

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
КАФЕДРА САУ

КУРСОВАЯ РАБОТА
по дисциплине «Силовая Электроника»
ТЕМА: ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Студент гр. 6492

Огурецкий Д.В.

Преподаватель

Павлова В.А.

Санкт-Петербург
2019

ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Спроектировать регулируемый преобразователь (СП) переменного тока в постоянный, оценить его влияние на сеть автономного объекта, предложить и рассчитать систему управления для трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя (УВ) в зависимости от варианта задания.

Таблица 1

Вариант №	Фамилия, имя, отчество	U _{н.ном.}	E	E	R _{н.ном.}	dR1	dR2	X _н	U _{1ф}
		В	%	В	Ом	Ом	Ом	Ом	В
21	Огурецкий Дмитрий Викторович	12	60	7	0,04	-0,01	0,04	1	230

Спроектировать регулируемый преобразователь (СП) переменного тока в постоянный, оценить его влияние на сеть автономного объекта. Составить принципиальную схему трехфазного мостового выпрямителя (ТМУВ), работающего в том числе на противо-ЭДС в зависимости от варианта задания.

Исходные данные к проекту приведены в таблице согласно номеру варианта. Они включают:

Заданную схему силовой части СП;

параметры нагрузки:

U_{ном} – номинальное напряжение нагрузки;

R_н и X_н – активное и индуктивное сопротивления нагрузки;

dU = (+10/-20)% – диапазон изменения напряжения на нагрузке;

U_{1л} – действующее линейное напряжение питающей сети (для трехфазного УВ);

U_{1ф} – действующее фазное напряжение питающей сети (для однофазного УВ);

E – величина противо-ЭДС;

f₁=50Гц – частоту питающей сети;

K=25 – коэффициент трансформации.

$$\text{Рассчитаем } L_n = \frac{X_n}{2\pi\nu} = \frac{1}{2\pi 300} = 530,5 \text{ мкГн}$$

Оглавление

Общие сведения	3
1. Первичный анализ схемы УВ.....	6
Расчет средних значений выпрямленного напряжения, тока и мощности	6
Построение временных диаграмм, иллюстрирующих работу заданного управляемого выпрямителя	6
2. Выбор полупроводниковых приборов	7
3. Вывод и графическое представление регулировочной характеристики проектируемого управляемого выпрямителя.....	8
4. Выбор питающего трансформатора	9
5. Расчет углов управления преобразователя	10
6. Внешняя характеристика преобразователя.....	10
7. Расчет энергетических показателей выпрямителя.....	11
Расчёт коэффициента мощности и гармоник выпрямленного напряжения	11
Расчёт числовых значений гармоник фазного тока в первичной обмотке трансформатора.....	12
Расчёт КПД.....	13
8. ТМУВ с ПЭДС.....	14
Построение временных диаграмм.....	14
Нахождение параметров работы выпрямителя.....	15
Энергетические характеристики	15
9. Исследование заданного преобразователя с помощью виртуальной модели Simulink.....	16
10. Спектральная характеристика.....	20
Заключение	21
Список литературы	22

Общие сведения

Для преобразования электрической энергии переменного тока в постоянный на судах широко используются силовые управляемые выпрямители (Рисунок 1), представляющие собой электрические агрегаты, основными элементами которых являются:

- трансформатор TV, с помощью которого производится электрическая развязка цепей преобразователя, преобразование числа фаз электрической системы, питающей преобразователь;
- блок полупроводниковых элементов VSD;
- выходной фильтр Φ , предназначенный для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.



Рисунок 1

В качестве полупроводниковых элементов в блоке VSD чаще всего используются тиристоры, с помощью которых осуществляется регулирование входного напряжения.

Принципиальную схему трехфазного мостового выпрямителя без ПЭДС (Рисунок 2) и с ним (Рисунок 3).

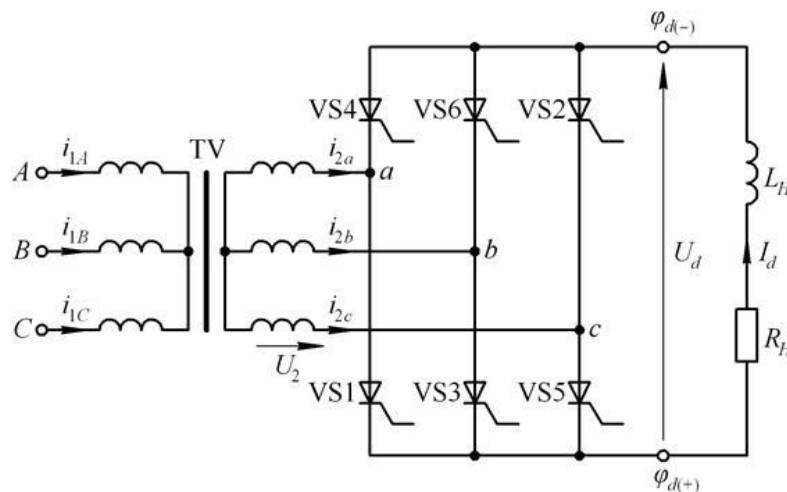


Рисунок 2

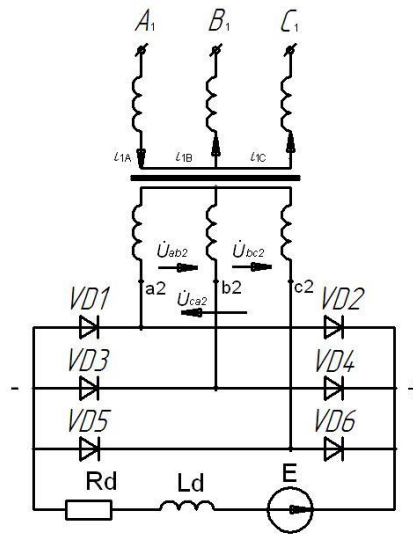


Рисунок 3

Рассмотрение УВ с углом управления $\alpha = 0$ соответствует анализу работы неуправляемого выпрямителя, в котором в качестве полупроводниковых элементов используются диоды. Анализ работы любого выпрямителя (управляемого и нет) заключается, в первую очередь, в построении временных диаграмм, иллюстрирующих процессы изменения параметров всех элементов схемы, как правило, за полтора периода питающего напряжения, построенных для нескольких углов управления, один из которых обязательно равен нулю. Угол управления отсчитывается для однофазных схем – от точки пересечения эмпоры питающего напряжения временной оси; для многофазных схем – от точки пересечения фазных или линейных напряжений.

Основными показателями, определяющими эксплуатационные характеристики выпрямителей, являются:

Средние значения выпрямленных напряжения и тока U_d, I_d .

Регулировочная характеристика - зависимость изменения среднего значения выпрямленного напряжения (U_d) от угла управления (α) $U_d = f(\alpha)$.

Внешняя характеристика – зависимость изменения среднего значения выпрямленного напряжения от тока нагрузки, углов управления (α) и коммутации (γ) $U_{d\alpha\gamma} = f(I_d, \alpha, \gamma)$.

Коэффициент пульсации k_{Π} – отношение амплитуды соответствующей высшей гармоники (v - номер гармоники) выпрямленного напряжения к среднему значению выпрямленного напряжения $k_{\Pi(v)} = U_{(v)\max} / U_d$ или

$$k_{\Pi} = \frac{U_{d\max} - U_{d\min}}{2U_{d0}}$$

Частота пульсаций выпрямленного напряжения за период m .

Коэффициент искажения тока первичной обмотки

$$K_I = \frac{I_{1(1)}}{\sqrt{I_{1(1)}^2 + I_{1(v)}^2}} = \frac{I_{1(1)}}{I_1},$$

где $I_{1(v)}$ - действующее значение v -й гармоники потребляемого тока, I_1 - действующее значение потребляемого тока сети.

Коэффициент искажения кривой напряжения сети $K_U = \frac{\sqrt{\sum_2^n U_{(v)}^2}}{U_{(1)}} 100\%$,

где $U_{(1)}$ - фазное напряжение сети.

Коэффициент полезного действия статического преобразователя

$$\eta = \frac{P_d}{P_d + \sum \Delta P},$$

где $P_d = U_d I_d$, $\sum \Delta P$ - активная составляющая мощности потерь.

Степень завышения мощности питающего трансформатора, $k_{тр} = P_d / S_{тр}$, где $S_{тр}$ - полная расчетная мощность трансформатора при работе в номинальном режиме; $S_{тр} = (S_1 + S_2) / 2$, S_1, S_2 - расчетные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Коэффициент мощности статического преобразователя, $\lambda = P_d / S_{тр} = K_I \cos \varphi_{(1)}$, где $\varphi_{(1)}$ - угол фазового сдвига между питающим напряжением и основной (первой) гармоникой потребляемого СП тока.

Основной особенностью работы УВ средней и большой мощности является возрастающее влияние на режим работы схемы индуктивных сопротивлений, создаваемых потоками рассеяния обмоток трансформатора, а также ослабление влияния на режим работы УВ активных сопротивлений вследствие их относительной малости.

1. Первичный анализ схемы УВ

Расчет средних значений выпрямленного напряжения, тока и мощности

1. По заданному номинальному напряжению нагрузки и диапазону его изменения определяем U_{dmax} ; U_{dmin} .

$$U_{dmax} = U_{dnom} + U_{dnom} * 0.1 = 13.2 \text{ В}$$

$$U_{dmin} = U_{dnom} - U_{dnom} * 0.2 = 9.6 \text{ В}$$

2. По заданному значению сопротивления нагрузки рассчитываем максимальный, номинальный и минимальный средние токи $I_d = U_H / R_H$.

$$I_{dnom} = \frac{U_{dnom}}{R_{dnom}} = 300 \text{ А}$$

$$I_{dmax} = \frac{U_{dmax}}{R_{dnom}} = 330 \text{ А}$$

$$I_{dmin} = \frac{U_{dmin}}{R_{dnom}} = 240 \text{ А}$$

3. Определяем среднее значение мощности, выделяемой на нагрузке в режиме без ПЭДС $P_d = U_H I_H$.

$$P_{dnom} = U_{dnom} * I_{dnom} = 3600 \text{ Вт}$$

Построение временных диаграмм, иллюстрирующих работу заданного управляемого выпрямителя

Выберем элементы схемы, изменение токов и напряжений которых дают необходимую информацию для проектирования УВ:

$$u_{2f}, u_n, I_n, i_{vs1}, u_{vs1}, i_{1A}, u_{2L}.$$

Построим для них временные диаграммы, характеризующие изменение переменных состояния за полтора периода изменения питающего напряжения для углов управления: $\alpha = 0$; $\alpha = \frac{\pi}{4} > \frac{\pi}{6}$; $\alpha = \frac{5\pi}{12} > \frac{\pi}{3}$ на рис.4,5,6 соответственно.

Мы используем допущения:

- 1) п/п элементы идеальны, т.е. их ВАХ идеальна.
- 2) Трансформатор идеален, т.е.

$$x_a = x_b = x_c = 0 \quad r_a \rightarrow 0 \quad k_{tr} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = 25$$

$$3) x_n \gg r_n$$

2. Выбор полупроводниковых приборов

По построенным временным диаграммам и рассчитанным параметрам нагрузки:

1) Определить среднее значение тока, протекающего через вентиль:

$$I_{vsd} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{dnom} d\omega t = \frac{I_{dnom}}{3} = 100(A) \text{ — среднее значение тока, протекающего через вентиль.}$$

2) Определить для конкретной схемы максимальное и действующее значение тока через вентиль:

$$I_{vs} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{dnom}^2 d\omega t} = \frac{I_{dnom}}{\sqrt{3}} = 173(A)$$

3) Для всех 3-ёх углов управления согласно рис.4,5,6 . Для расчёта найдём :

$$U_{2f} = \frac{U_{1f}}{k} = 9.2(B)$$

$$U_{vsmax} = U_{2Lmax} = \sqrt{3}U_{2fmax} = \sqrt{6}U_{2fmax} = 22.54(B)$$

4) Выберем тиристоры согласно каталогу [1] по расчётным значениям

I_{vs}, U_{vsmax} по условиям:

$$\begin{cases} 1.5I_{vsd} \leq I_{T(AV)} \\ I_{vs} < I_{TRMS} \\ U_{VSmax} < U_{RRM} \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} 150 \leq I_{T(AV)} \\ 173 < I_{TRMS} \\ 22.54 < U_{RRM} \end{cases}$$

Под данные критерии подходит тиристор T161–160–4, его параметры:

$I_{T(AV)} = 160A$ — максимально допустимый средний ток в открытом состоянии.

$I_{TRMS} = 260A$ — максимально допустимый действующий ток в открытом состоянии.

$U_{RRM} = 400B$ — повторяющееся импульсное обратное напряжение, наибольшее мгновенное значение обратного напряжения, включая все повторяющиеся напряжения.

$r_T = 1,36 \text{ мОм}$ — динамическое сопротивление в открытом состоянии.

$U_{T(ТО)} = 1.05B$ — пороговое напряжение тиристора в открытом состоянии.

Данные внесём в Таблица 2 .

Таблица 2

Тип прибора	$I_{T(AV)},$ А	$I_{TRMS},$ А	$U_{RRM},$ В	$r_T,$ мОм	$U_{T(TO)},$ В	t_{BKL}	Охлаждение.
T161-160-4	160	260	400	1,05	1,05	100- 250 мкс	O171, O271, O371, O471, OM101

3. Вывод и графическое представление регулировочной характеристики проектируемого управляемого выпрямителя

Выведем аналитическую зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от угла управления, являющуюся регулировочной характеристикой УВ и определяемую по временным диаграммам, построенным в п.0, интегрированием мгновенных значений выпрямленного напряжения в пределах одного этапа повторяемости:

$$U_{d\alpha} = \frac{m}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} U_{2Lmax} \cos \omega t d\omega t = /m = 6/ =$$

$$= \frac{3}{\pi} U_{2Lmax} \left[\sin \frac{\pi}{6} + \alpha - \sin - \frac{\pi}{6} + \alpha \right] = \frac{3\sqrt{6}U_{2f}}{\pi} \cos \alpha \quad (1)$$

Построим регулировочную характеристику на в относительных долях от напряжения U_{d0} , соответствующего углу управления $\alpha = 0$.

$$U_{d\alpha}^* = \frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}} = \cos \alpha$$

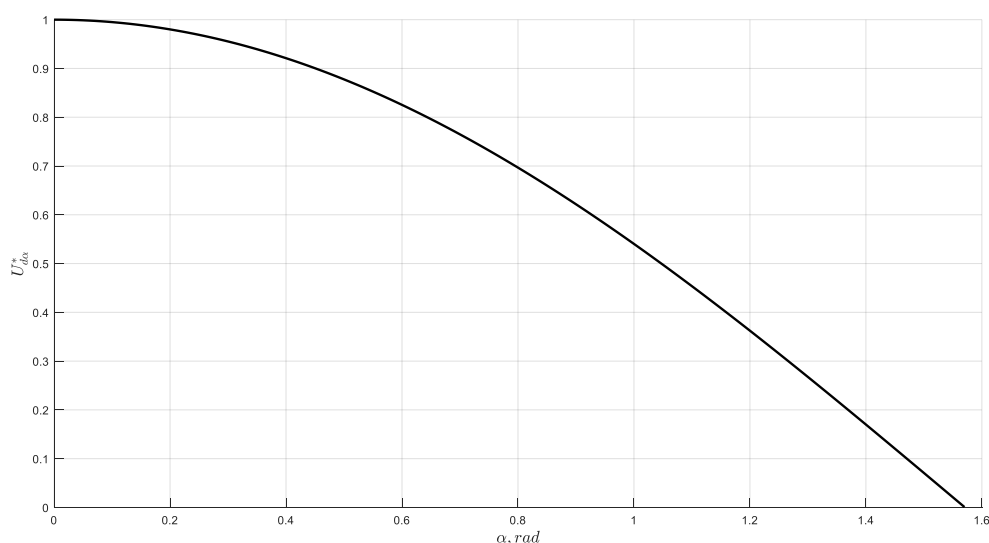


Рисунок 7 — графическое представление регулировочной характеристики

4. Выбор питающего трансформатора

Для согласования переменного напряжения сети и напряжения питания УВ выбирается силовой трансформатор. Мощность трансформатора определяется типовой мощностью, которая зависит от типа преобразователя. Расчет ведется с учетом, что напряжение на первичной стороне определено источником питания (судовым синхронным генератором) и составляет 230 В. Алгоритм расчета следующий:

Зная k , определим действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора:

$$U_{2f} = \frac{U_{1f}}{k} = 9.2(B)$$

По формуле (1) определим:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}U_{2f}}{\pi} = 21.52(B)$$

$$I_{d0} = \frac{U_{d0}}{R_{dnom}} = 538(A)$$

По временным диаграммам (п.0

$$\begin{aligned} I_{2f} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{2A}^2(\omega t) d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} i_{2A1}^2(\omega t) d\omega t + \int_{\pi}^{2\pi} i_{2A2}^2(\omega t) d\omega t \right]} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\frac{2\pi}{3}} I_{d0}^2 d\omega t + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{4\pi}{3}} (-I_{d0})^2 d\omega t \right]} = I_{d0} \sqrt{\frac{4\pi}{2\pi \cdot 3}} = I_{d0} \sqrt{\frac{2}{3}} = 439(A) \end{aligned}$$

$$S_{TR} = m_1 U_{2f} I_{2f} = 39.2439 = 12.124(kVA)$$

Где m_1 число фаз вторичной обмотки.

S_{TR} — оценочная мощность трансформатора.

По расчетной мощности STP , напряжению $U_{1ф}$. $U_{2ф}$ выбрать стандартный трансформатор. При выборе следует учитывать:

$$\begin{cases} U_{2f} \leq U_{2f\text{паспорт}} \\ S_{TR} \leq S_{TR\text{паспорт}} \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} U_{2L} \leq U_{2L\text{паспорт}} \\ S_{TR} \leq S_{TR\text{паспорт}} \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} 16 \leq U_{2L\text{паспорт}} \\ 12 \leq S_{TR\text{паспорт}} \end{cases}$$

Выберем трансформатор $ТСЗ-16/0.66$ и запишем его характеристики в таблицу Таблица 3.

Таблица 3

Тип прибора	S_n , кВА	U_{1L} , В	U_{2L} , В	$\Delta P_{x.x.}$, Вт	$\Delta P_{к.з.}$, Вт	$U_{ктр}$, %
ТСЗ-25/0,66-УХЛ-4	16	380	29	125	400	4,5

По паспортным данным определить параметры трансформатора:

$k = 25$ — коэффициент трансформации.

Полное сопротивление фазы трансформатора

$$Z_{2f} = \frac{U_{k.tr.} \cdot U_{2f}}{100 \cdot I_{2n}},$$

где $U_{k.tr.}$ — напряжение короткого замыкания трансформатора:

$$I_{2n} = I_{2f}$$

$$Z_{2f} = 9.410^{-4} = 0.94 \text{ (мОм)}.$$

Активное сопротивление фазы трансформатора $R_{2\phi}$, приведенное к вторичной обмотке, $R_{2\phi} = \Delta P_{к.з.} / m_1 I_{2\phi}^2 = 0.69 \text{ (мОм)}$.

Индуктивное сопротивление фазы трансформатора $x_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} = 0.64 \text{ (мОм)}$.

Индуктивность фазы трансформатора, приведенная к вторичной обмотке, $L_{2\phi} = x_{2\phi} / 2\pi f = 2 \text{ мкГн}$.

5. Расчет углов управления преобразователя

По формуле (1) паспортному значению напряжения $U_{2\phi}$, определим требуемые значения углов управления: α_{\min} ; $\alpha_{\text{ном}}$; α_{\max} :

$$\alpha = \arccos \frac{\pi U_{d\alpha}}{3\sqrt{6} U_{2f}}$$

$$\alpha_{\min} = \arccos \frac{\pi U_{d\min}}{3\sqrt{6} U_{2f}} = 63.5^\circ = 1.108 \text{ (рад)}$$

$$\alpha_{\text{ном}} = \arccos \frac{\pi U_{d\text{ном}}}{3\sqrt{6} U_{2f}} = 56.1^\circ = 0.979 \text{ (рад)}$$

$$\alpha_{\max} = \arccos \frac{\pi U_{d\max}}{3\sqrt{6} U_{2f}} = 52.1^\circ = 0.910 \text{ (рад)}$$

6. Внешняя характеристика преобразователя

Рассчитать внешние характеристики проектируемого УВ для углов управления α_{\min} , $\alpha_{\text{ном}}$, α_{\max} , учитывая, что в общем виде с учетом коммутационных процессов и потерь напряжения на активных сопротивлениях элементов преобразователя напряжение на нагрузке определяется выражением:

$$U_{d\alpha\gamma} = U_{d0} \cos \alpha - I_d [R_x + r_T 2 + R_{2f} 2] - 2U_{T(ТО)} \text{ — формула из [2] стр.120}$$

$m=6$ — пульсность схемы.

$$R_x = \frac{m x_{2f}}{2\pi}$$

r_T — динамическое сопротивление тиристора.

$U_{T(ТО)}$ — пороговое напряжение тиристора в открытом состоянии.

Построим внешние характеристики в Matlab на Рисунок 8 .

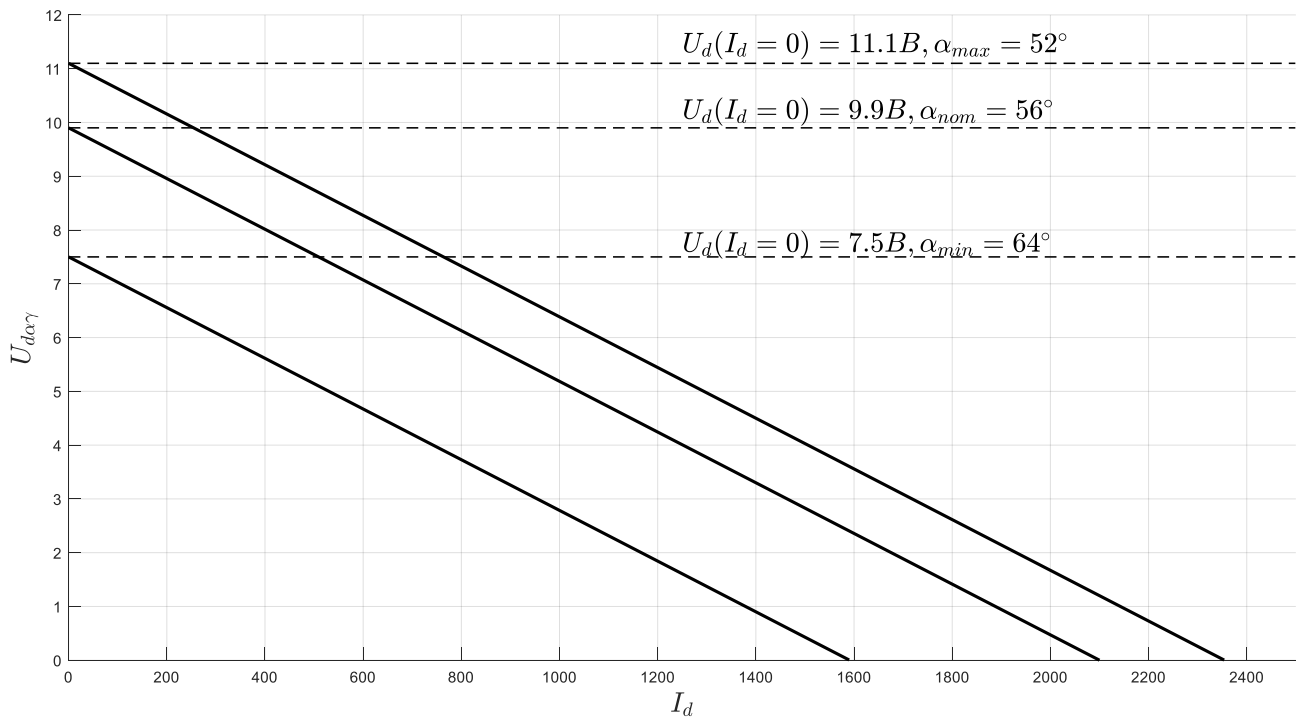


Рисунок 8 — внешние характеристики проектируемого
УВ для углов управления α_{\min} , $\alpha_{\text{ном}}$, α_{\max}

7. Расчет энергетических показателей выпрямителя

Расчёт коэффициента мощности и гармоник выпрямленного напряжения

Выпрямители являются потребителями несинусоидального тока, первая гармоника которого обычно сдвинута по отношению к синусоиде переменного напряжения сети. Поэтому коэффициент мощности выпрямителя λ зависит от фазового сдвига $\cos\varphi$ и от коэффициента искажения тока k_I и определяется по формуле $\lambda = k_I \cos\varphi$.

Из [2] стр.117 :

$$\gamma = \arccos \left[\cos\alpha - \frac{I_d x_{2f}}{\sqrt{2} U_{2f} \sin \frac{\pi}{m_1}} \right] - \alpha$$

Где $m_1=3$

$$\gamma_{\text{ном}} = \arccos \left[\cos\alpha_{\text{ном}} - \frac{I_d x_{2f} 2}{\sqrt{6} U_{2f}} \right] - \alpha_{\text{ном}} = 0.0204 \text{ (рад)} \approx 1$$

Из [2] часть 2 стр.23 :

$$\phi_{1(1)} = \alpha_{nom} + \frac{\gamma_{nom}}{2} = 0.9895 \text{ (рад)} = 56.7$$

$$\cos\phi_{1(1)} = 0.5491$$

Или из [3] стр.42:

$$\cos\phi_{1(1)} = \frac{\cos\alpha + \cos\alpha + \gamma}{2}$$

$$\lambda = k_1 \cos\phi_{1(1)}$$

$$\cos\phi_{1(1)nom} = \frac{\cos\alpha_{nom} + \cos\alpha_{nom} + \gamma_{nom}}{2} = 0.5491$$

Найдём числовые значения амплитуд гармоник выпрямленного напряжения по формулам (2) и (3) и запишем результат в Таблица 4 .

$$U_{vmax} = U_{d0} \frac{2\cos\alpha}{v^2 m^2 - 1} \sqrt{1 + v^2 m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (2)$$

$$f_v = v m f = v 300 \quad (3)$$

Таблица 4

v	f_v	0	U_{vmax} , В		
			α_{min}	$\alpha_{ном}$	α_{max}
1	300	1,23	4,6	5,07	5,19
2	600	0,30	2,29	2,46	2,52
3	900	0,13	1,52	1,63	1,67

$$k_p = \frac{2}{m^2 + 1} = 0.0541$$

Расчёт числовых значений гармоник фазного тока в первичной обмотке трансформатора

Расчёт числовых значений гармоник фазного тока в первичной обмотке трансформатора и запись в Таблица 5:

$$I_{2fnom} = I_{dnom} \sqrt{\frac{2}{3}} = 245$$

— действующее значение тока в 2-ой обмотке трансформатора.

Формула из [3] стр.144 :

$$I_{1f(n)} = \frac{2I_d}{3k\pi n} \sin \frac{\pi n}{3}$$

, где $n=1, k \neq \pm 1$

$k=1, 2, 3, \dots$

Таблица 5

n	$I_{1f(n)}$, А.
1	1,56

5	0,32
7	0,22

$$I_{1f} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (I_{1f(n)})^2} = \sqrt{I_{1f(1)}^2 + I_{1f(5)}^2 + I_{1f(7)}^2} = 1.61(A)$$

$$k_I = \frac{I_{1f(1)}}{I_{1f}} = 0.97$$

$\lambda = k_I \cos \phi_{(1)} = 0.53$ — коэффициент мощности выпрямителя.

Расчёт КПД

Найдём КПД из [2]:

$$\eta = \frac{P'_d}{P'_d + \Delta P}$$

P'_d — действительная полная активная мощность, выделяемая на нагрузке.

$P_d = U_d I_d = 3600$ Вт — среднее значение активной мощности, выделяемой на нагрузке.

$\Delta P_d = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta U_d \Delta i_d d\omega t$ — мощность, выделяемая на нагрузке с учетом пульсаций выпрямленного напряжения и тока.

У нашего выпрямителя малая пульсация тока, т.е. $\Delta i_d \rightarrow 0$, поэтому можно считать $P_d \approx P'_d$

ΔP — суммарная мощность потерь, определяемая по формуле:

$\Delta P = \Delta P_B + \Delta P_{tr} + \Delta P_{vsp}$, где

$\Delta P_B = m_i \Delta U_{TVS} I_{AVS} = 210$ Вт.

$m_i = 2$ — количество вентиля в схеме выпрямления (одновременно работающих).

$\Delta U_{TVS} = U_{T(TO)} = 1.05(B)$ — прямое падение напряжения

$I_{AVS} = I_{VSD} = 100(A)$ — средний ток вентиля.

$\Delta P_{tr} = 2I_{2fnom}^2 R_{2f} = 83$ Вт — потери в трансформаторе.

$\Delta P_{vsp} = 0.4P_d = 1440$ Вт

$\Delta P = 1733$ Вт.

$$\eta = \frac{P'_d}{P'_d + \Delta P} \cdot 100 = 67.5\%$$

8. ТМУВ с ПЭДС

Построение временных диаграмм

Выберем элементы схемы, изменение токов и изменение напряжений которых дают необходимую информацию для проектирования УВ:

$$u_{2f}, u_n, u_d, I_n.$$

Построим для них временные диаграммы, характеризующие изменение переменных состояния за полтора периода изменения питающего напряжения для угла управления: $\alpha = 27^\circ$ на рис.9.

Мы используем допущения:

- 1) п/п элементы идеальны, т.е. их ВАХ идеальна.
- 2) Трансформатор идеален, т.е.

$$x_a = x_b = x_c = 0 \quad r_a \rightarrow 0 \quad k_{tr} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = 25$$

$$3) \quad x_n \gg r_n$$

$$E = 7 \text{ В}$$

По диаграммам рисунка 9 Тиристор VS1 может открыться только тогда, когда $U_{2f} > E$

$$U_{2fmax} = U_{2f} \sqrt{2} = 13 \text{ (В)}$$

Так как масштаб

$$U_{2fmax} \div 4 \text{ кл., то}$$

$$E \div \frac{4E}{U_{2fmax}} \approx 2 \text{ кл.}$$

$U_{2fmax} \cos \frac{\lambda}{2} = E \Rightarrow$ найдём λ — максимальный угол проводящего состояния тиристора.

$$\lambda = 2 \arccos \frac{E}{U_{2fmax}} = 2 \text{ рад} = 115^\circ$$

$$\frac{\lambda}{2} \approx 57^\circ$$

$$1) \quad \alpha = \frac{\pi}{3} - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2} \right) = -\frac{\pi}{6} + \frac{\lambda}{2} = 57^\circ - 30^\circ = 27^\circ$$

$$\text{По диаграммам найдём } \omega t_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2}$$

$U_d \alpha$ — среднее значение напряжения на нагрузке (нагрузкой считается ПЭДС и сама нагрузка).

$$\begin{aligned} U_{d\alpha} &= \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} - \frac{\lambda}{2} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2} + \alpha} U_{2Lmax} \cos \omega t d\omega t = \\ &= \frac{3}{\pi} U_{2Lmax} \left[\sin \frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2} + \alpha - \sin \frac{\pi}{6} - \frac{\lambda}{2} + \alpha \right] = \frac{3\sqrt{6}U_{2f}}{\pi} \cos \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\lambda}{2} + \alpha \right) \end{aligned}$$

Мы видим, что интервал изменения $\alpha \in [0; \frac{\pi}{6} + \frac{\lambda}{2}]$ уменьшился и он зависит от λ . Также при $\alpha = 0$ косинус имеет не единичное значение, что говорит об уменьшении максимального среднего значения средневывпрямленного напряжения.

Нахождение параметров работы выпрямителя

Найдём угол α_{nom} , т.к. он изменится.

$$\alpha_{nom} = \arccos\left(\frac{\pi U_{dnom}}{3\sqrt{6}U_{2f}} - \frac{\pi}{3} + \frac{\lambda}{2}\right) = 54^\circ = 0.93 \text{ (рад)}$$

$$I_{dnom} = \frac{U_{dnom} - E}{R_{dnom}} = 125(A)$$

$$I_{2fnom} = I_{dnom} \sqrt{\frac{2}{3}} = 102(A)$$

$$U_n = U_{dnom} - E = 5(B)$$

Энергетические характеристики

Энергетические характеристики:

$$\eta = \frac{P'_d}{P'_d + \Delta P} = \frac{P_d}{P_d + \Delta P}$$

$P_d = U_d I_d = 625$ Вт — среднее значение активной мощности, выделяемой на нагрузке.

У нашего выпрямителя малая пульсация тока, т.е. $\Delta i_d \rightarrow 0$, поэтому можно считать $P_d \approx P'_d$

ΔP — суммарная мощность потерь, определяемая по формуле:

$$\Delta P = \Delta P_B + \Delta P_{tr} + \Delta P_{vsp}, \text{ где}$$

$$\Delta P_B = m_i \Delta U_{TVS} I_{AVS} = 87.5 \text{ Вт.}$$

$m_i = 2$ — количество вентиля в схеме выпрямления (одновременно работающих).

$$\Delta U_{TVS} = U_{T(TO)} = 1.05(B) \text{ — прямое падение напряжения}$$

$$I_{AVS} = I_{VSdnom} = 41.67(A) \text{ — средний ток вентиля.}$$

$$\Delta P_{tr} = 2I_{2fnom}^2 R_{2f} = 14.4 \text{ Вт — потери в трансформаторе.}$$

$$\Delta P_{vsp} = 0.4P_d = 250 \text{ Вт}$$

$$\Delta P = 352 \text{ Вт.}$$

$$\eta = \frac{P'_d}{P'_d + \Delta P} \cdot 100 = 64\%$$

9. Исследование заданного преобразователя с помощью виртуальной модели Simulink

Виртуальную модель заданного преобразователя (Рисунок 10).

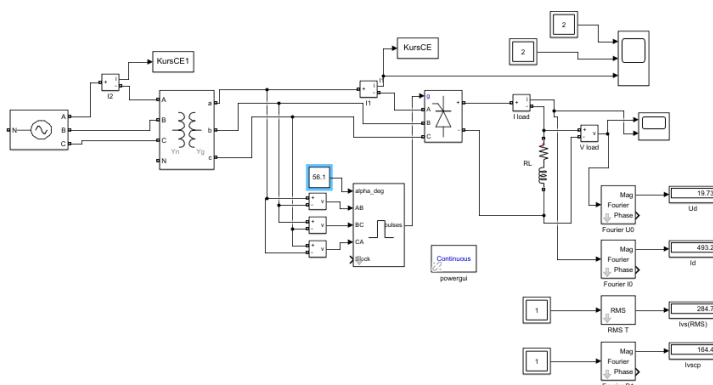


Рисунок 10 — Виртуальная модель СП

Промоделируем схему для $\alpha_{\min}=63,5^\circ$; $\alpha_{\text{ном}}=56,1^\circ$; $\alpha_{\max}=52,1^\circ$

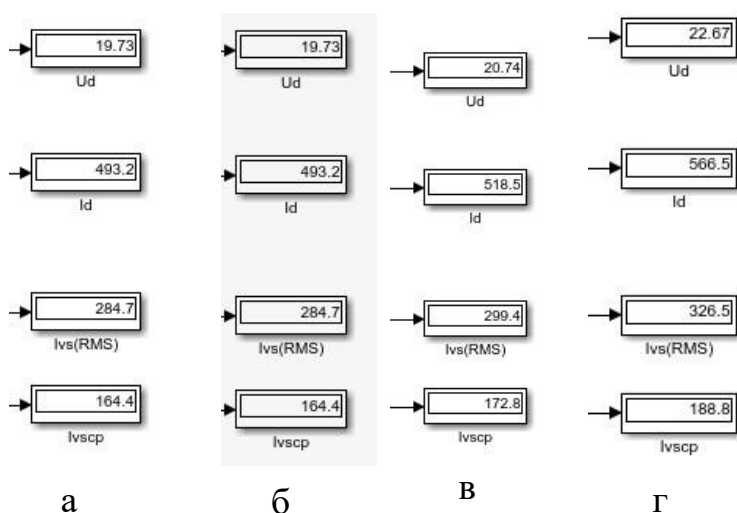


Рисунок 11 — Результаты измерений для разных углов регулирования

а- $\alpha_{\text{ном}} = 56.1^\circ$; б- $\alpha_{\min} = 63.5^\circ$; в- $\alpha_{\max} = 52.1^\circ$; г- $\alpha_0 = 0^\circ$

В результате моделирования для разных углов регулирования мы получили значения напряжения и тока на нагрузке, не совпадающие с теоретическими. В номинальном режиме $U_d = 0.196$, что значительно меньше расчетного значения.

Далее приведены временные диаграммы для разных углов регулирования (Рисунок 12 — сверху мгновенное напряжение на нагрузке, снизу мгновенный ток на нагрузке для α_{\max} — Рисунок 17).

Смоделированные временные диаграммы отличаются от теоретически выведенных временных диаграмм.

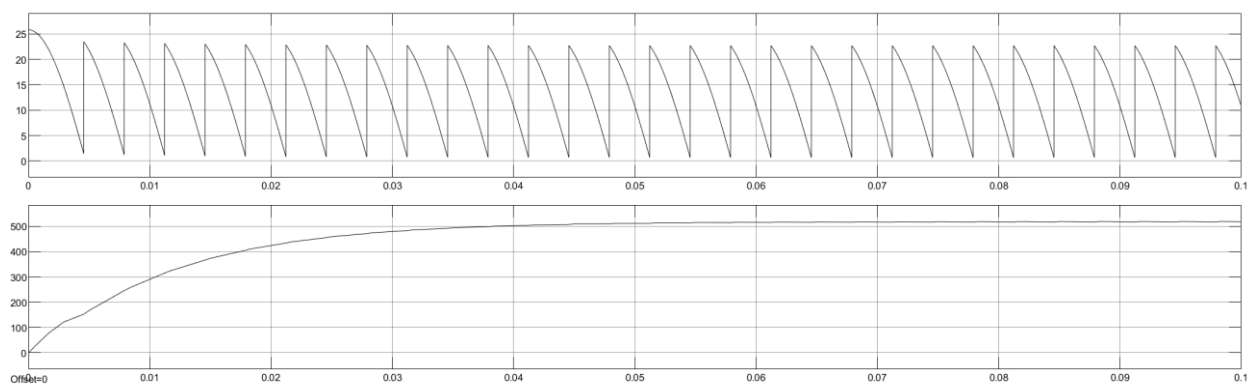


Рисунок 12 — сверху мгновенное напряжение на нагрузке, снизу мгновенный ток на нагрузке для α_{max}

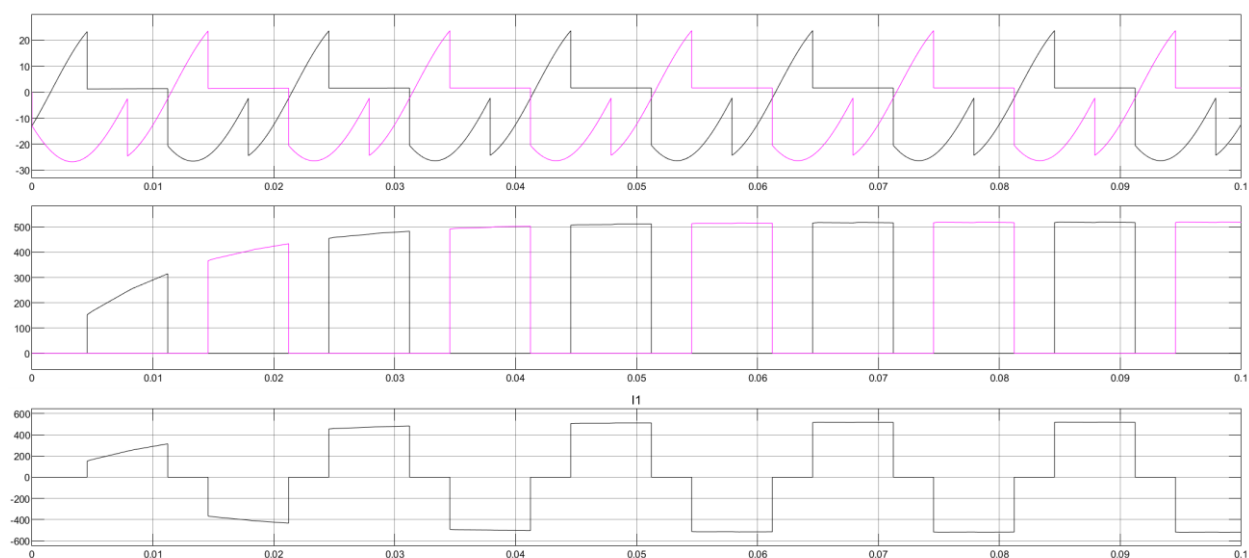


Рисунок 13 — сверху вниз напряжение на тиристорах, ток на тиристорах, ток в фазе вторичной обмотки трансформатора для α_{max} .

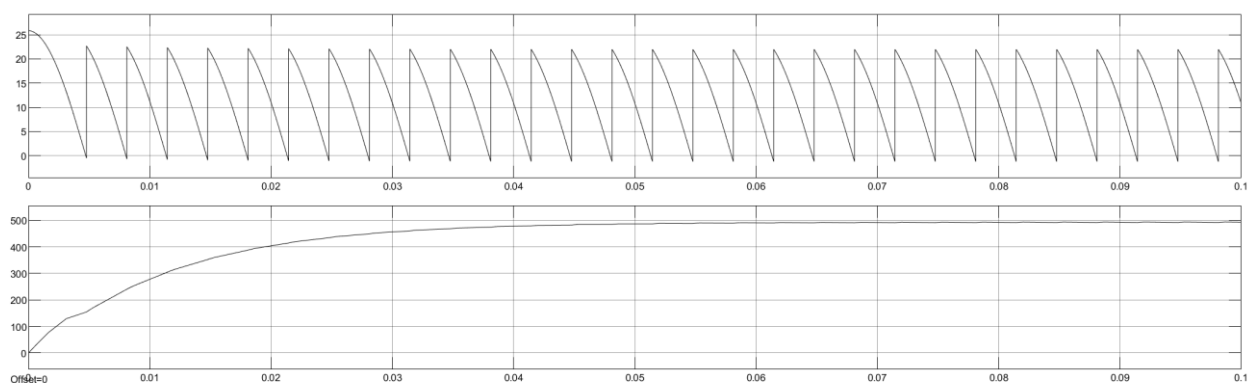


Рисунок 14 — сверху мгновенное напряжение на нагрузке, снизу мгновенный ток на нагрузке для α_{nom}

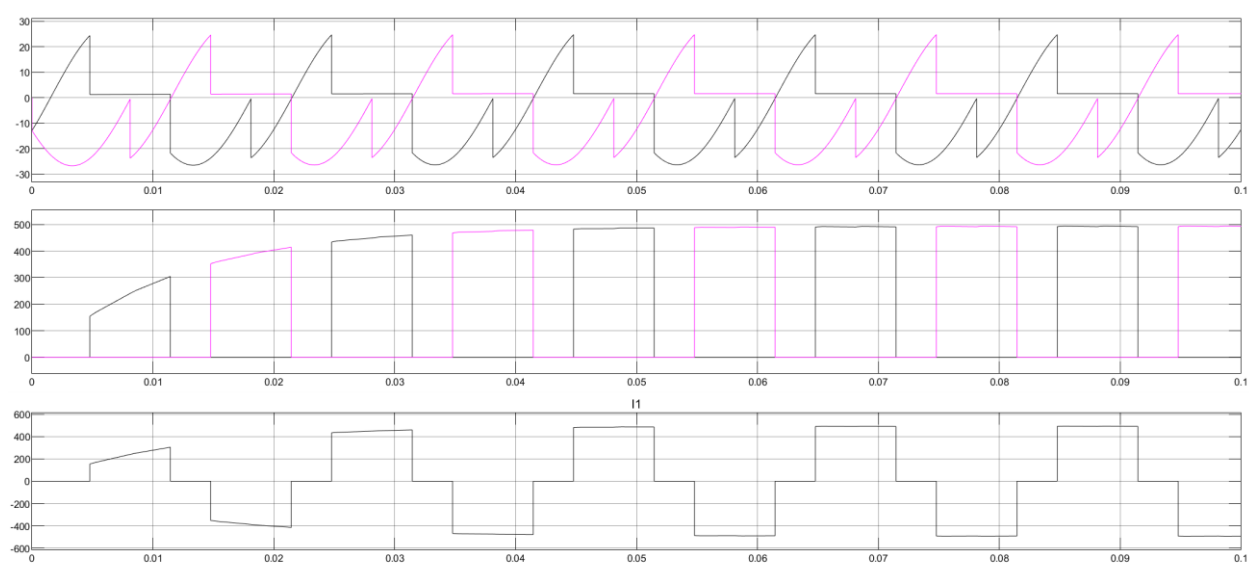


Рисунок 15 — сверху вниз напряжение на тиристорах, ток на тиристорах, ток в фазе вторичной обмотки трансформатора для α_{nom} .

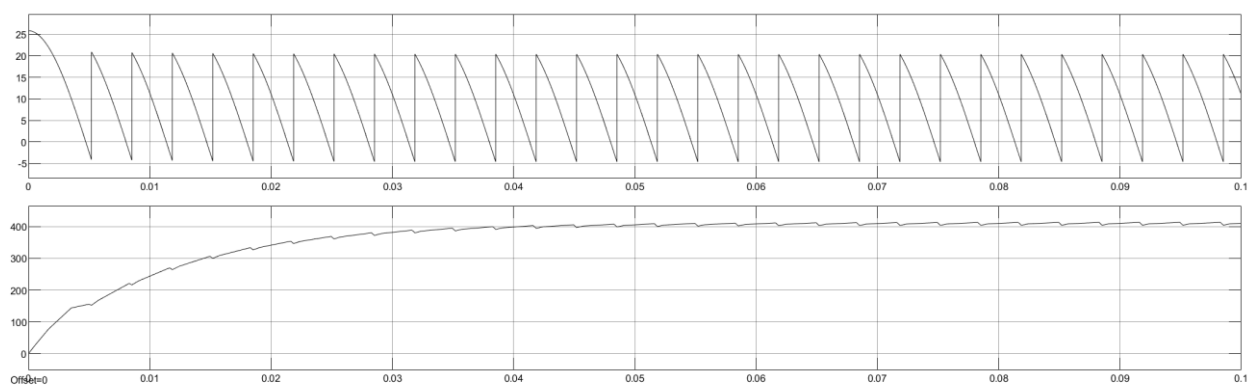


Рисунок 16 — сверху мгновенное напряжение на нагрузке, снизу мгновенный ток на нагрузке для α_{min}

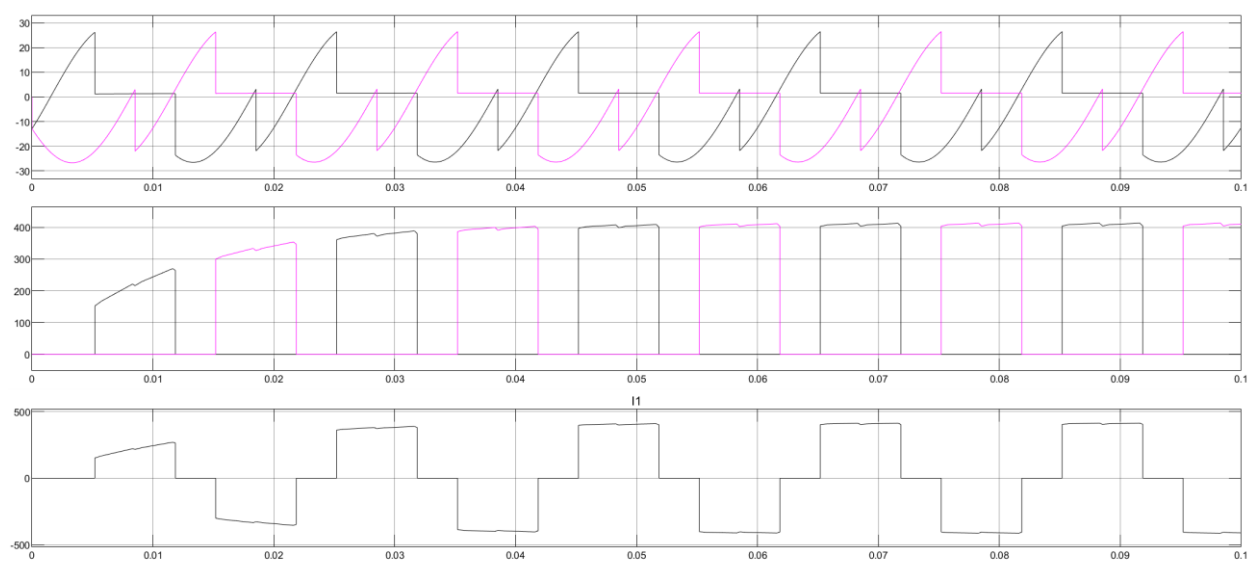


Рисунок 17 — сверху вниз напряжение на тиристорах, ток на тиристорах, ток в фазе вторичной обмотки трансформатора для α_{min} .

10.Спектральная характеристика

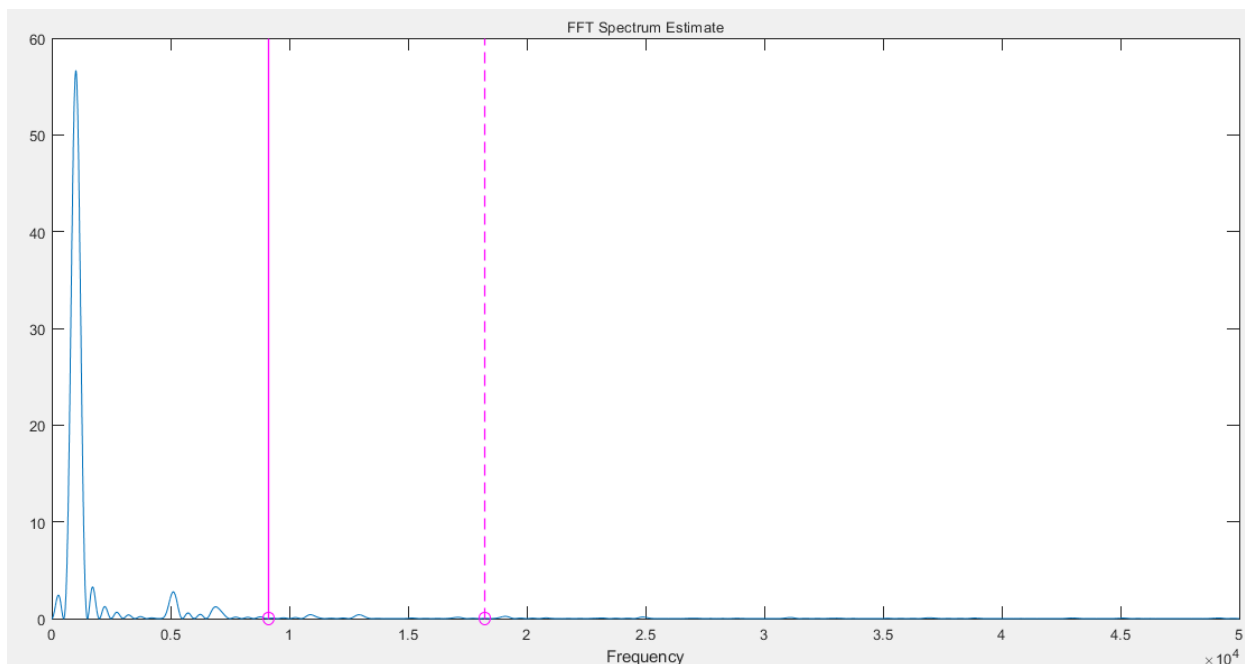


Рисунок 18 — Спектральная характеристика для α_{nom}

Таблица 6

Номер гар- моники	Частота высших гармонических	Относительное содержание высших гар- моник тока:	
		$I_{2(v)max}, A$	$I_{2(v)}, A$
6	300	2,37	1,68
18	900	47,8	33,80
19	950	53,74	38
20	1000	56,5	40
21	1050	55,61	39,32
22	1100	51,16	36,18
23	1150	43,8	30,97
24	1200	34,61	24,47
25	1250	24,88	17,59

Заключение

Мы спроектировали регулируемый преобразователь (СП) переменного тока в постоянный, оценили его влияние на сеть автономного объекта, разработать виртуальную установку для исследований и провели исследование предлагаемой модели заданного СП в среде Matlab

В ходе сравнения теоретических данных с данными полученными в результате моделирования в виртуальной модели были выявлены различия в количественных значениях, но качественно графики совпадают. Различия появляются из-за того, что в виртуальной модели мы учитываем параметры реального симистора и трансформатора. Потери на тиристоре также имеют место.

Преимущества трехфазного выпрямителя перед однофазным в том, что величина пульсации выхода намного меньше, а частота в 3 раза больше, чем у однофазного выпрямителя. Это значительно облегчает сглаживание с меньшими дросселями и / или конденсаторами.

К недостаткам относится отнёс большой действующий ток тиристора в открытом состоянии, что приводит к высокой цене тиристоры, что увеличивает как стоимость, так и габариты данного выпрямителя.

Данный преобразователь можно использовать как преобразователь частоты высокого тока, частью сварочного аппарата постоянного тока, установки для железнодорожной тяги, устройства возбуждения генераторов электростанций, блоки питания и др.

Список литературы

1. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию Учеб. Пособие для вузов — 3-е изд.,испр. — М.:Выш.шк.,2002 — 255 с. Ил.
2. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч.1. – 199 с.
3. Розанов Ю.К.,Рябчицкий М.В.,Кваснюк А.А. Силовая электроника,учебник для вузов, 2-ое издание, Москва,200