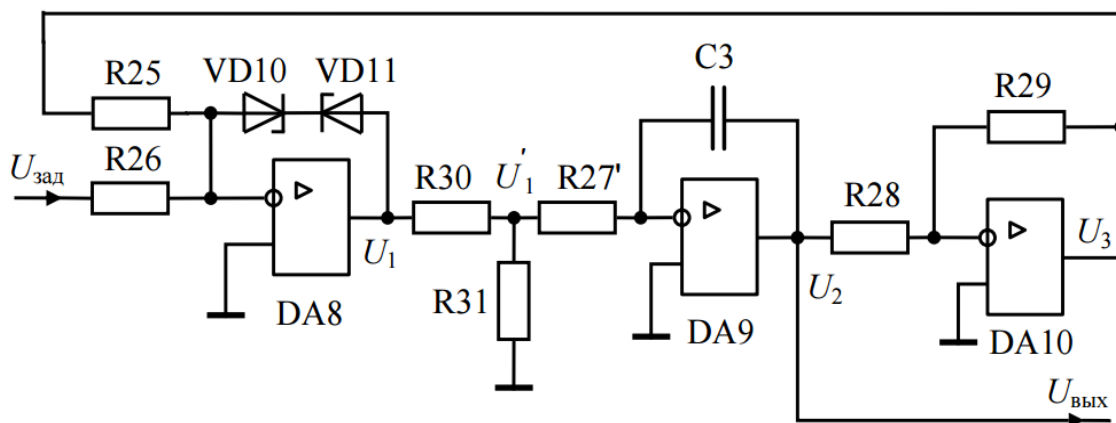


Рисунок 5.2 – Электрическая схема задатчика интенсивности

5.2 Описание работы задатчика интенсивности

Задатчик интенсивности формирует плавное изменение задающего сигнала при переходе от одного уровня к другому, т.е. создает линейное нарастание и спад сигнала.

Первый ОУ DA8 работает без обратной связи, но с ограничением выходного напряжения U_1 и имеет характеристику прямоугольной формы.

Второй ОУ DA9 – интегратор с постоянным темпом нарастания.

Третий ОУ DA10 – формирует отрицательное напряжение обратной связи U_3 .

При подаче на вход задающего напряжения $U_{\text{зад}}$ напряжение на выходе линейно нарастает.

В момент времени $t = t_{\text{пуск}} (|U_3| = |U_{\text{зад}}|)$ интегрирование прекращается и выходное напряжение остается на уровне $U_{\text{вых}} = \frac{R_{28}}{R_{29}} \cdot U_{\text{зад}}$.

.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

6 Разработка схемы электронной защиты ТП

По заданию на курсовой проект необходимо разработать схему электронной защиты ТП от не правильного чередования фаз или обрыва фаз. Схема защиты приведена на рисунке 6.1.

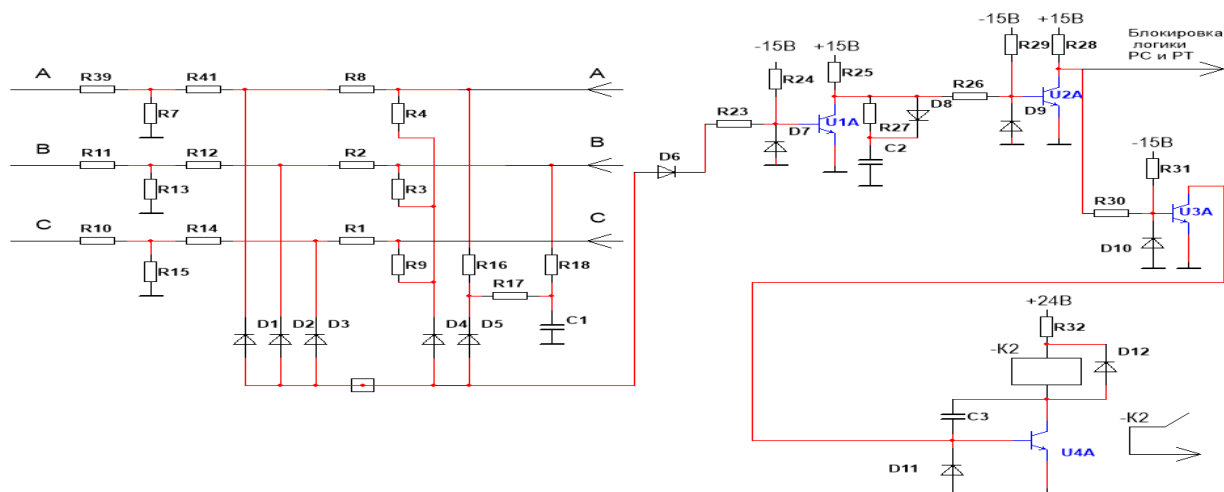


Рисунок 6.1 – Схема электронной защиты ТП от неправильного чередования фаз или обрыва фаз.

Защита от обрыва или неправильного чередовании фаз СР выполнена на компараторе D45, транзисторе VT55 и светодиоде VH306. Логический сигнал управления защитой снимается со схемы сравнения напряжений силовой цепи и цепи синхронизации. При правильном соединении фаз выходное напряжение схемы равно нулю, так как $R+R=0$, $S+S=0$ и $T+T=0$. В случае обрыва фазы или неправильного соединения появляется неуравновешенное напряжение отрицательного знака, приводящее к срабатыванию компаратора D45. Включается транзистор VT55, горит светодиод VH306 (СР), снимается сигнал Готовность. Цепочка R339, C301 производит фильтрацию входных импульсов. Восстановление защиты происходит автоматически при исчезновении неисправности, т. к. компаратор D45 не имеет положительной обратной связи. Выходной сигнал компаратора поступает также в схему блокирования логики переключения комплектов, регуляторов скорости и тока.

КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ					Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	

7. Расчет и построение регулировочной и внешних характеристик ТП

Регулировочная характеристика СИФУ при линейной пилообразной форме опорного напряжения определяется выражением

$$\alpha = \arccos \frac{U_{\text{упр}}}{U_{\text{оп max}}},$$

где $U_{\text{оп.max}}$ – максимальное значение опорного напряжения (11 В);

$U_{\text{упр}}$ – напряжение управления на входе СИФУ.

Регулировочная характеристика ВГ при не учете внутреннего сопротивления преобразователя имеет вид

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha,$$

где U_{d0} – наибольшая величина среднего выпрямленного напряжения.

Тогда характеристика управления ТП в целом при косинусоидальном опорном напряжении определяется выражением

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \left(\arccos \frac{U_{\text{упр}}}{U_{\text{оп.max}}} \right) = U_{d0} \cdot \frac{U_{\text{упр}}}{U_{\text{оп.max}}}$$

$$U_d = U_{d0} \cdot \frac{U_{\text{упр}}}{U_{\text{оп.max}}} = 553,9 \cdot \frac{5}{11} = 251,7 \text{ В}$$

Результаты расчета характеристики управления ТП представим в виде таблицы 7.1.

Таблица 7.1- Результаты расчета характеристики управления

$U_{\text{упр}}$	В	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
α	град	155,38	144,9	136,6	129,5	123,1	117	111,3	105,8	100,5	95,2
U_d	В	-503,5	-453	-402,8	-352,4	-302	-251,7	-201,4	-151	-100,7	-50,3

Продолжение таблицы 7.1

$U_{\text{упр}}$	В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α	град	90	84,8	79,5	74,2	68,6	62,9	56,9	50,5	4,3	35	24,6
U_d	В	0	50,3	100,7	151	201,4	251,7	302	352,4	402,8	453	503,5

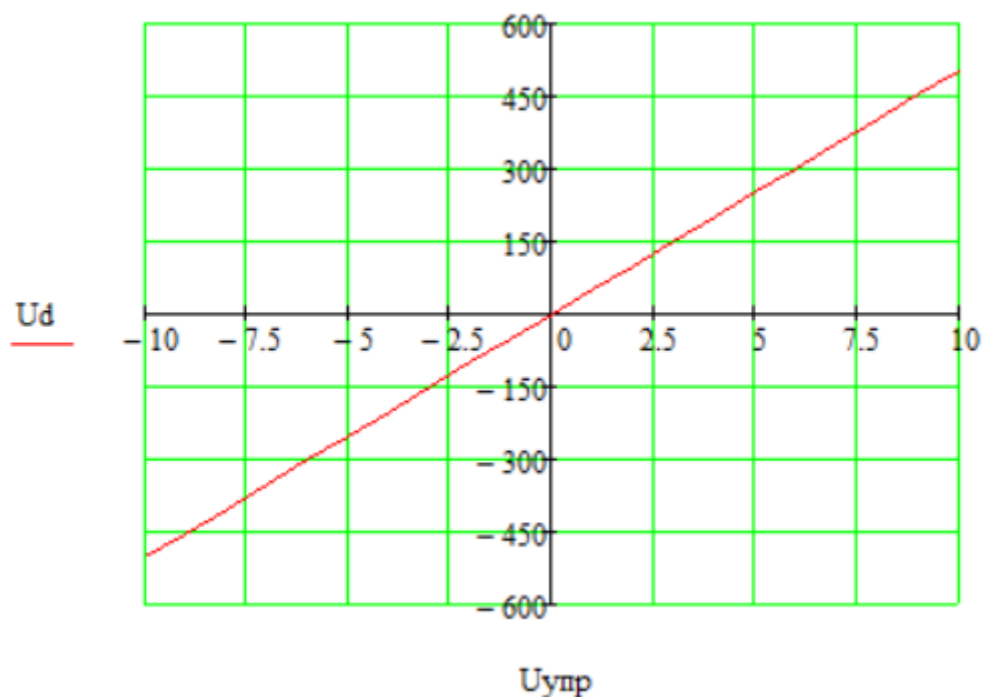


Рисунок 7.1 – Зависимость $U_d = f(U_y)$

Внешняя характеристика ТП – это зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от тока нагрузки. Для управляемого выпрямителя при активно-индуктивной нагрузке внешняя характеристика рассчитывается по формуле

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha - \frac{p \cdot I_d \cdot x_a}{2 \cdot \pi} - I_d \cdot r_{2к} - N \cdot \Delta U$$

где U_{d0} – наибольшая величина среднего выпрямленного напряжения;

α – угол управления тиристорами;

I_d – ток нагрузки;

x_a – анодное индуктивное сопротивление. В нашем случае $x_a = x_{2T}$;

r_{2K} – активное сопротивление трансформатора, приведенное к вторичной обмотке;

$\Delta U_{пр}$ – прямое падение напряжения на открытом вентиле;

N – количество вентилях, одновременно обтекаемых током.

Внешние характеристики ТП рассчитываем и строим для напряжений $U_{зад} = -10; -5; 0; 5; 10$ В.

При расчете внешней характеристики ток нагрузки I_d будем изменять от $-I_{дн}$ до $+I_{дн}$.

Приведем расчет U_d для одного значения $U_{зад} = 5$ В ($\alpha = 62,9^\circ$) и тока $I_d = I_{дн} = 22,862$ А.

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \frac{p \cdot I_d \cdot x_a}{2 \cdot \pi} - I_d \cdot r_{2K} - N \cdot \Delta U = 553,9 \cdot \cos 62,9 - \frac{6 \cdot 22,862 \cdot 0,418}{2 \cdot \pi} - 22,862 \cdot 0,43 - 2 \cdot 1,75 = 234,7 \text{ В}$$

Результаты расчета внешних характеристик сводим в таблицу 7.2.

Таблица 7.2- Результаты расчета внешних характеристик

		$I_d, \text{ A}$	-23	-11,5	0	11,5	23
$U_{зад1} = -10 \text{ В}$	$\alpha_1 = 155,38$	$U_d, \text{ В}$	-506,2	-511,2	-516,1	-521,1	-526
$U_{зад2} = -5 \text{ В}$	$\alpha_2 = 117$	$U_d, \text{ В}$	-254,2	-259,14	-264,	-269	-273,9
$U_{зад3} = 0 \text{ В}$	$\alpha_3 = 90^\circ$	$U_d, \text{ В}$	-2,7	-7,6	-12,6	-17,5	-22,5
$U_{зад4} = 5 \text{ В}$	$\alpha_4 = 62,9$	$U_d, \text{ В}$	249,6	244,6	239,7	234,7	229,8
$U_{зад5} = 10 \text{ В}$	$\alpha_5 = 24,6$	$U_d, \text{ В}$	500,9	495,9	491	486	481,1

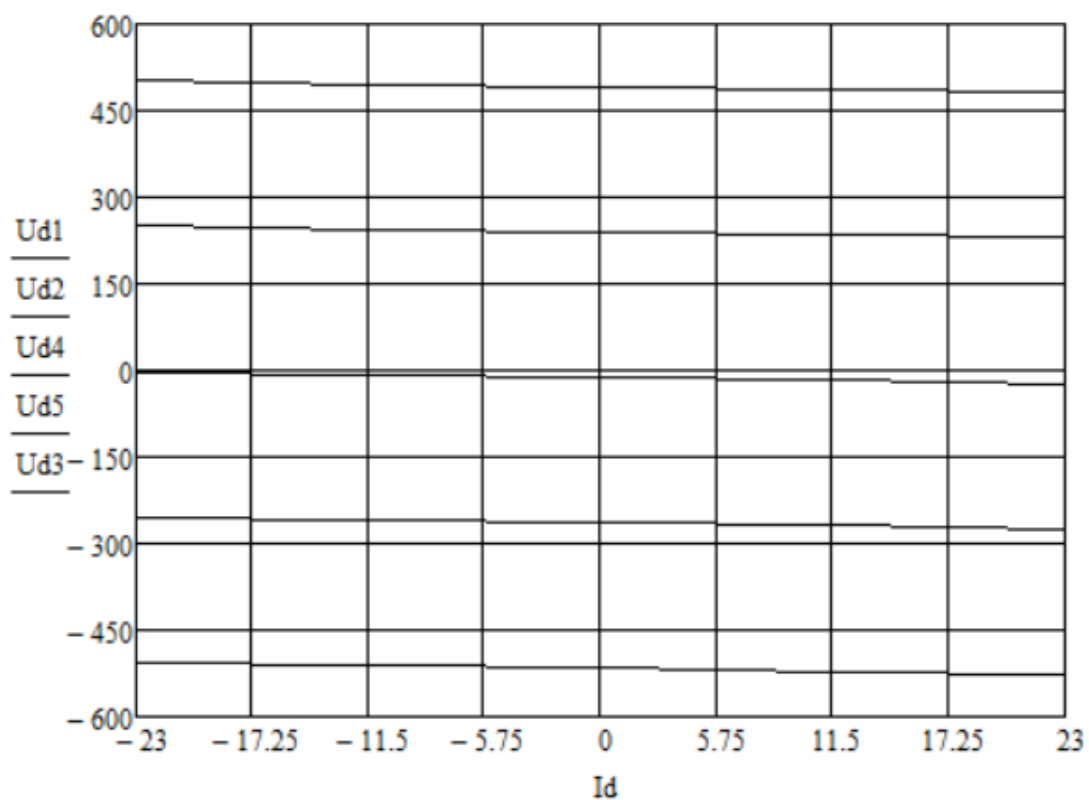


Рисунок 7.3 – Внешние характеристики преобразователя при различных напряжениях задания

8 Расчет энергетических показателей

8.1. Полной, активной и реактивной мощностей.

Активная мощность, потребляемая ТП в номинальном режиме

$$P_{1н} = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1н}^{(1)} \cdot \cos \phi_{1н} = 3 \cdot 220 \cdot 19,37 \cdot \cos 38,89^\circ = 9950,6 \text{ Вт},$$

где U_1 – действующее значение фазного напряжения с учетом всех его гармоник,
 $U_1 = 220 \text{ В}$;

$I_{1н}^{(1)}$ – действующее значение тока первой гармоники, соответствующее номинальному току нагрузки.

$$I_{1н}^{(1)} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{дн}}{\pi \cdot k_{тр} \cdot \sqrt{2}} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 22,862}{\pi \cdot 0,92 \cdot \sqrt{2}} = 19,37 \text{ А}$$

где $I_{дн}$ – номинальное значение тока нагрузки;

$k_{тр}$ – коэффициент трансформации трансформатора;

$\phi_{1н}^{(1)}$ – угол отставания основной гармоники тока.

Угол сдвига $\phi_{1н}^{(1)}$ первой гармоники потребляемого тока относительно напряжения питания определяется по формуле [11, формуле 6.62]

$$\phi_{1н}^{(1)} \approx \alpha_n + \frac{\gamma}{2} = 37,4^\circ + \frac{2,98^\circ}{2} = 38,89^\circ$$

где α_n – угол управления при номинальном режиме работы электродвигателя

$$\alpha_n = \arccos \frac{U_{дн}}{U_{д0}} = \arccos \frac{440}{553,9} = 37,4^\circ$$

$$\gamma = \arccos \left[\cos \alpha_n - \frac{2 \cdot x_a \cdot I_{дн}}{\sqrt{6} \cdot U_2} \right] - \alpha_n = \arccos \left[\cos 37,4^\circ - \frac{2 \cdot 0,418 \cdot 22,862}{\sqrt{6} \cdot 238,7} \right] - 37,4 = 2,98^\circ$$

где x_a – анодное индуктивное сопротивление. В нашем случае $x_a = x_{2г}$;

U_2 – фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Реактивная мощность, потребляемая ТП в номинальном режиме

$$Q_{1н} = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1н}^{(1)} \cdot \sin \phi_{1н} = 3 \cdot 220 \cdot 19,37 \cdot \sin 38,89^\circ = 8026,26 \text{ Вар}$$

Полная мощность, потребляемая ТП в номинальном режиме

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

$$S_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 = 3 \cdot 220 \cdot 22,21 = 14658,6 \text{ ВА}$$

где I_1 – действующее значение тока первичной обмотки трансформатора.

8.2 Расчет мощности искажений

Мощность искажений определяем по формуле

$$T_1 = \sqrt{S_1^2 - P_{1н}^2 - Q_{1н}^2} = \sqrt{14658,6^2 - 9950,6^2 - 8026,26^2} = 7172,11 \text{ ВА}$$

где S_1 – полная мощность, потребляемая ТП;

$P_{1н}$ – активная мощность, потребляемая ТП в номинальном режиме;

$Q_{1н}$ – реактивная мощность, потребляемая ТП в номинальном режиме.

8.3 Расчет КПД и коэффициента мощности

Коэффициент полезного действия преобразователя характеризуется отношением активной мощности, отдаваемой в нагрузку, к полной мощности, потребляемой преобразователем.

КПД преобразователя определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_d}{P_d + \Delta P} = \frac{10,05}{10,05 + 0,81476} = 0,925$$

где P_d – мощность, потребляемая электродвигателем,

$$P_d = \frac{P_{дн}}{\eta} = \frac{8,5}{0,845} = 10,05 \text{ кВт}$$

ΔP – суммарная мощность потерь в преобразователе, которая определяется по формуле

$$\Delta P = \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{упр}} + \Delta P_{\text{тр}} = 120,02 + 0,0425 + 694,7 = 814,76 \text{ Вт}$$

где $\Delta P_{\text{в}}$ – потери в вентилях

$$\Delta P_{\text{в}} = n \cdot \Delta U \cdot I_{a1} = 6 \cdot 1,75 \cdot 11,431 = 120,02 \text{ Вт}$$

где $n = 6$ – количество вентилях в схеме выпрямителя;

$\Delta U = 1,75 \text{ В}$ – прямое падение напряжения на вентиле;

I_{a1} – средний ток в вентиле,

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

$$I_{a1} = \frac{I_{dH}}{3} = \frac{22.862}{3} = 11,431 \text{ А};$$

$\Delta P_{\text{упр}}$ – мощность, потребляемая системой управления. Принимаем

$$\Delta P_{\text{упр}} = 0,5\% \cdot P_d = 0,005 \cdot 8,5 = 0,0425 \text{ кВт};$$

$\Delta P_{\text{тр}}$ – потери в силовом трансформаторе

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{м}} = 140 + 553,7 = 694,7 \text{ Вт};$$

где $\Delta P_{\text{ст}}$ – потери в стали трансформатора, $\Delta P_{\text{ст}} = P_{\text{хх}} = 140 \text{ Вт}$;

$\Delta P_{\text{м}}$ – потери в меди трансформатора

$$\Delta P_{\text{м}} = P_{\text{кз}} \cdot \left(\frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} \right)^2 = 550 \cdot \left(\frac{20,57}{20,5} \right)^2 = 553,7 \text{ Вт};$$

Коэффициент мощности χ определяется отношением активной мощности, потребляемой преобразователем, к полной мощности и характеризует использование питающей сети.

Коэффициент мощности χ определяем по формуле

$$\chi = \frac{P_{1H}}{S_1} = \frac{9950,6}{14658,6} = 0,678$$

где P_{1H} – активная мощность, потребляемая ТП в номинальном режиме;

S_1 – полная мощность, потребляемая ТП в номинальном режиме.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

9. Построение графиков выходного напряжения при указанном напряжении задания

Для построения диаграмм напряжений и токов определим значение угла открывания тиристоров при заданном значении напряжения управления $U_{\text{зад}} = 3 \text{ В}$ и угла коммутации, приняв, что ток преобразователя равен номинальному току двигателя.

$$\alpha_1 = \arccos \frac{U_{\text{упр}}}{U_{\text{он.мах}}} = \arccos \frac{3}{11} = 74,17^\circ$$

$$\alpha_2 = \pi - \alpha_1 = 180 - 74,17 = \beta_1 = 105,83^\circ$$

$$\gamma = \arccos \left[\cos \alpha_1 - \frac{2 \cdot x_a \cdot I_{dH}}{\sqrt{6} \cdot U_2} \right] - \alpha_1 = \arccos \left[\cos 74,17^\circ - \frac{2 \cdot 0,418 \cdot 22,862}{\sqrt{6} \cdot 238,7} \right] - 74,17 = 1,94$$

Так как угол коммутации вентилей менее 5° , то при построении графиков его можно не учитывать.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

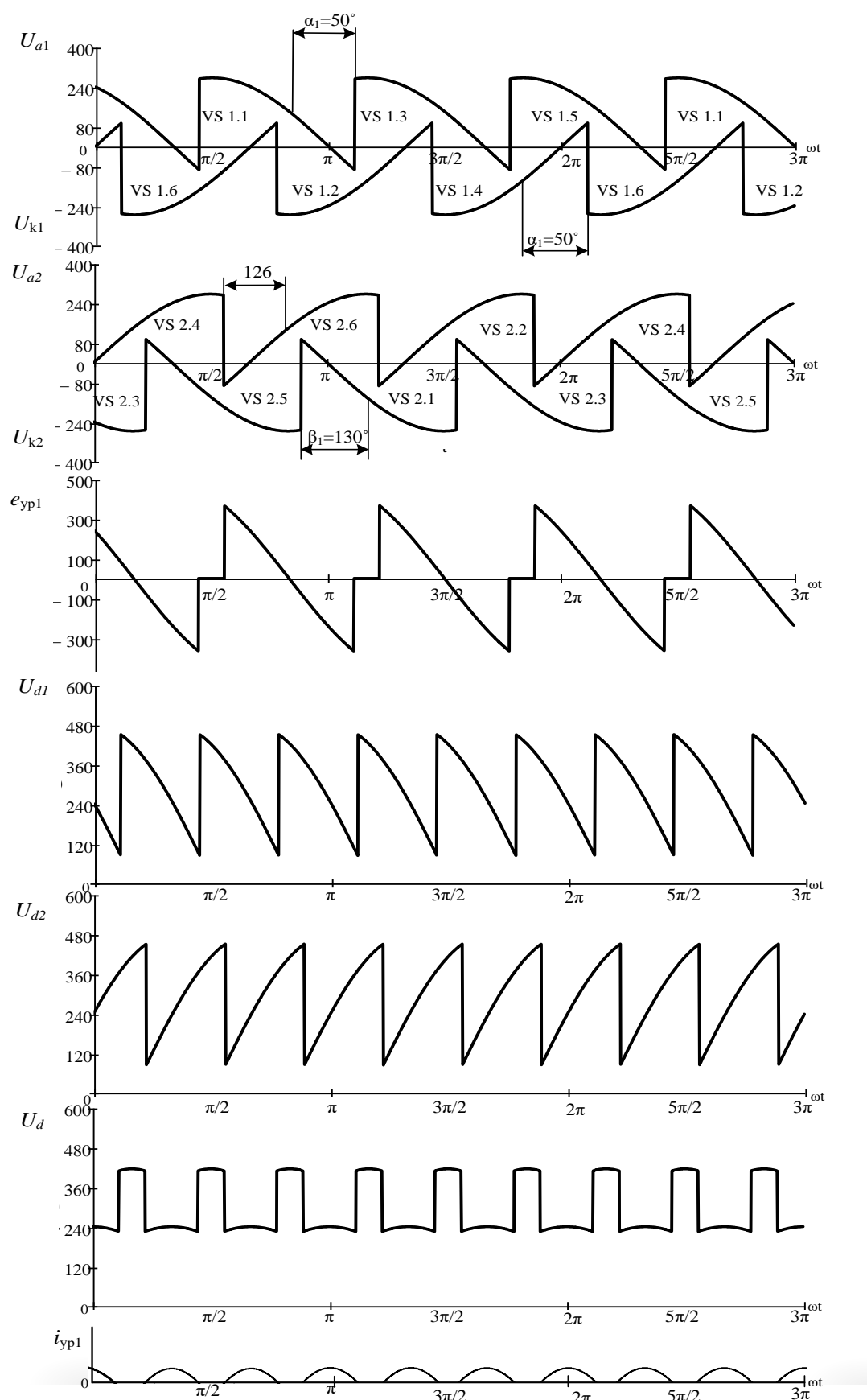


Рисунок 9.1— Диаграммы выходных напряжений ТП, уравнивающей ЭДС и тока

КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ					Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	

Заключение

В результате выполнения данного курсового проекта спроектирован тиристорный преобразователь для двигателя 2ПН132L мощностью 8,5 кВт с номинальным напряжением якоря 440 В и номинальным током 22,862 А.

В ходе проектирования решены следующие задачи:

- выбрана силовая схема преобразователя;
- рассчитаны и выбраны элементы силовой схемы;
- рассчитана и выбрана силовая коммутационная и защитная аппаратура;
- выбрана структура и основные узлы системы управления преобразователем;
- рассчитаны и выбраны основные элементы СИФУ преобразователя;
- разработан датчик интенсивности;
- разработана схема электронной защиты преобразователя от неправильного чередования фаз или обрыва фазы;
- рассчитаны и построены характеристики преобразователя;
- рассчитаны энергетические показатели.

Спроектированный преобразователь обладает высокими энергетическими показателями:

- КПД $\eta = 92,8 \%$;
- коэффициент мощности $\chi = 0,678$, при полезной мощности $P_d = 10,05$ кВт.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

ЛИТЕРАТУРА

1. Анхинюк В. Л., Опейко О. Ф. Проектирование систем автоматического управления электроприводами. Мн.: Вышэйш. шк., 1986.
2. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И. Х. Евзеров, А. С. Горобец, Б. И. Мошкович и др.; Под ред. канд. технических наук В. М. Перельмутера. – М.: Энергоиздат, 1988. – 319 с.: ил.
3. Тиристоры: Справочник /О. П. Григорьев, В. Я. Замятин, Б. В. Кондратьев, С. Л. Пожидаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.: ил.
4. Справочник по проектированию электропривода и систем управления технологическими процессами /Под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1982. – 486 с., ил.
5. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник /О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недшивин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с., ил.
6. Цифровые микросхемы: Справ./ М. И. Богданович, И. Н. Грель, В. А. Прохоренко, В. В. Шалимо. – Мн.: Беларусь, 1991 – 493 с., ил.
7. Аналоговые интегральные схемы: Справочник /А. Л. Булычев, В. И. Галкин, В. А. Прохоренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн.: Беларусь, 1993. – 382 с.: ил.
8. Диоды: Справочник /О. П. Григорьев, В. Я., Замотин Б. В. Кондратьев, С. Л. Пожидаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 336 с.: ил.
9. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: Справочник / К. М. Брежнева, Е. И. Гантман, Т. И. Давыдова и др. Под ред. Б. Л. Перельмана. – М.: Радио и связь, 1981. – 656 с., ил.
10. Чернов Е.А., Кузьмин В.П. Комплектные электроприводы станков с ЧПУ: Справочное пособие. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1989. – 320 с., ил.
11. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник /Н.Н. Акимов, В.П. Вашуков, В.А. Прохоренко, Ю.П. Ходоренок. – Мн.: Беларусь, 1994. – 591 с.: ил.
12. Справочник по проектированию электропривода силовых и осветительных установок. / Под ред. Я.М. Большама, В.И. Круповича, М.Л. Самовера. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 728 с., ил.

					КР.1-53 01 05.ЭП-21.02.ПЗ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Разраб.	Ашомко М.В.				Литература			Лист	Лист	Листов
Пров.	Погоуляев М.Н.							у		
Н. контр.										
Утв.										
					ГГТУ, гр. ЭП-21					

Содержание

Введение.....	
1 Выбор силовой схемы преобразователя.....	
2 Расчет и выбор элементов силовой схемы.....	
2.1 Трансформатор.....	
2.2 Тиристоры.....	
2.3 Уравнительные реакторы.....	
2.4 Сглаживающий дроссель.....	
2.5 Расчет и выбор силовой коммутационной и защитной аппаратуры.....	
3 Выбор структуры и основных узлов импульсно-фазового управления(СИФУ) преобразователя.....	
4 Расчет и выбор основных элементов СИФУ преобразователя.....	
4.1 Генератор опорного напряжения.....	
4.2 Нуль-орган.....	
4.3 Формирователь длительности и распределителя импульсов.....	
4.4 Расчёт усилителя импульсов.....	
4.5 Управляющий орган.....	
5 Разработка задатчика интенсивности.....	
5.1 Расчет и выбор элементов задатчика интенсивности.....	
5.2 Описание работы задатчика интенсивности.....	
6 Разработка схемы электронной защиты ТП . Расчет и выбор элементовсхемы электронной защиты.....	
7 Расчет и построение регулировочной и внешних характеристик ТП.....	
8 Расчет энергетических показателей.....	
8.1 Полной, реактивной и активной мощностей.....	
8.2 Расчет мощности искажений.....	
8.3 Расчет КПД и коэффициента мощности.....	
9 Построение графиков выходного напряжения при указанном напряжении задания.....	
10 Спецификация.....	
Заключение.....	
Литература.....	
Приложения	