

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

**Институт** **ИЭТЭ**  
**Кафедра** **АЭП**

# **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

## **(бакалаврская работа)**

**Направление** 13.03.02. Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование)

**Направленность (профиль) Электропривод и автоматика**

**Форма обучения** \_\_\_\_\_ **Очная**  
(очная/очно-заочная/заочная)

## **Тема: Исследование системы предварительного заряда ячеек высоковольтного ПЧ**

**Студент** Эл-01-16 **Бузаев Ф.А.**  
группа подпись фамилия и инициалы

**Научный руководитель**      **Старший преподаватель**      **Савкин Д.И.**

---

**Консультант** \_\_\_\_\_  
уч. степень \_\_\_\_\_ должность \_\_\_\_\_ подпись \_\_\_\_\_ фамилия и инициалы \_\_\_\_\_

**Консультант** \_\_\_\_\_

**«Работа допущена к защите»**

**Зав. кафедрой** Д.т.н. **доцент** **Анучин А.С.**  
уч. степень звание подпись фамилия и инициалы

Дата

Москва, 2020



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

Институт ИЭТЭ  
Кафедра АЭП

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**(бакалаврскую работу)**

**Направление** 13.03.02. Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование)

**Направленность (профиль)** Электропривод и автоматика

**Форма обучения** очная  
(очная/очно-заочная/заочная)

**Тема:** Исследование системы предварительного заряда ячеек  
высоковольтного ПЧ

**Студент** Эл-01-16 **Бузаев Ф.А.**  
группа подпись фамилия и инициалы

**Научный**  
**руководитель** Старший преподаватель **Савкин Д.И.**  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Консультант**  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Консультант**  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Зав. кафедрой** Д.т.н. **доцент** **Анучин А.С.**  
уч. степень звание подпись фамилия и инициалы

**Место выполнения работы** \_\_\_\_\_

## **СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ЗАДАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

<i>Глава 1. Диод, диодный мост и его применение</i>
<i>Глава 2. Полевой транзистор, инвертор и его применение</i>
<i>Глава 3. Широтно-импульсная модуляция</i>
<i>Глава 4. Исследование заряда конденсатора с помощью встроенной библиотеки</i>
<i>Глава 5. Создание основы для проведения опытов заряда конденсатора</i>
<i>Глава 6. Испытания модели с использованием блока PWM Generator</i>
<i>Глава 7. Создание алгоритма управления инвертора</i>
<i>Глава 8. Проведение опытов по заряду одной низковольтной ячейки</i>
<i>Глава 9. Исследование заряда множества конденсаторов</i>

## **ПЕРЕЧЕНЬ ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА**

<b>Количество листов</b>	<b>45</b>
<b>Количество слайдов в презентации</b>	

## **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

Попков О.З. <i>Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов / О.З. Попков.</i> 3-е изд., стереот. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. — 200 с.: ил.
Анучин А.С. «Системы управления электроприводов», 2015 г., Издательство МЭИ.
Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы: учеб. пособие / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. — Санкт-Петербург: Лань, 2009. — 480

### **Примечания:**

1. Задание брошюруется вместе с выпускной работой после титульного листа (страницы задания имеют номера 2, 3).
2. Отзыв руководителя, рецензия(и), отчет о проверке на объем заимствований и согласие студента на размещение работы в открытом доступе вкладываются в конверт (файловую папку) под обложкой работы.

## Аннотация

Цель выпускной квалификационной работы заключается в исследовании предварительного заряда ячеек высоковольтного преобразователя частоты.

Была разработана модель, для проведения эксперимента, а также алгоритм по управлению инвертора.

## Оглавление

Введение .....	6
Глава 1. Диод, диодный мост и его применение .....	8
Глава 1.1. Структура и устройство диода .....	8
Глава 1.2. Структура диодного выпрямителя «звезда-Ларионова».....	11
Глава 1.3. Выпрямитель «звезда-Ларионова» в Matlab .....	13
Глава 2. Полевой транзистор, инвертор и его применение .....	15
Глава 2.1. Структура и устройство полевого транзистора .....	15
Глава 2.2. Инвертор, общие понятия .....	15
Глава 2.3. Модель инвертора в Matlab.....	16
Глава 3. Широтно-импульсная модуляция .....	18
Глава 3.1. Синусоидальная ШИМ.....	19
Глава 3.2. Векторная ШИМ .....	19
Глава 4. Исследование заряда конденсатора с помощью встроенной библиотеки Simscape Components.....	23
Глава 5. Создание основы для проведения опытов заряда конденсатора.....	25
Глава 6. Испытания модели с использованием блока PWM Generator .....	27
Глава 7. Создание алгоритма управления инвертора.....	34
Глава 8. Проведение опытов по заряду одной низковольтной ячейки .....	40
Список литературы.....	45

## Введение

Преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока (ЗПТ) являются наиболее распространенным типом электрических преобразователей, представленных на современном рынке. От них могут питаться асинхронные и синхронные трехфазные электродвигатели. Диапазон мощностей достаточно широк: от десятков Вт до десятков МВт. При больших мощностях, преобразователи строятся с использованием многоуровневых инверторов или по принципу последовательного соединения низковольтных ячеек.

В преобразователях частоты с промежуточным звеном постоянного тока напряжение питающей сети подается через выпрямитель и фильтр на инвертор. Инвертор, управляемый от микропроцессорной системы управления, формирует напряжение на выходе преобразователя в соответствии с принятым законом регулирования.

**Объект исследования:** высоковольтный преобразователь, состоящий из множества низковольтных ячеек, которые являются инвертором со звеном постоянного тока. Данный преобразователь служит для того, чтобы запитать высоковольтный синхронный двигатель.

Всегда, когда имеется преобразователь со звеном постоянного тока, возникает потребность в предварительном заряде звена. Если звено будет разряжено, то возникнет режим короткого замыкания.

Обычно система реализуется либо через сопротивление, которое шунтируется после заряда звена, либо через термистор, который при протекании тока через него будет нагреваться и тем самым уменьшать свое сопротивление. Так как у имеющегося преобразователя много низковольтных ячеек, то такой контур заряда будет нецелесообразно ставить. Этим контуром будет трудно управлять.

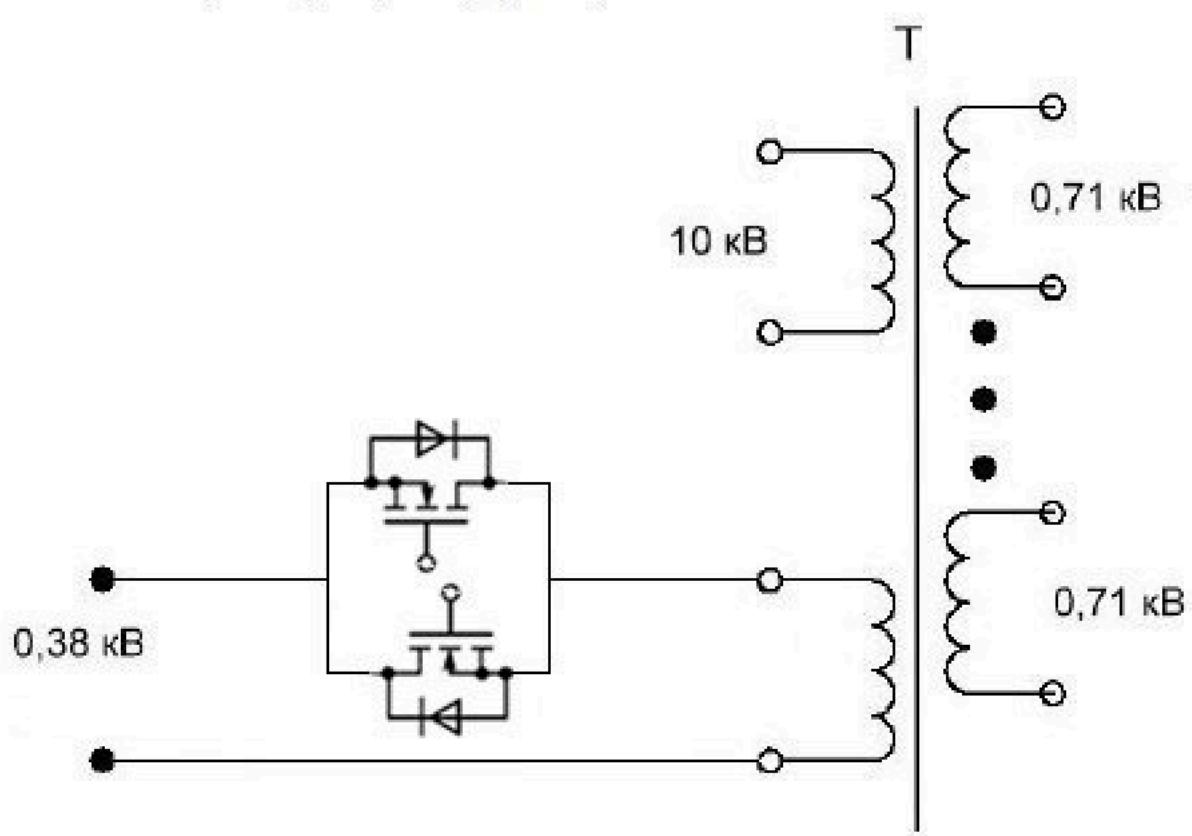


Рис. 1. Схема предзаряда ячеек.

**Цель выпускной квалификационной работы:** разработка модели плавного заряда звеньев постоянного тока низковольтных ячеек высоковольтного преобразователя.

**Задачи:**

- Разработка модели системы «Низковольтная ячейка-трансформатор-зарядный преобразователь».
- Разработка алгоритма управления зарядного преобразователя.
- Исследование смоделированной системы.

## Глава 1. Диод, диодный мост и его применение

В первой главе приведено краткое описание диода и диодного моста, а также его структура.

Диодный мост – это электротехническое устройство, которое предназначено для преобразования трехфазного переменного тока в постоянный ток.

В проекте будет использоваться разновидность выпрямителя Ларионова – «звезда-Ларионова».

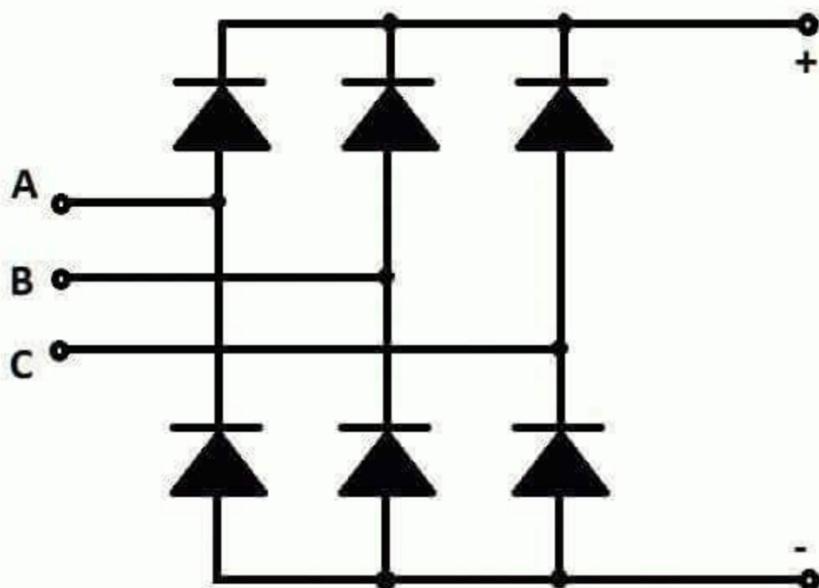


Рис.1.1. Схема электрическая функциональная «звезда-Ларионова»

### 1.1 Структура и устройство диода.

Диод – это полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя выводами, в котором используется то или иное свойство выпрямляющего электрического перехода.



Рис.1.2. Графическое изображение диода

При приложении к диоду прямого напряжения, то есть анод имеет положительный потенциал относительно катода и через диод будет протекать прямой ток, а сопротивление диода будет маленькое. При приложении к диоду обратного напряжения, сопротивления диода будет большое и ток не будет протекать через него. Следовательно диод пропускает электрический ток только от анода к катоду. Это связано со строением диода и с явлением р-п перехода. Полупроводниковый диод либо состоит из полупроводников р-типа и n-типа, либо из полупроводника и металла.

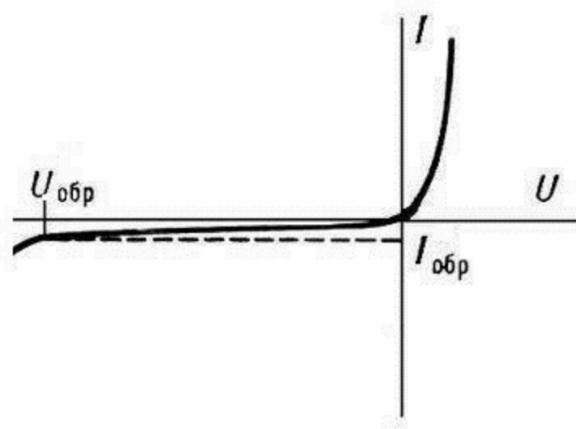


Рис 1.3. Вольт-амперная характеристика диода

На рис. 1.3. представлена вольт-амперная характеристика диода  
 $U_{обр}$  – это обратное максимальное напряжение при котором диод выдерживает при подключении в обратном направлении, при этом через него будет протекать ток  $I_{обр}$ .

$I_{обр}$  – это ток, который протекает через диод при приложении обратного напряжения.

Электро-дырочный переход (р-п переход) – это переходный слой между двумя областями полупроводника с разной проводимостью, в котором существует диффузионное электрическое поле.

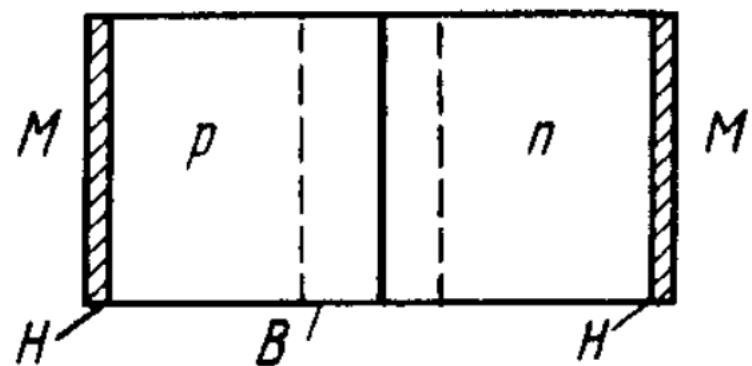


Рис 1.4. Структура диода с электрическим переходом в виде р-н перехода

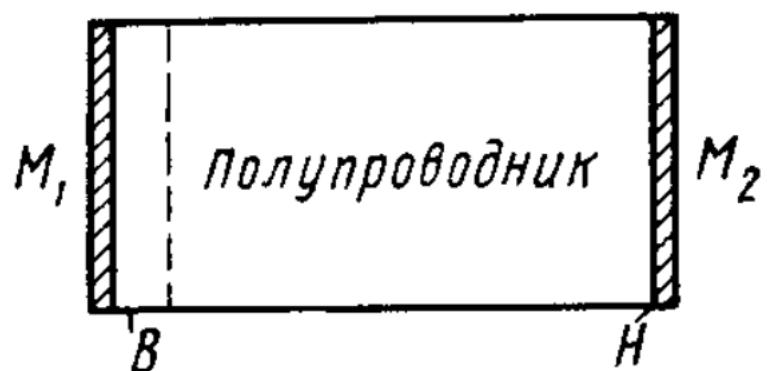


Рис 1.5. Структура диода с электрическим переходом на контакте между металлом и полупроводником

## 1.2 Структура диодного выпрямителя «звезда-Ларионов».

Выпрямитель «звезда-Ларионова» является соединением трёх диодных полумостов, параллельно объединенных звездой.

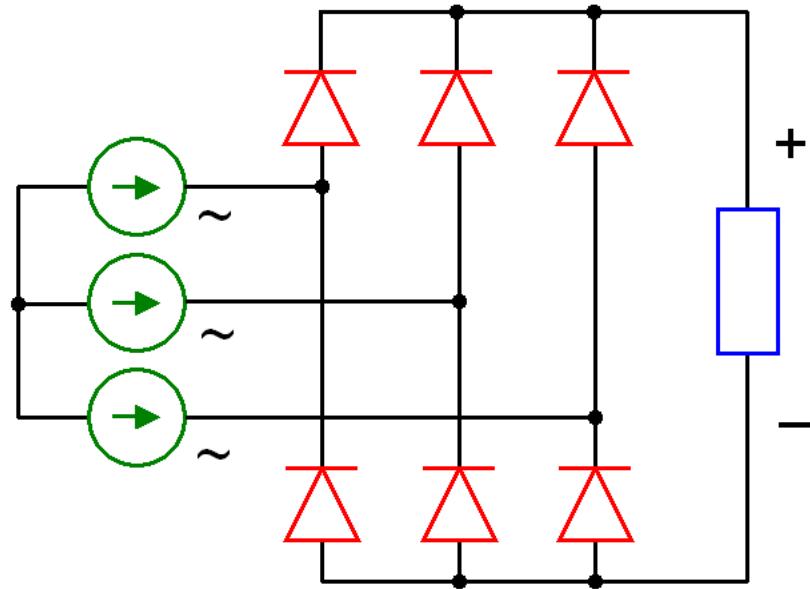


Рис 1.6. Схема электрическая функциональная «звезда-Ларионова»

Напряжение после диодного выпрямителя будет срезано, и станет пульсирующим.

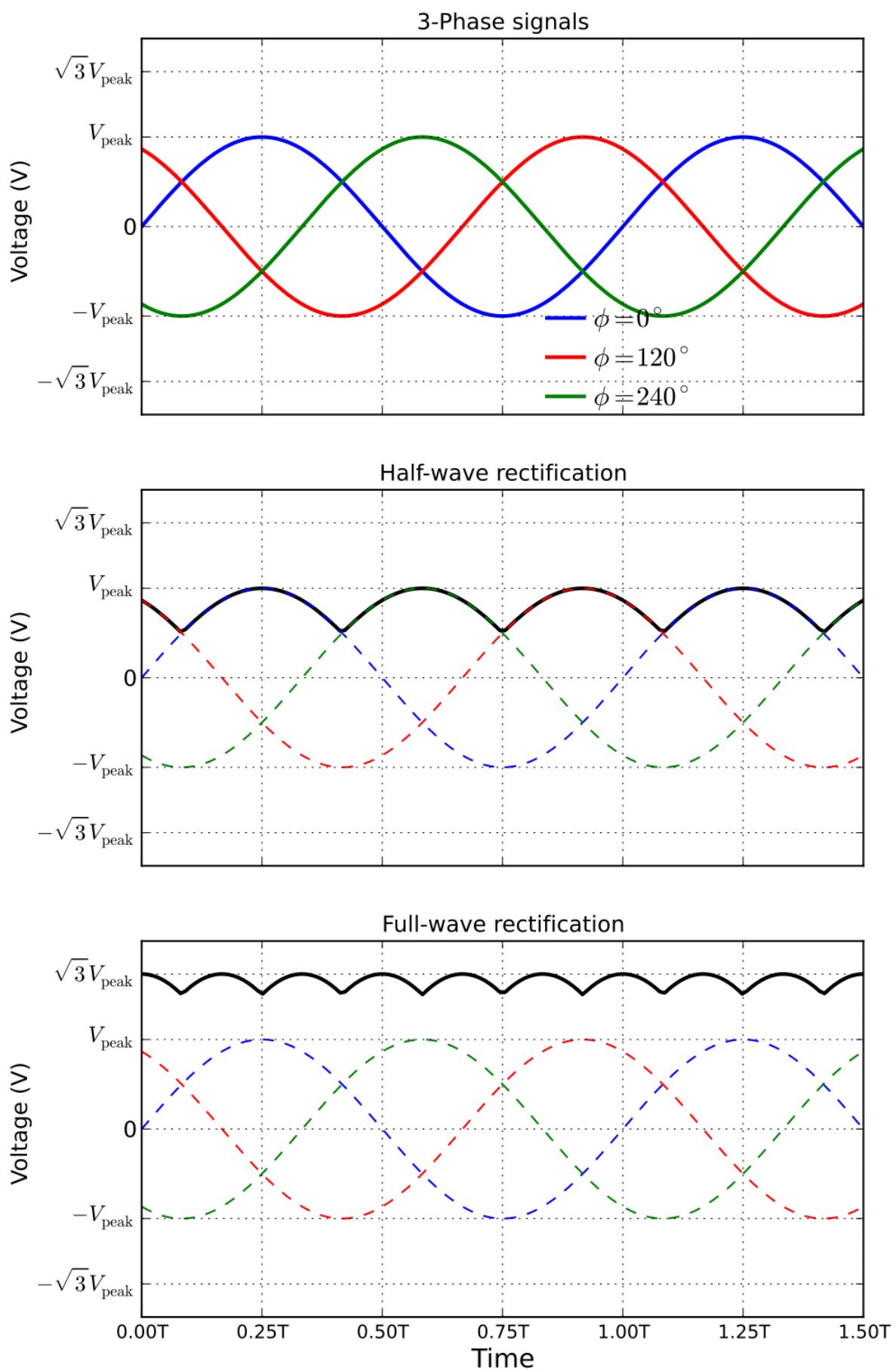


Рис 1.7. Диаграмма напряжений

### 1.3 Выпрямитель «звезда-Ларионова» в Matlab.

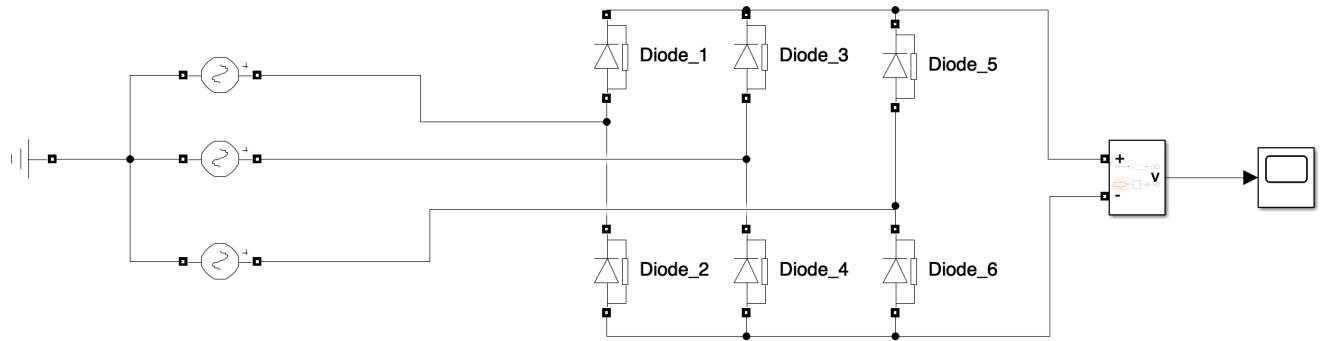


Рис 1.8. Схема выпрямителя в Matlab

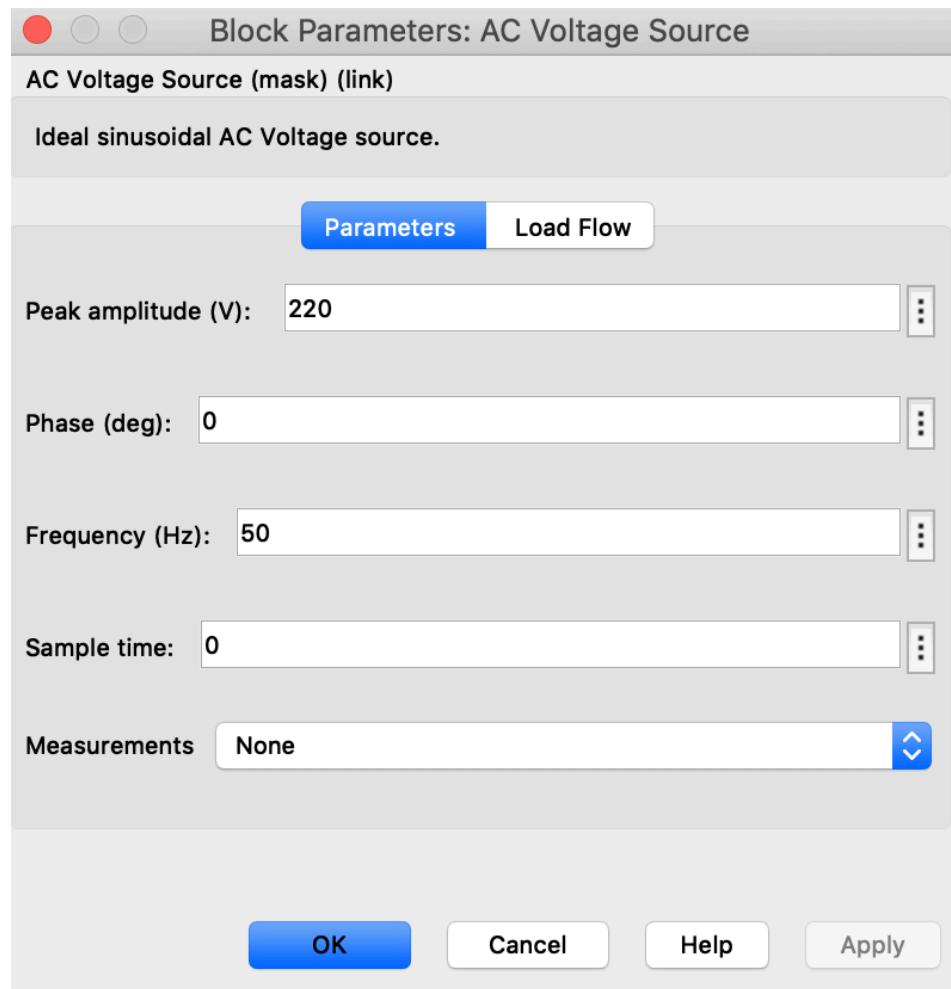


Рис 1.9. Параметры источника напряжения в Matlab

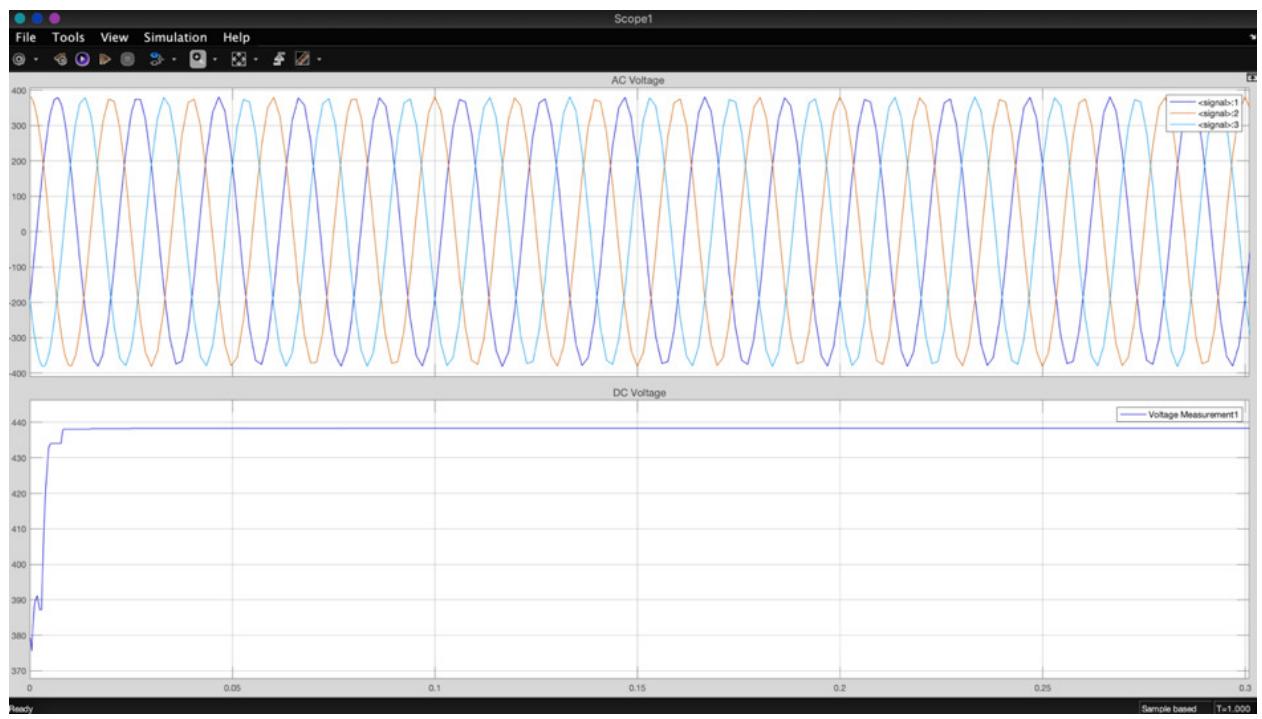


Рис 1.10. Осциллограмма напряжений  
на верхнем графике – напряжение источника напряжения  
на нижнем графике – напряжение после выпрямителя

## **Глава 2. Полевой транзистор, инвертор и его применение.**

Во второй главе описано, что такое транзистор, инвертор и его структура.

### **2.1. Структура и устройство полевого транзистора.**

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, предназначенный для управления электрическим током. Управление выходным током происходит за счет приложения управляющего сигнала на затвор.

В проекте будет задействованы МОП-транзисторы (MOSFET) с индуцированным каналом N-типа. Индуцированный канал означает, что при нулевом напряжении на сток-исток, транзистор не будет проводить ток через себя.

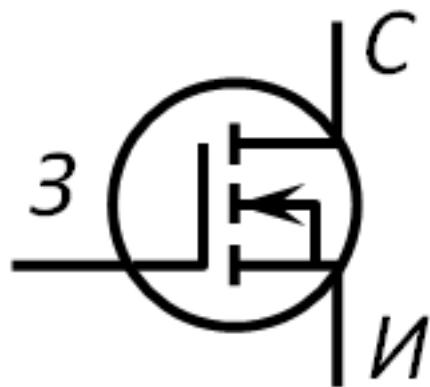


Рис 2.1. Схема МОП-транзистора N-типа

С индуцированным каналом

### **2.2 Инвертор, общие понятия.**

Инвертор – это электротехническое устройство, предназначенное для преобразования постоянного тока в переменный. Инвертор будет управляться с помощью ШИМ-сигнала, который будет подаваться на затвор транзисторов. Инвертор будет состоять из трех полумостовых силовых модулей, которые подключены параллельно.

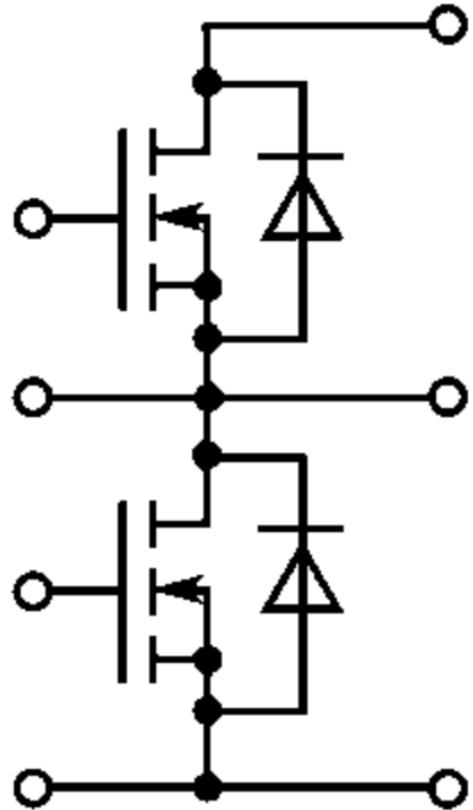


Рис. 2.2 Схема полумостового силового модуля инвертора.

### 2.3. Модель инвертора в Matlab.

Модель инвертора, которая состоит из трех полумостов, управляемая с помощью сигнала, подаваемого на затвор (gate).

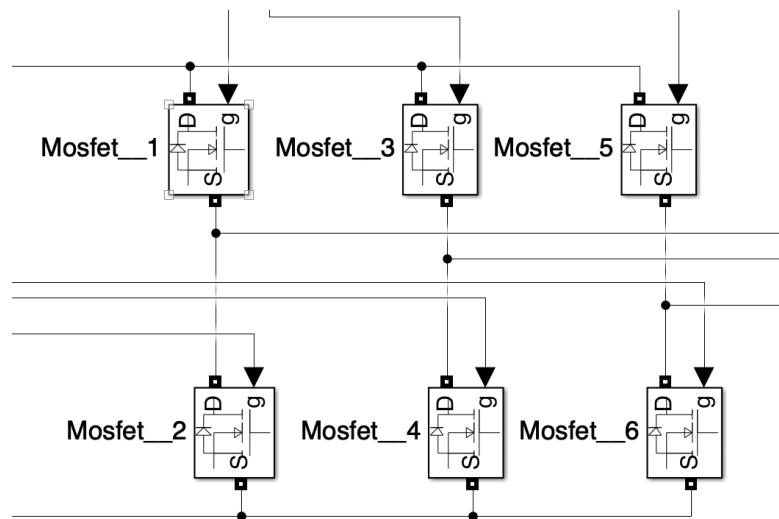


Рис 2.3. Модель инвертора

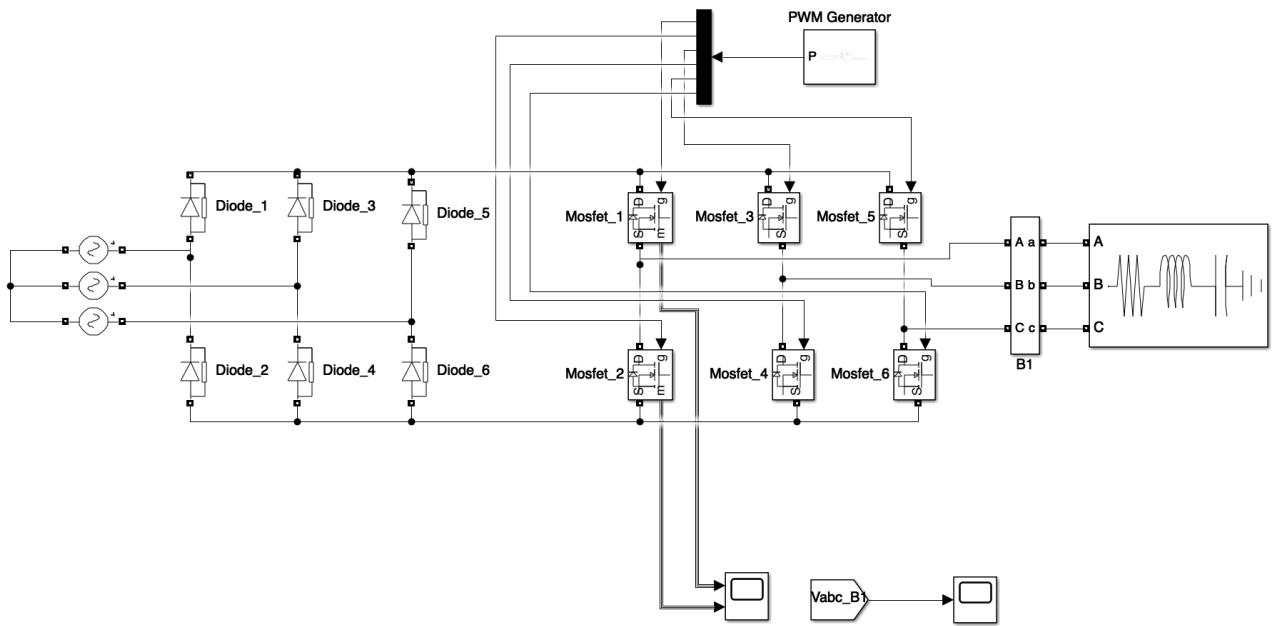


Рис 2.4. Полная модель на нагрузку в Matlab

На рис 2.4. видно, что управление транзисторами проходит с помощью ШИМ-генератора. Выводы инвертора подключены к трехфазной нагрузке.

Mosfet\_1 и Mosfet\_2 – стойка фазы А, Mosfet\_3 и Mosfet\_4 – стойка фазы В, Mosfet\_5 и Mosfet\_6 – стойка фазы С.

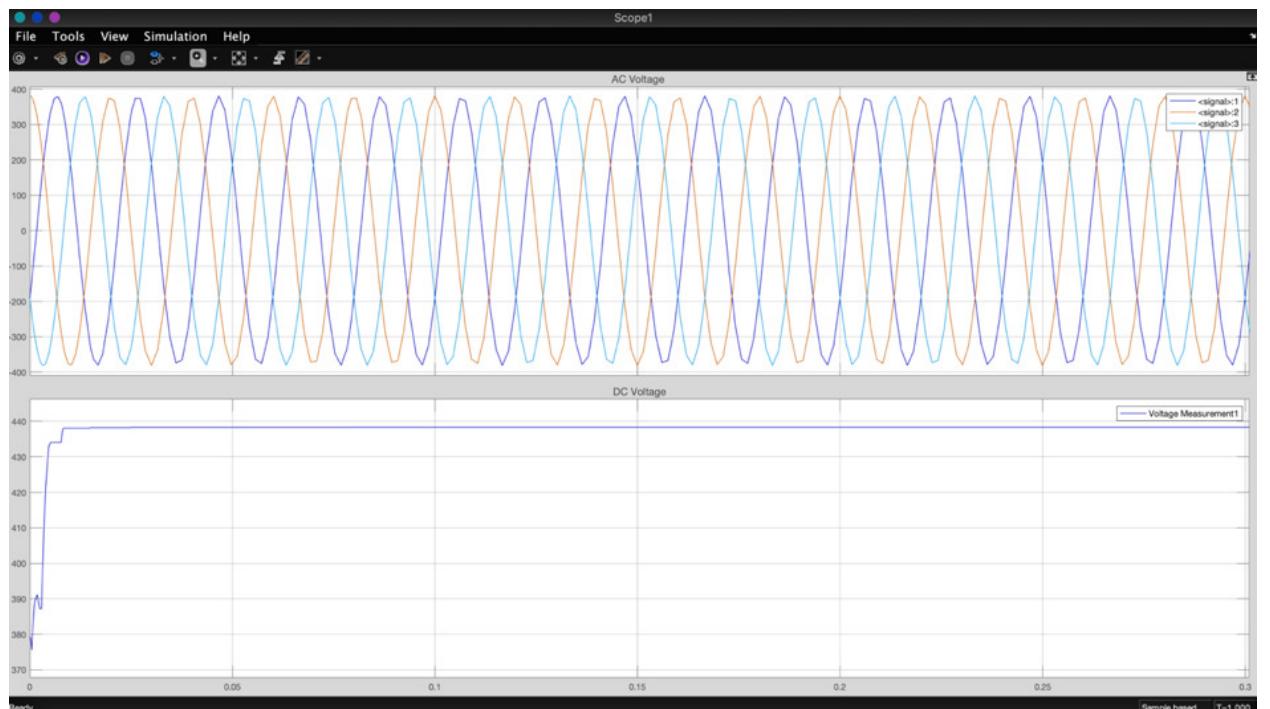


Рис 2.5. Осциллографма после инвертора

На осциллограмме видно, как инверторы преобразовали постоянный ток в переменный.

### Глава 3. Широтно-импульсная-модуляция.

Широтно-импульсная-модуляция – это процесс импульсного управления, при котором ширина или частота импульсов либо и та и другая модулируются в пределах периода основной частоты для того, чтобы создать определенную форму кривой выходного напряжения. Широтно-импульсный модулятор генерирует последовательность импульсов со скважностью, пропорциональной уровню сигнала на его входе. Параметр его настройки, т.е. минимальная длительность импульса, устанавливается с помощью зоны нечувствительности релейного элемента широтно-импульсного модулятора. Одна из важнейших величин при формировании импульса является – скважность.

Скважность – это отношение времени периода импульса на время положительного включения импульса.

$$\gamma = \frac{T}{t_1};$$

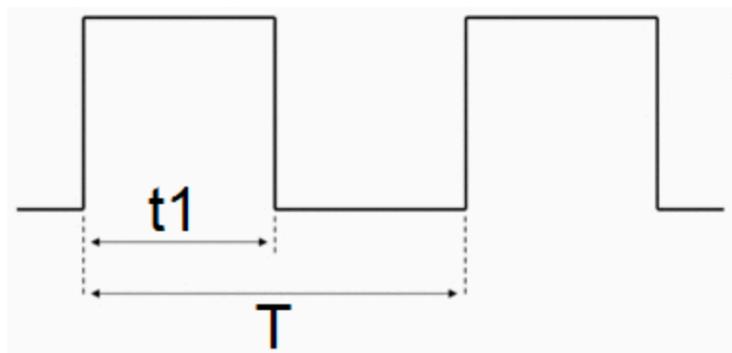


Рис 3.1. График импульса.

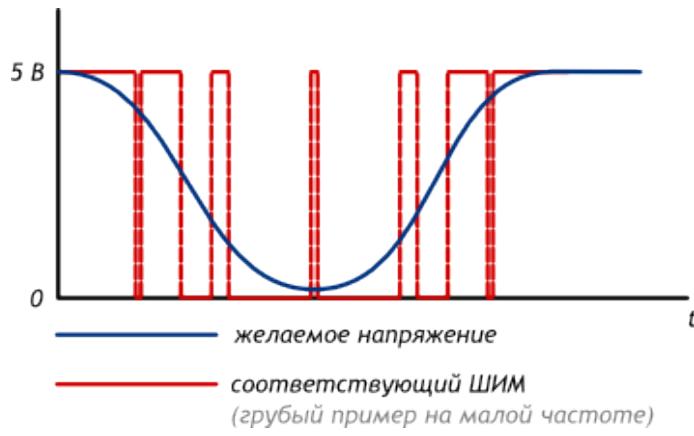


Рис. 3.2. График, иллюстрирующий применение метода ШИМ

Для управления трёхмостового инвертора в основном используются два разных метода формирования ШИМ:

- Синусоидальная ШИМ;
- Векторная ШИМ;

### 3.1. Синусоидальная ШИМ.

Скважность верхнего ключа меняется по синусоидальному закону:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_A = 0,5 + 0,5 \cdot U^* \cdot \sin(\omega_0 t); \\ \gamma_B = 0,5 + 0,5 \cdot U^* \cdot \sin(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}); \\ \gamma_C = 0,5 + 0,5 \cdot U^* \cdot \sin(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}); \end{array} \right.$$

Где  $U^* = \frac{U_{\text{фаз}}}{U_{\text{фаз.макс}}}$  - относительное значение амплитуды напряжения.

Средние значения потенциалов фаз относительно отрицательной шины звена постоянного тока:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_A = 0,5 \cdot U_{DC} + 0,5 \cdot U^* \sin(\omega_0 t); \\ \varphi_B = 0,5 \cdot U_{DC} + 0,5 \cdot U^* \sin(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}); \\ \varphi_C = 0,5 \cdot U_{DC} + 0,5 \cdot U^* \sin(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}); \end{array} \right.$$

Где  $U_{DC}$  – это напряжение звена постоянного тока, а  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$  – средние за период ШИМ потенциалы фаз относительно отрицательной шины звена постоянного тока.

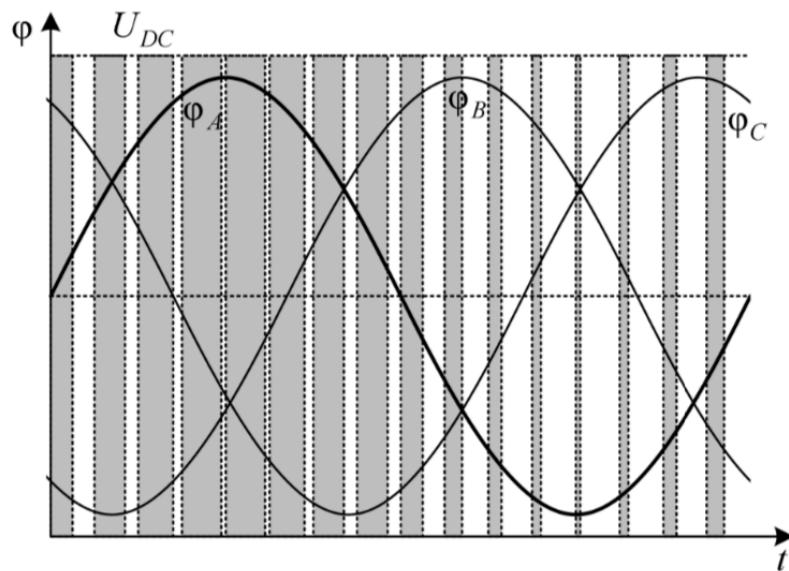


Рис 3.3. График изменения среднего потенциала фазы при изменении скважности

Разница средних значений потенциалов двух фаз будет равна линейному напряжению и изменяться по синусоидальному закону уже без постоянной составляющей:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{DC} + 0,5 \cdot U^* \cdot \sin(\omega_0 t - \frac{\pi}{6}); \\ U_{BC} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{DC} + 0,5 \cdot U^* \cdot \sin(\omega_0 t + \pi); \\ U_{CA} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{DC} + 0,5 \cdot U^* \cdot \sin(\omega_0 t + \frac{\pi}{6}); \end{array} \right.$$

Эти формулы позволяют нам рассчитывать напряжение при управлении транзисторами в инверторе.

### 3.2. Векторная ШИМ.

В векторной ШИМ выделяют восемь возможных состояний инвертора и нумеруют их в двоичной системе исчисления от 000 до 111.



Рис 3.4. Состояния инвертора в режиме  
векторной ШИМ

Напряжение инвертора реализуется перебором указанных состояний.

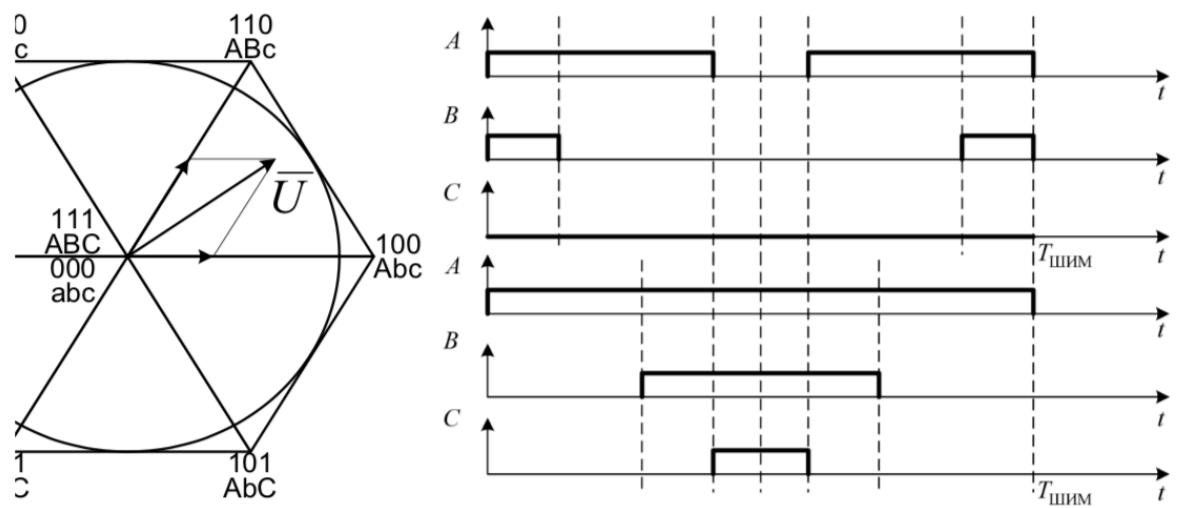


Рис 3.5. Реализация одного вектора напряжения

двумя разными способами

## Глава 4. Исследование заряда конденсатора с помощью встроенной библиотеки Simscape Components.

Исследование заряда решено было начать с составления простой системы в Matlab: «источник напряжения-трансформатор-конденсатор».

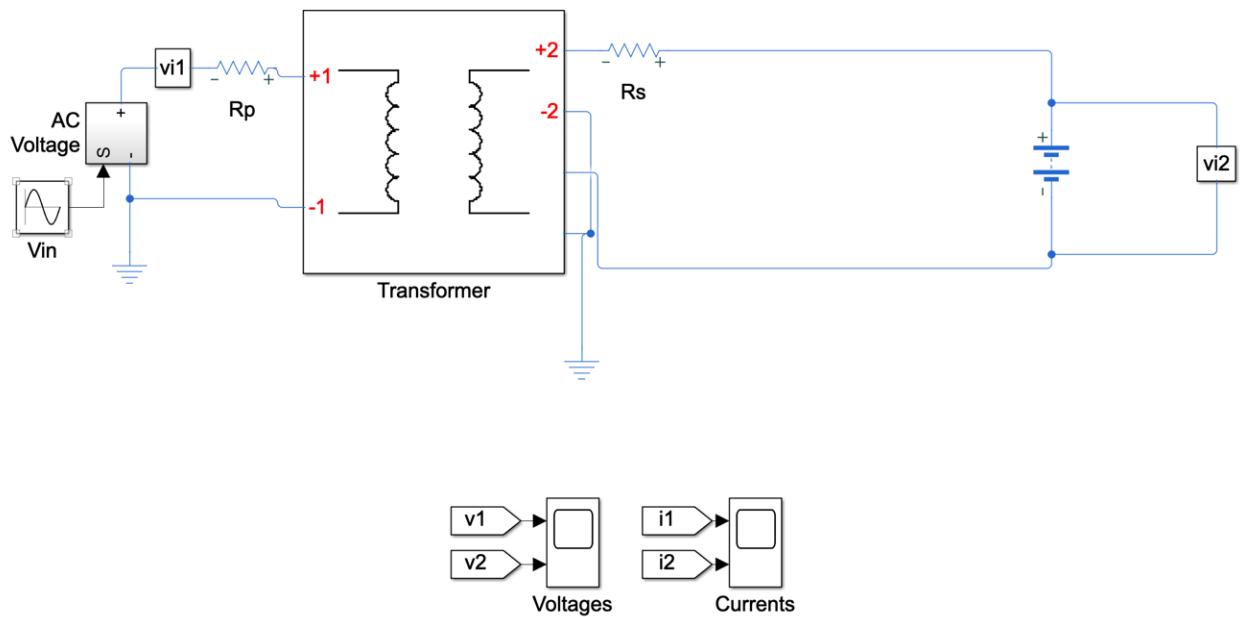


Рис. 4.1. Исследуемая модель

Модель состоит из переменного источника напряжения, сопротивления  $R_p$ , которое симулирует сопротивление проводов, подводимых к первичной обмотке трансформатора, сопротивления  $R_s$ , которое симулирует сопротивление проводов после вторичной обмотки трансформатора, а также из самого трансформатора.

Ожидается, что на выходе трансформатора будет трёхфазное синусоидальное напряжение.

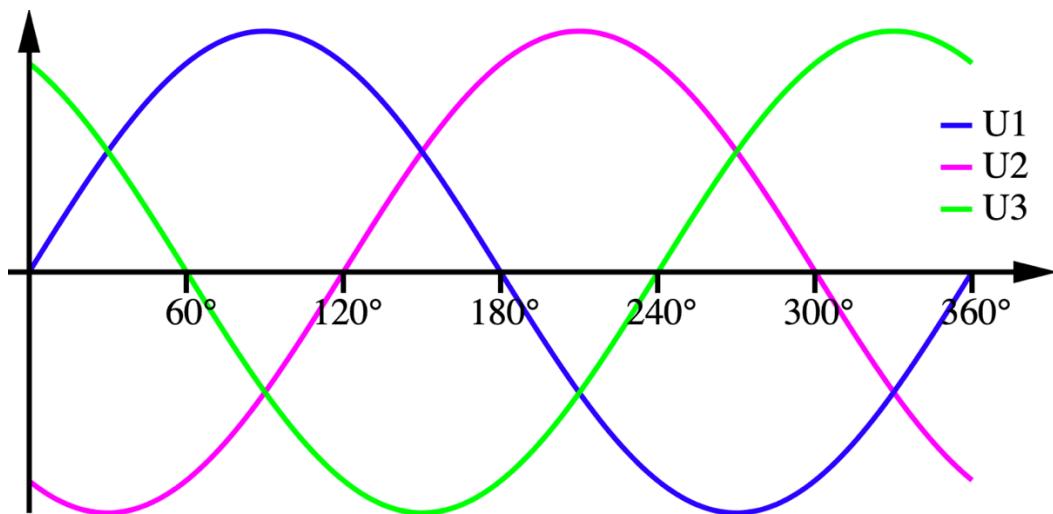


Рис. 4.2. График синусоидального напряжения

Проведя симуляцию, была получена такая осциллограмма напряжений.

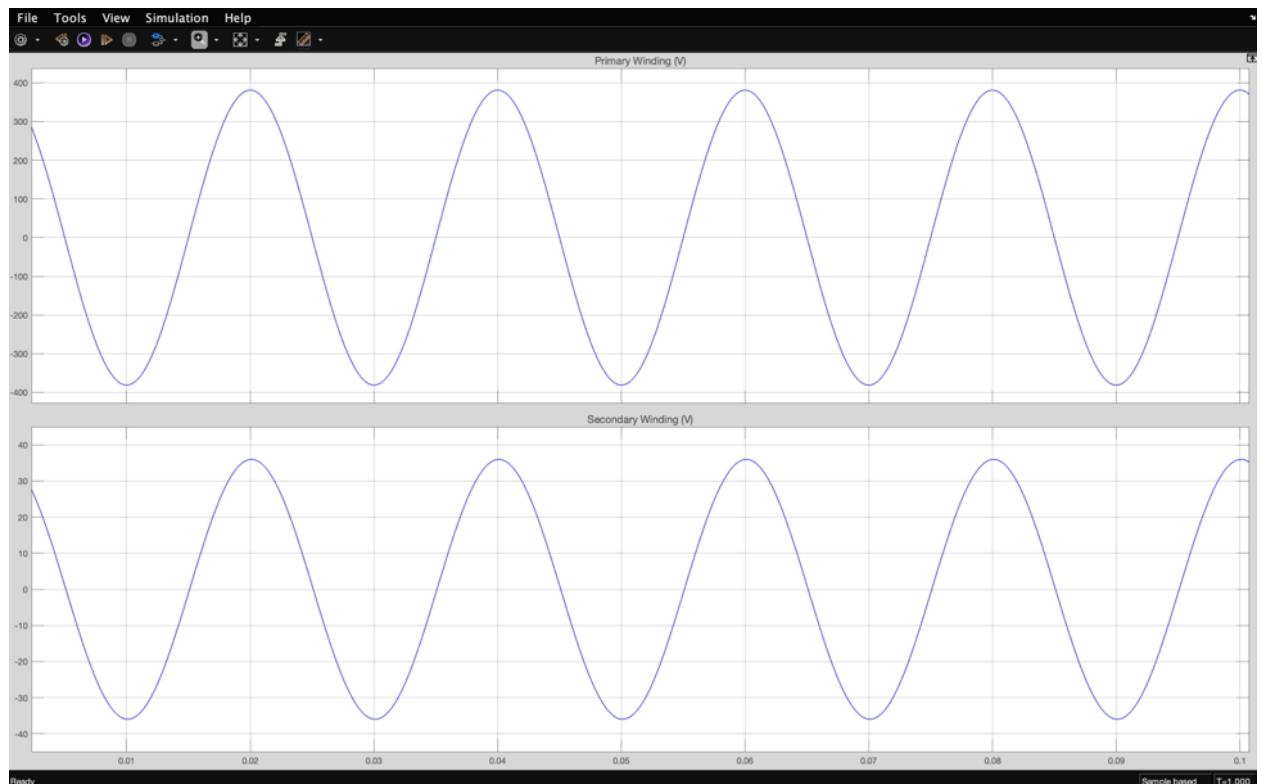


Рис. 4.3. Осциллограмма на первичной и вторичной  
обмотках трансформатора

**Заключение:** по результату симуляции можно сделать вывод, что она не удовлетворяет нашим ожиданиям, так как показано только напряжение фазы А, следовательно решено не работать далее с данной библиотекой.

## Глава 5. Создание основы для проведения опытов заряда конденсатора.

Решено было работать с библиотекой Specialized Technology, так как она является универсальной и удобной для реализации индивидуальных механизмов.

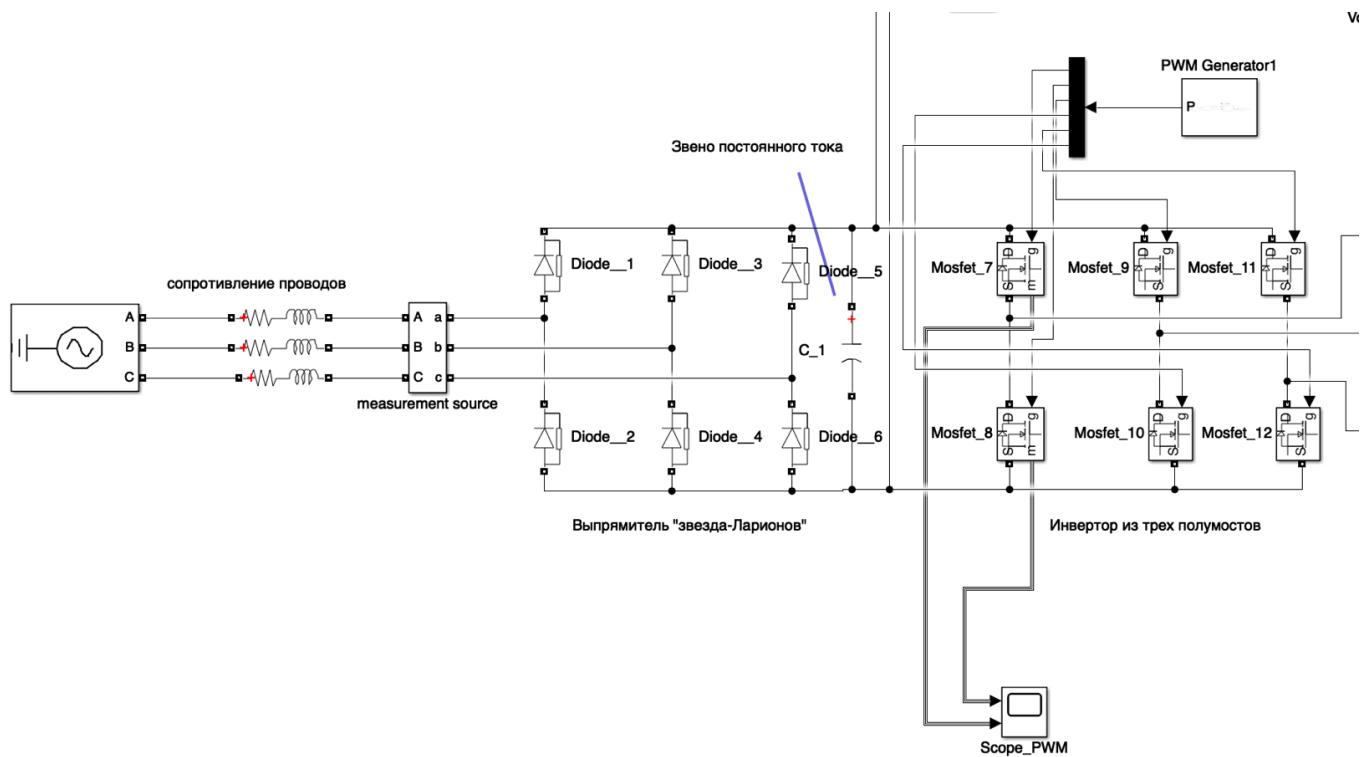


Рис. 5.1 Первая часть модели.

Первая часть модели состоит из:

- Источника трех фазного синусоидального напряжения;
- Активного и индуктивного сопротивления, которое симулирует сопротивление проводов;
- Блока измерения напряжения;
- Шести диодов, которые образуют выпрямитель «звезда-Ларионова»;
- Конденсатора, который является сглаживающим фильтром;
- Шести полевых транзисторов, которые образуют инвертор;
- Генератора ШИМ;

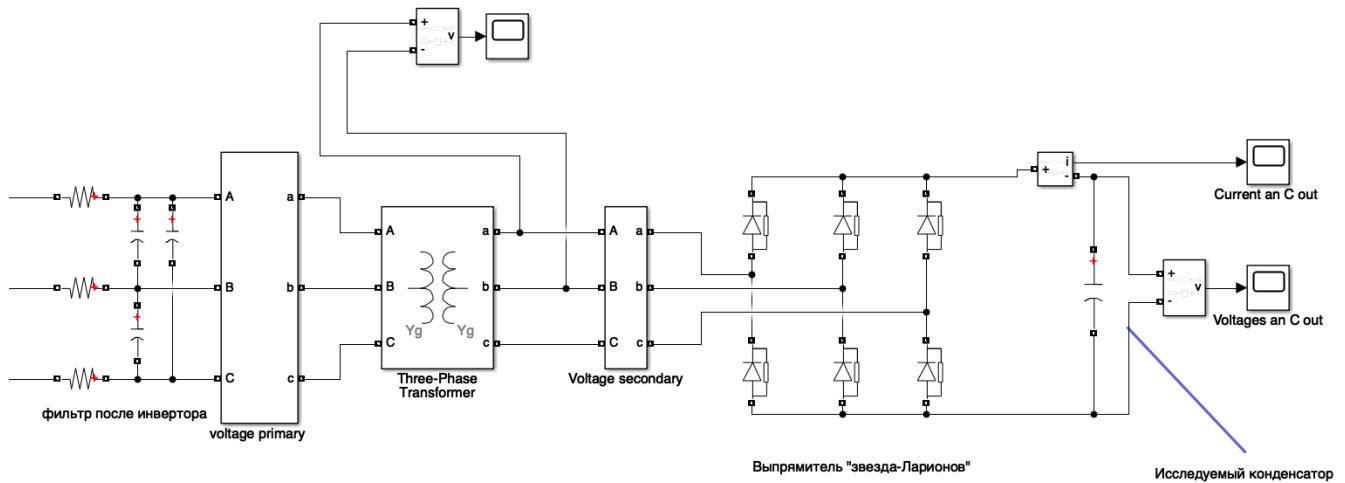


Рис 5.2. Вторая часть модели

Вторая часть модели состоит из:

- Активного сопротивления и конденсаторов, которые образуют сглаживающий фильтр;
- Двух блоков измерения напряжения;
- Трехфазного трансформатора;
- Шести диодов, которые образуют выпрямитель «звезда-Ларионова»;
- Исследуемого конденсатора;

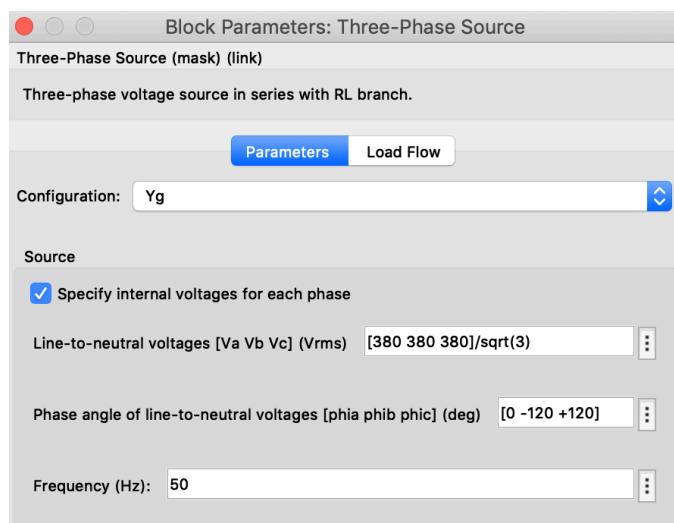


Рис 5.3. Параметры трехфазного

источника напряжения

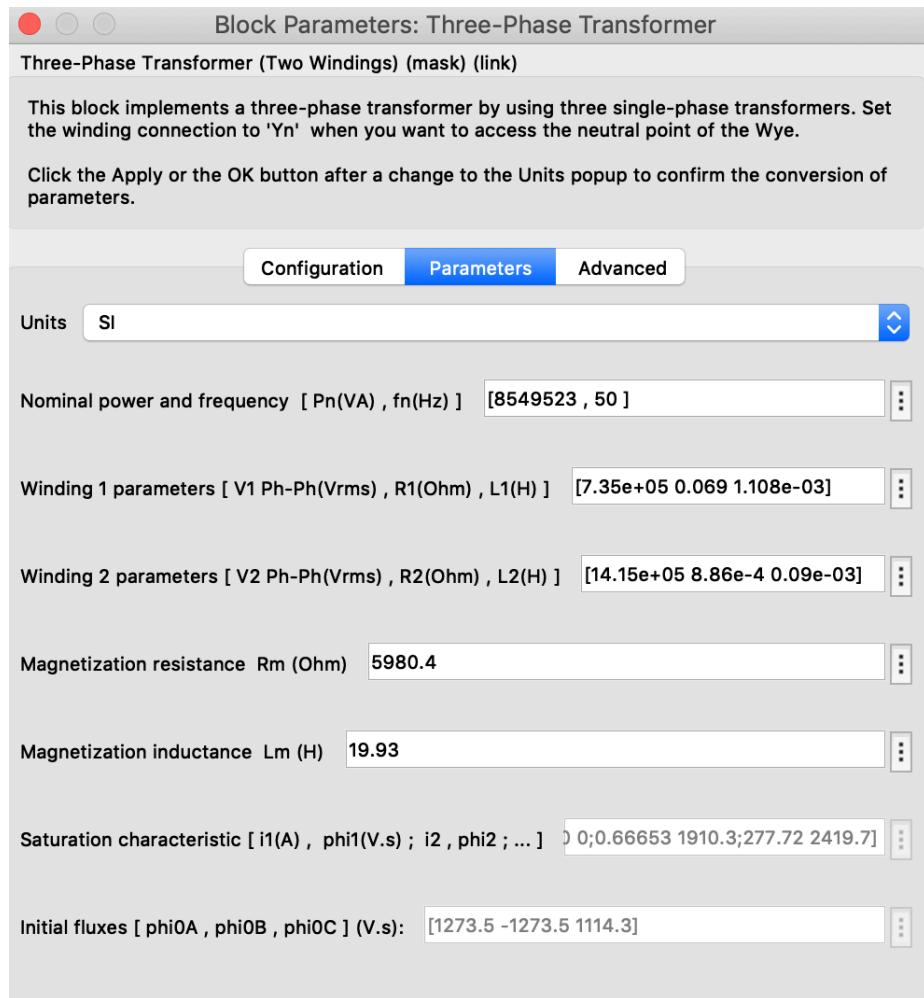


Рис 5.4. Параметры трансформатора

Параметры трансформатора приближены к параметрам реального испытуемого трансформатора.

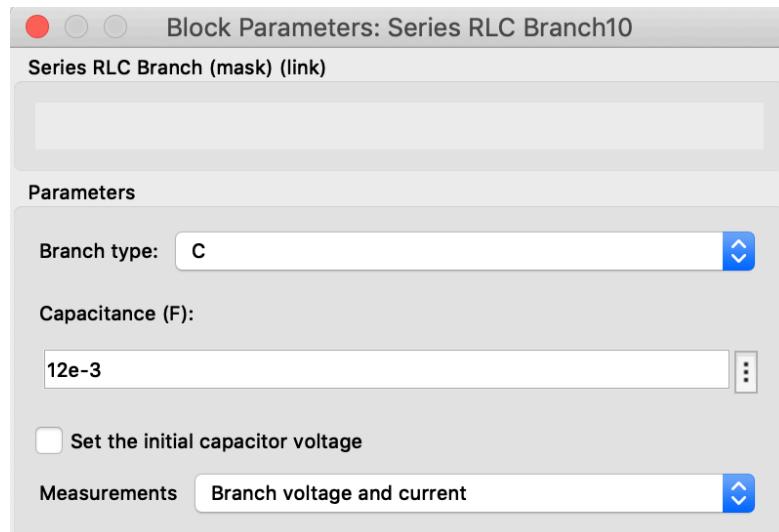


Рис 5.5. Параметры исследуемого конденсатора

Емкость модели приближена к емкости реального испытуемого конденсатора

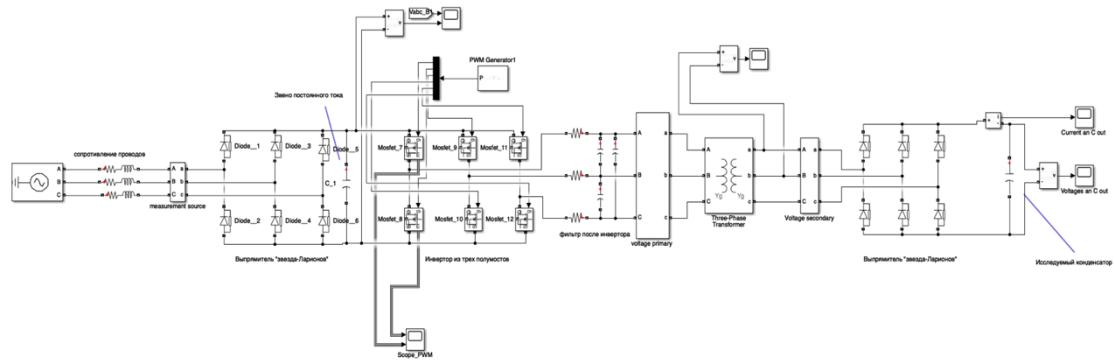


Рис 5.6. Полная испытуемая модель

## Глава 6. Испытания модели с использованием блока PWM Generator.

Для управления инверторами в этом испытании будет использоваться PWM Generator.

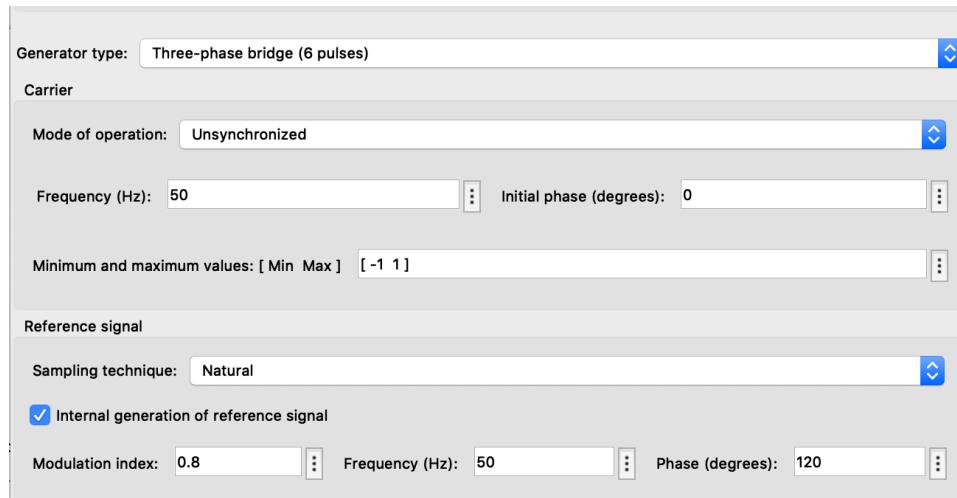


Рис 6.1. Параметры блока PWM Generator.

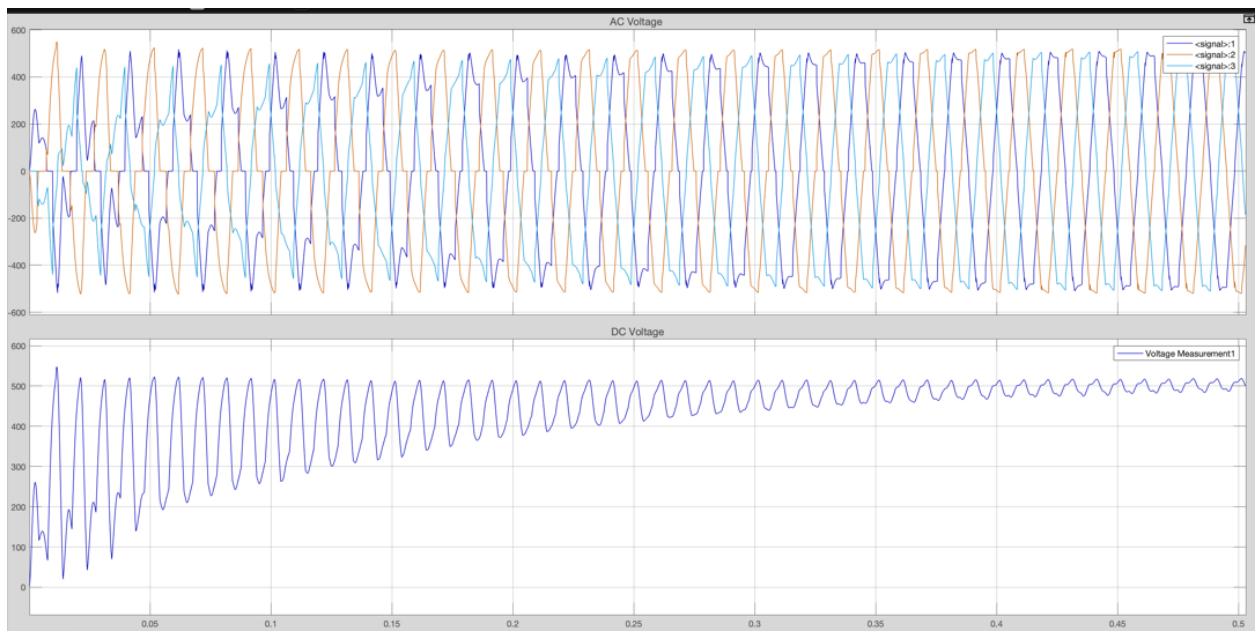


Рис. 6.2. Осциллографма напряжений  
источника и на выходе выпрямителя

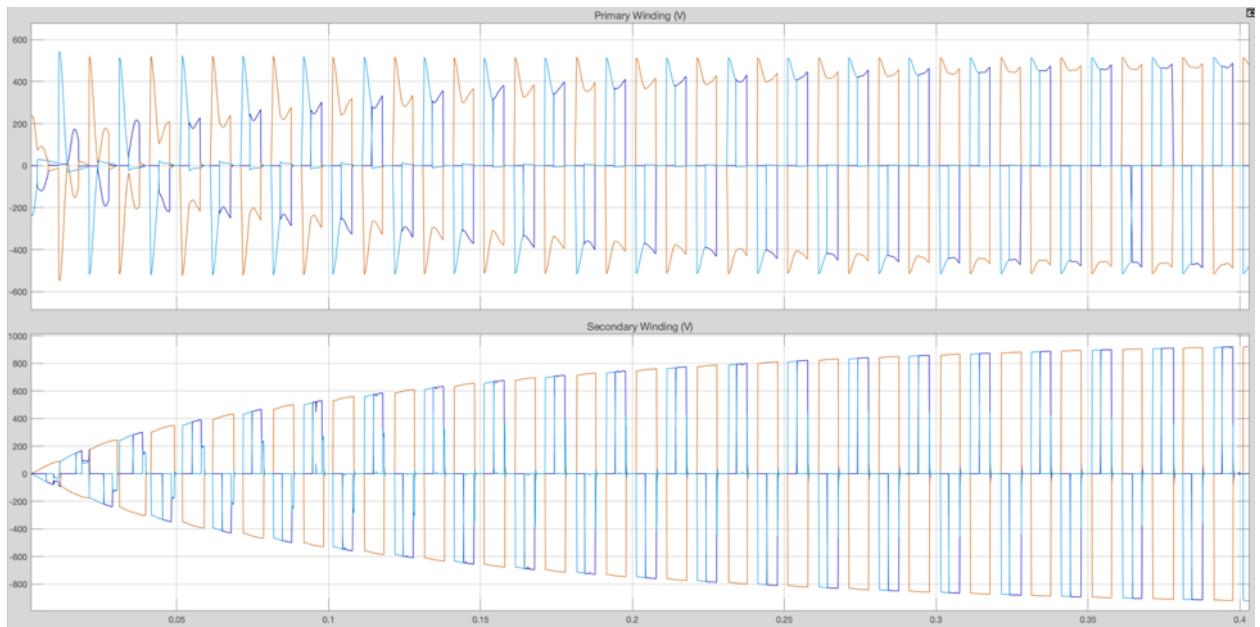


Рис 6.3. Осциллографма напряжений трансформатора.  
на верхнем графике – напряжение на первичной обмотке  
на нижнем графике – напряжение на вторичной обмотке

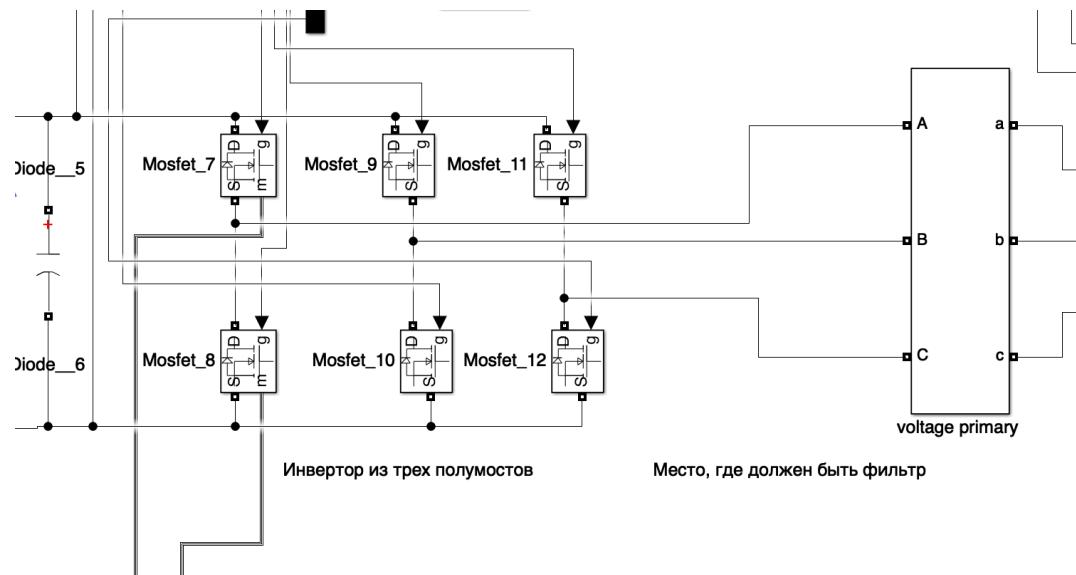


Рис 6.4. Часть модели без сглаживающего фильтра на выходе инвертора

Добавив сглаживающий фильтр, схема будет выглядеть вот так:

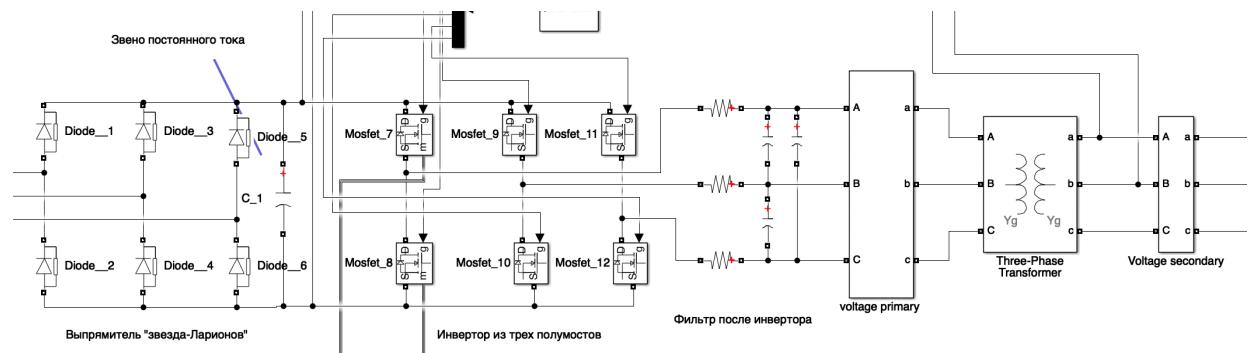
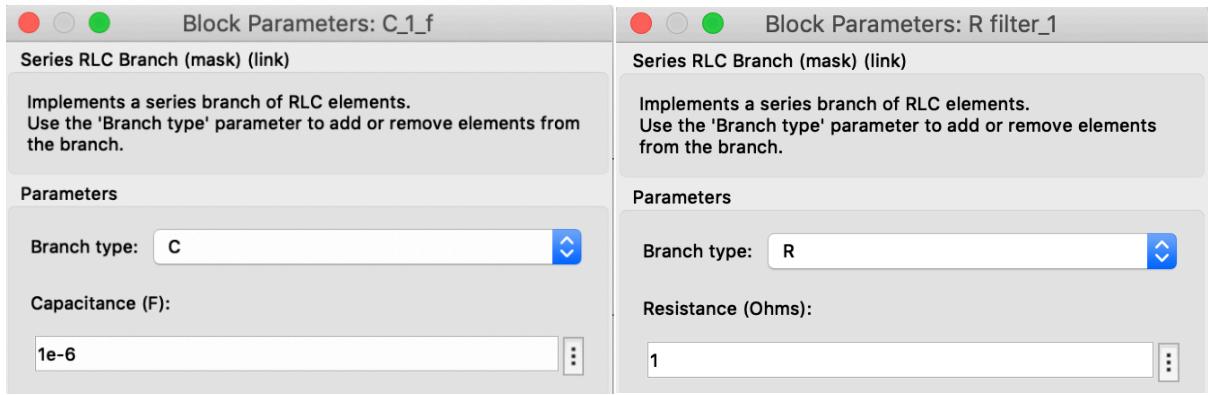


Рис 6.5. Часть модели с сглаживающим фильтром на выходе инвертора

Параметры элементов сглаживающего фильтра:



а)

б)

Рис 6.6. Параметры сглаживающего фильтра

а – ёмкость конденсатора; б – активное сопротивление

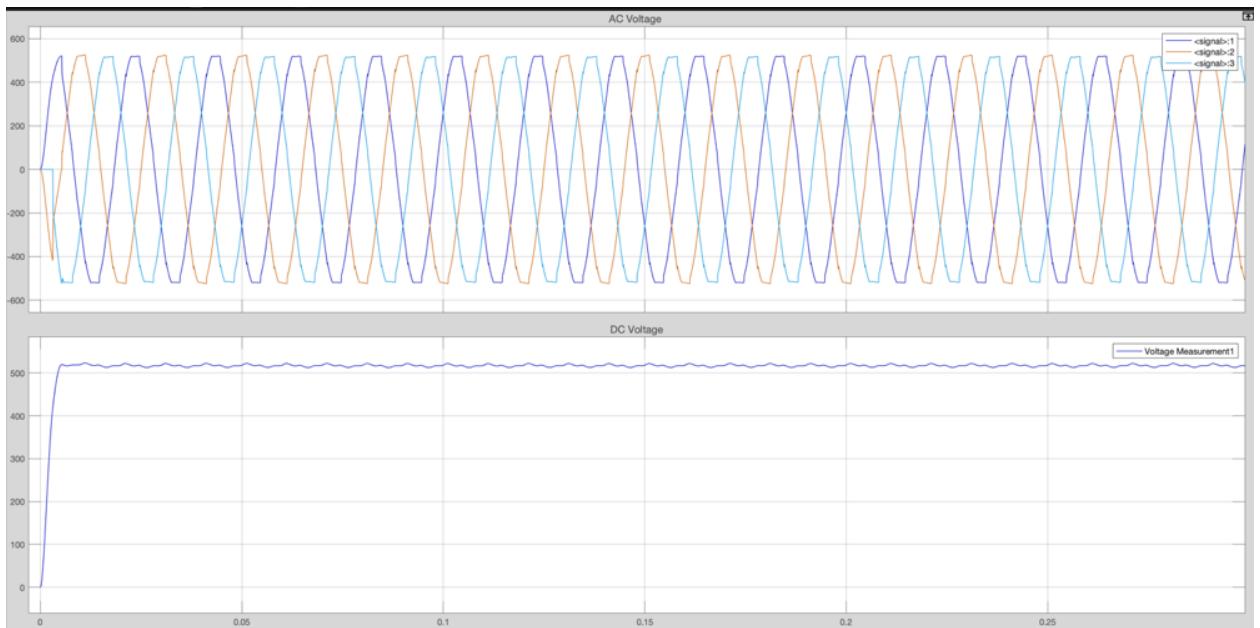


Рис 6.7. Осциллографма напряжений.

на верхнем графике – напряжение источника

на нижнем графике – напряжение после выпрямителя

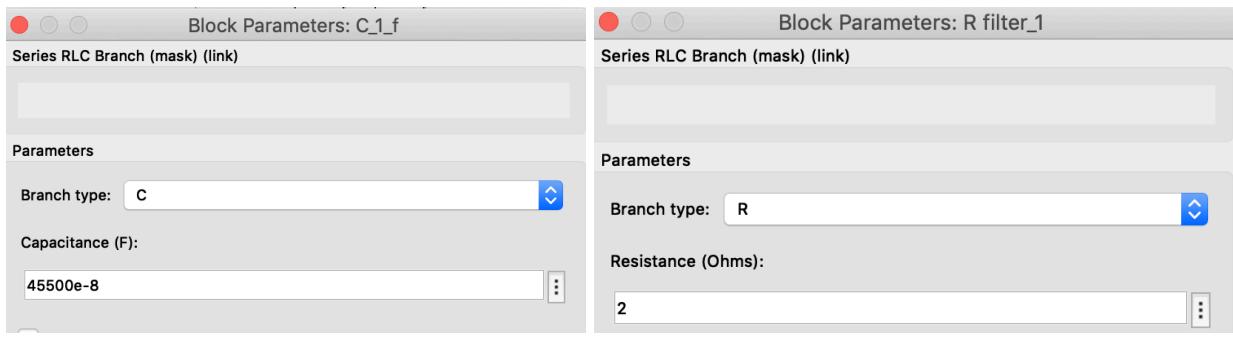


Рис 6.8. Диаграммы ШИМ сигналов

для первого полумоста

На диаграмме видно, что ШИМ работает, первый и второй инверторы работают в комплементарном режиме.

Для наглядности корректной работы инвертора, требуется фильтр на выходе инвертора. Фильтр позволит сгладить напряжение на выходе трансформатора и получить синусоидальный график напряжений.



а)

б)

Рис 6.9. Параметры сглаживающего фильтра

а – емкость конденсатора; б – активное сопротивление

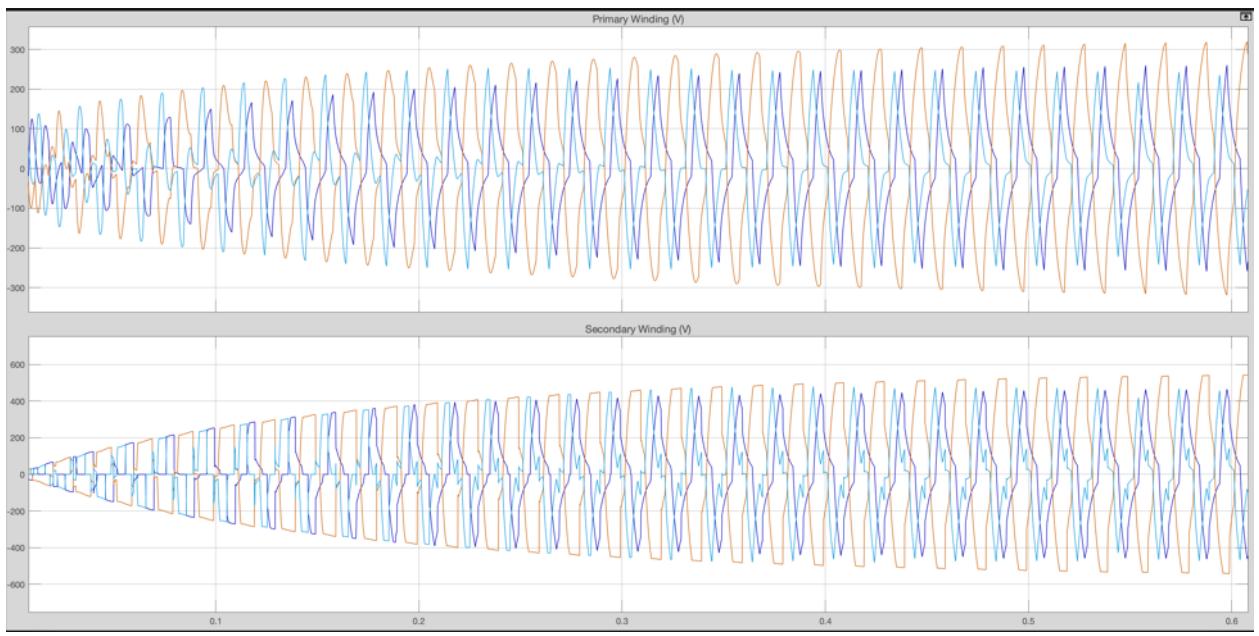


Рис 6.10. Осциллографма напряжений трансформатора.  
на верхнем графике – напряжение на первичной обмотке  
на нижнем графике – напряжение на вторичной обмотке  
Фильтр на выходе инвертора добавляется для того, чтобы показать корректную работу ШИМ.

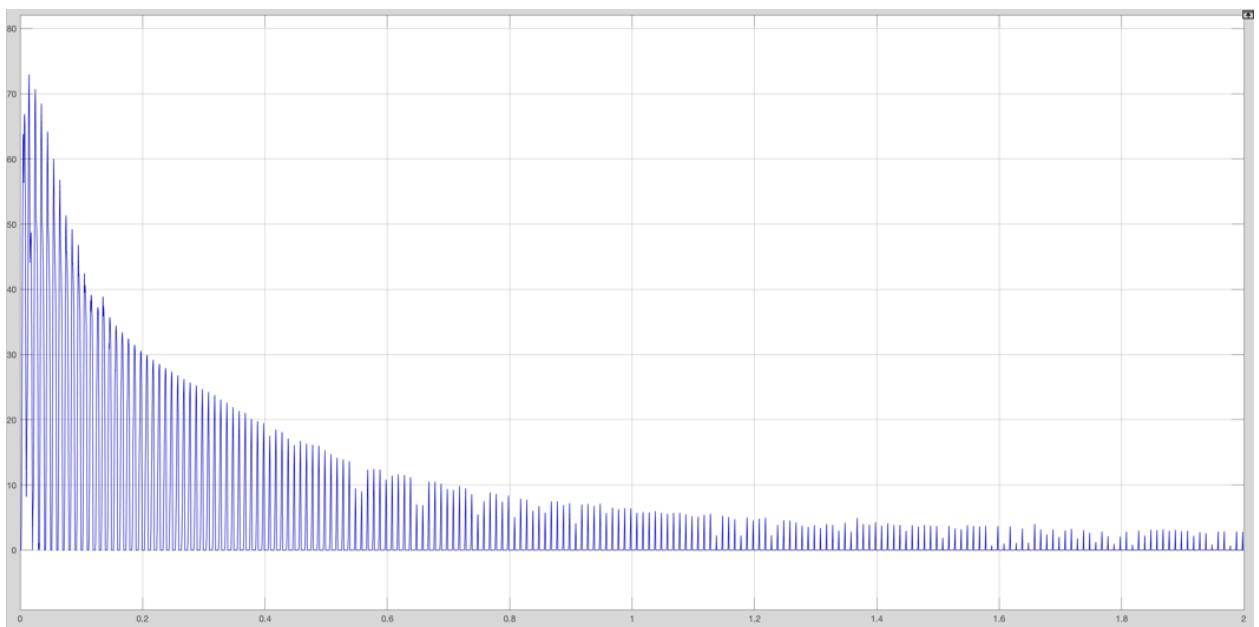


Рис 6.11. Осциллографма тока на исследуемом конденсаторе

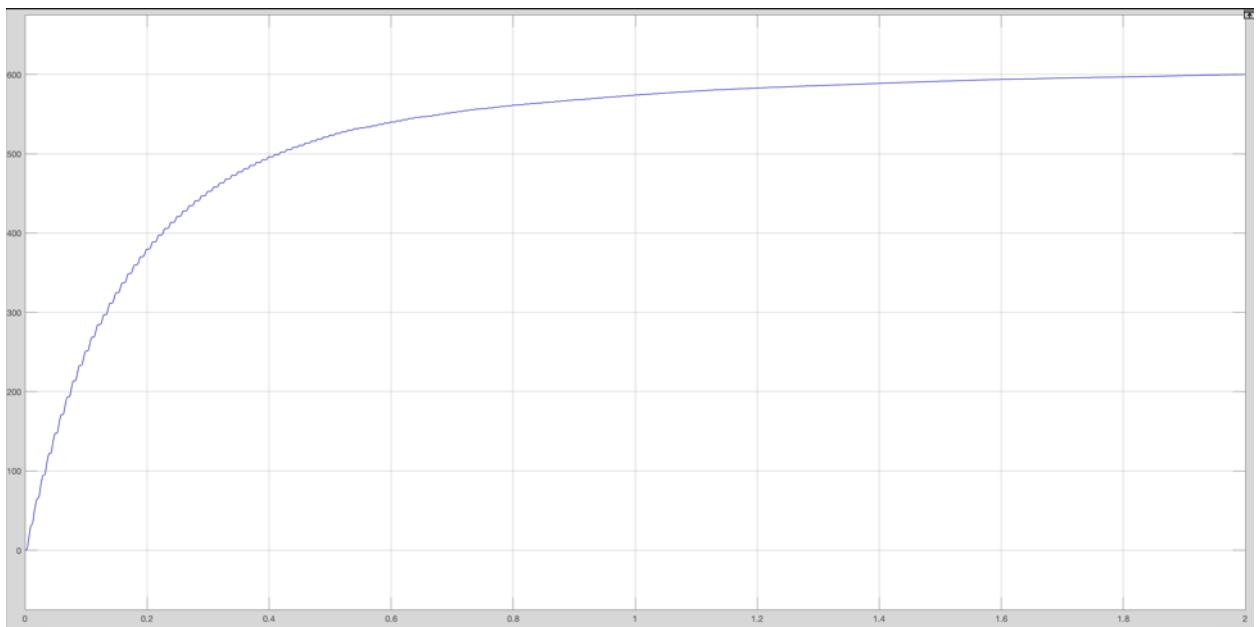


Рис 6.12. Осциллограмма напряжения на исследуемом конденсаторе

**Заключение:** ток возрастает скачком. Требуется, чтобы ток возрастил постепенно. С данным ШИМ-генератором не получиться реализовать постепенное возрастание тока. Решено было создать алгоритм управления инвертором зарядной обмотки. Та модель не позволяет задавать амплитуду напряжения.

## Глава 7. Создание алгоритма управления инвертора.

Было решено создать индивидуальную систему генерации векторной ШИМ, которой можно будет управлять.

Время продолжительности сигнала управления для транзисторов вычисляется по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot U_{ref}}{U_{dc}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \omega t\right); \\ T_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot U_{ref}}{U_{dc}} \cdot \sin(\omega t); \\ T_z = T_1 + T_2 + T_0; \end{array} \right.$$

Где:

- $T_1$  и  $T_2$  – периоды сигналов управления транзисторов полумоста инвертора;
- $U_{ref}$  – Задаваемое напряжение;
- $U_{dc}$  – Постоянное напряжение;
- $T_z$  – Период переключения;
- $T_0$  – Период мертвого времени;

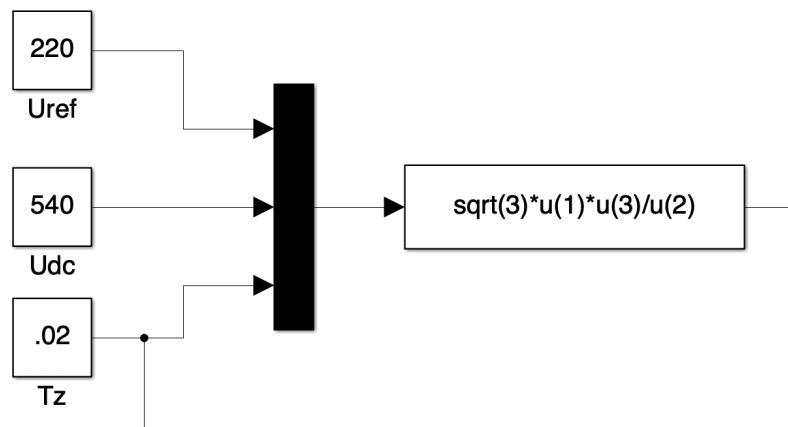


Рис 7.1. Блоки задаваемых величин

$$F(U_{ref}) = \sqrt{3} \cdot T_z \cdot \frac{U_{ref}}{U_{dc}};$$

Для того, чтобы перейти к уравнениям периода сигналов управления транзисторами, нужно задать частоту сети и переход от одного транзистора к другому.

Подсистема, которая будет задавать угол и номер управляемого транзистора.

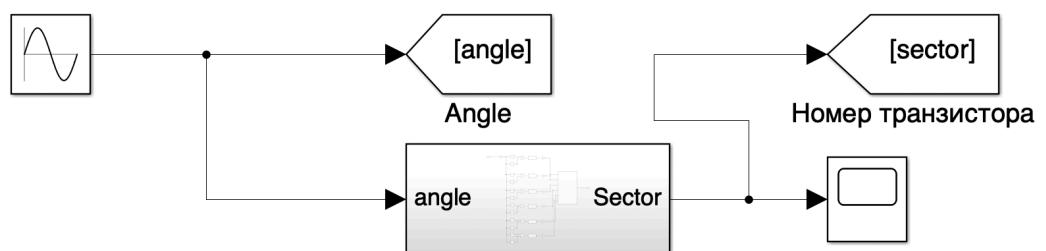


Рис 7.2. Подсистема, задающая угол и номер управляемого транзистора

## Алгоритм перебора состояний инвертора

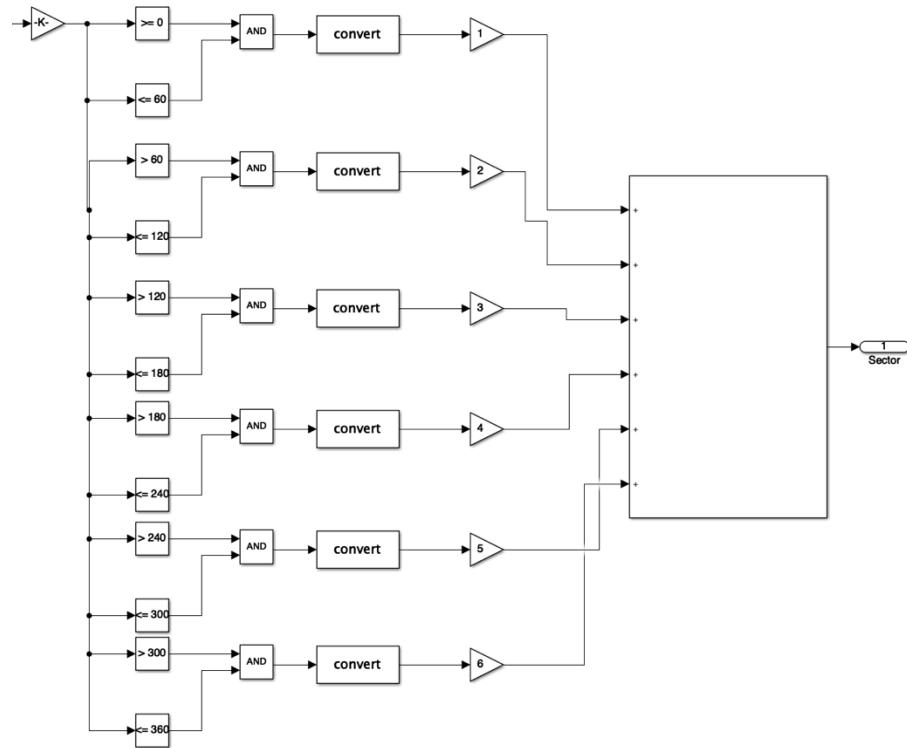


Рис 7.3. Система перебора состояний инвертора

Для наглядности данная система реализует состояние векторов как на Рис.7.4.



Рис 7.4. Состояния инвертора в режиме  
векторной ШИМ

После реализации подсистемы, требуется перейти к системам уравнения периода управления транзисторами в полумосте.

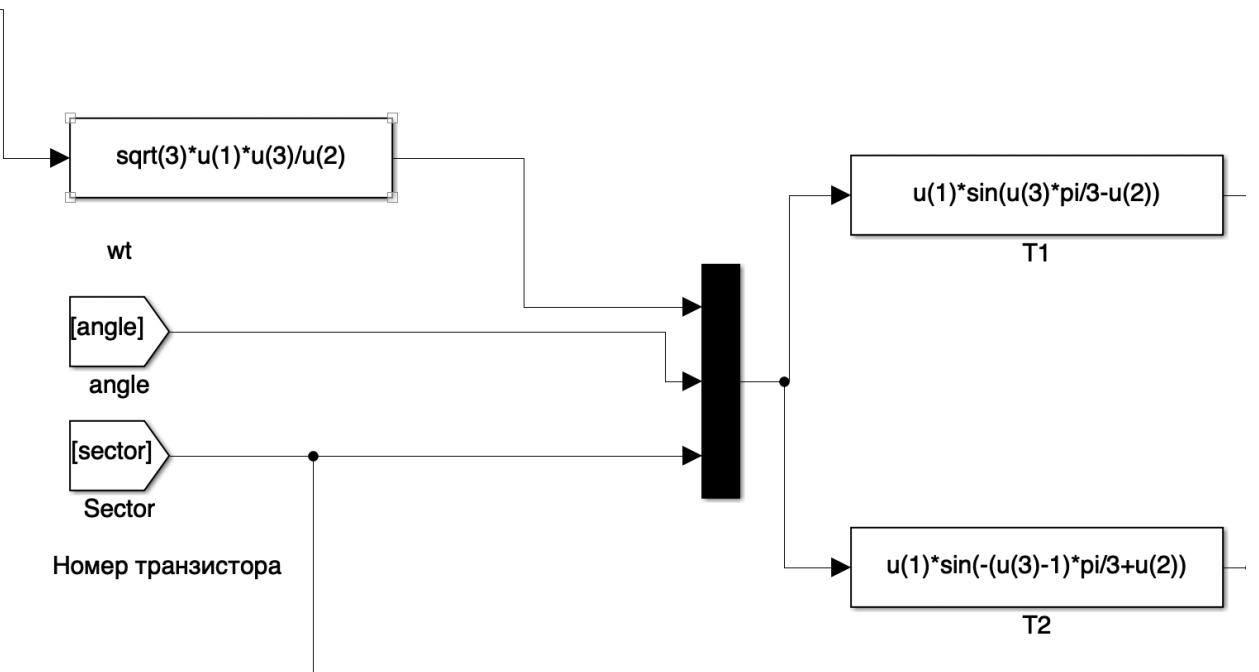


Рис 7.5. Переход к уравнениям периода  
управления транзисторами.

Сигналы подаются на инвертор.

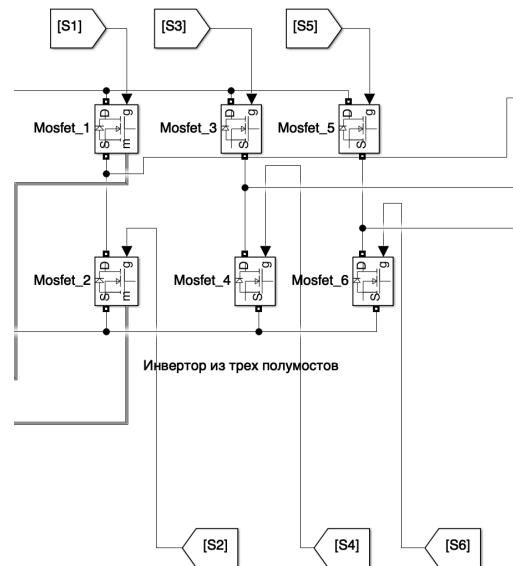


Рис 7.6. Схема инвертора.

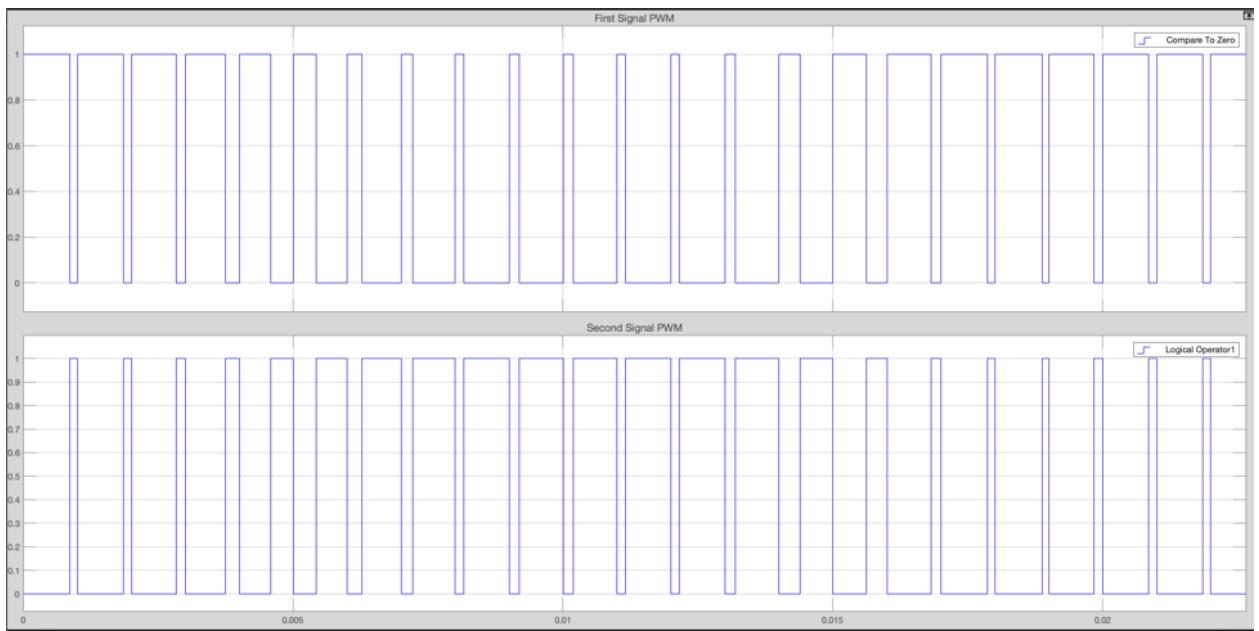


Рис 7.7. Диаграммы ШИМ сигналов

для первого полумоста

На диаграмме видно, что ШИМ работает, первый и второй инверторы работают в комплементарном режиме.

Для наглядности корректной работы инвертора, требуется фильтр на выходе инвертора. Фильтр позволит сгладить напряжение на выходе трансформатора и получить график синусоидального напряжения.

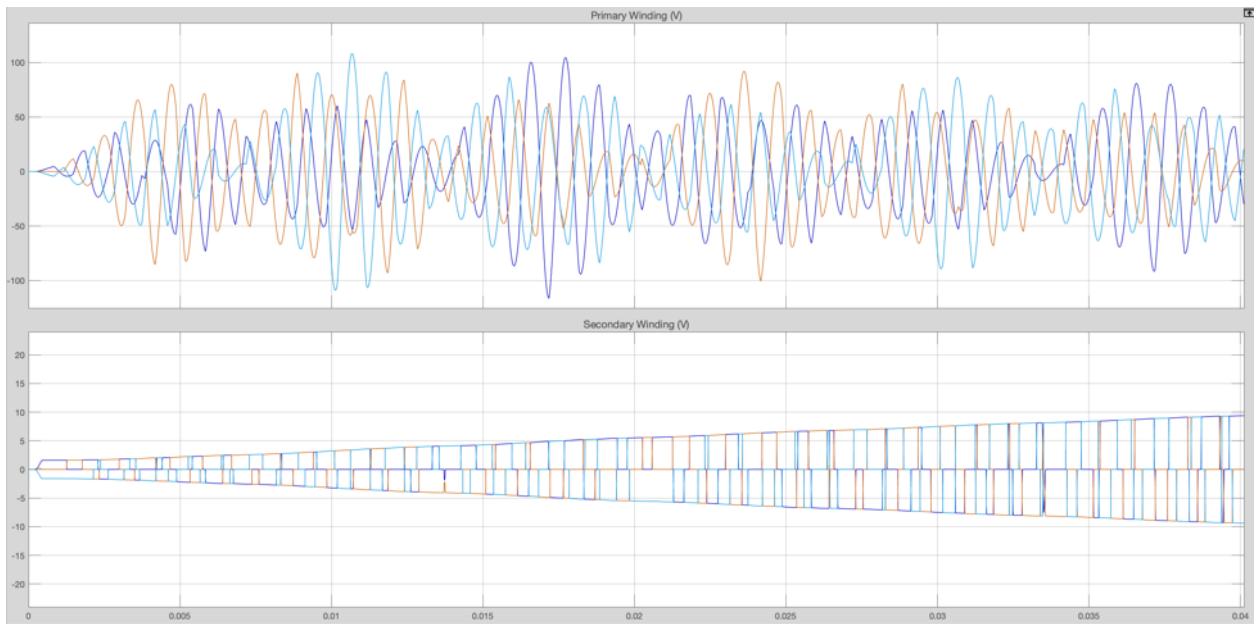


Рис 7.8. Осциллографмы напряжений  
после добавления сглаживающего фильтра

Убрав фильтр, была получена такая осциллографма.

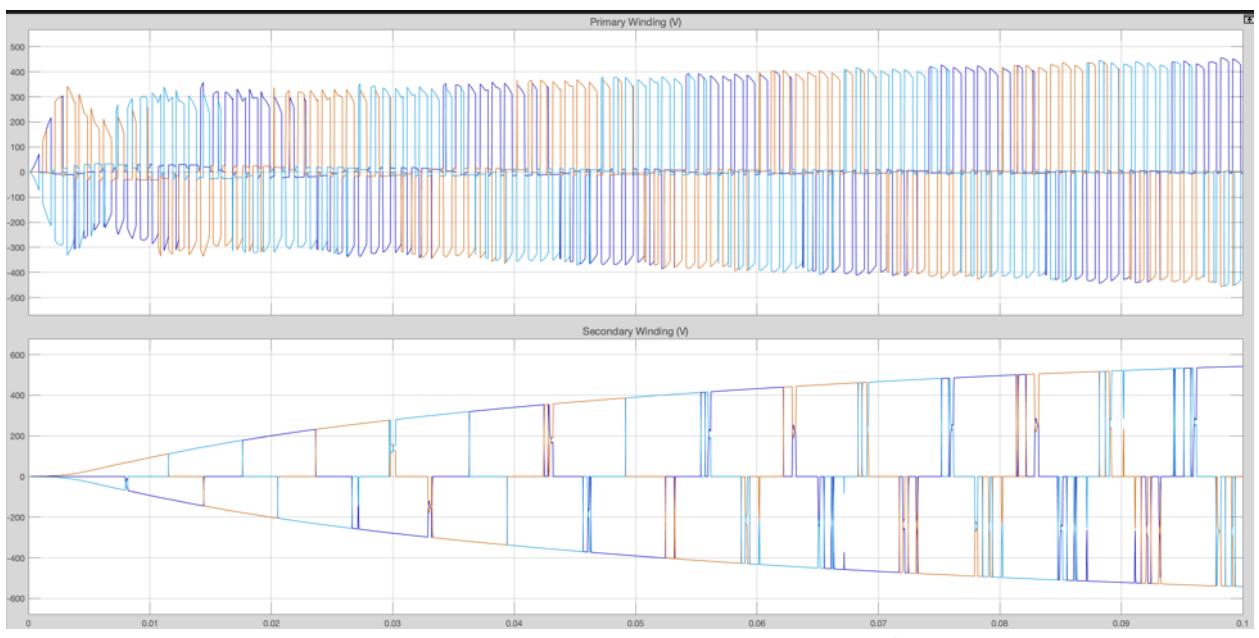


Рис 7.9. Осциллографма напряжений трансформатора.  
на верхнем графике – напряжение на первичной обмотке  
на нижнем графике – напряжение на вторичной обмотке

## Глава 8. Проведение опытов по заряду одной низковольтной ячейки.

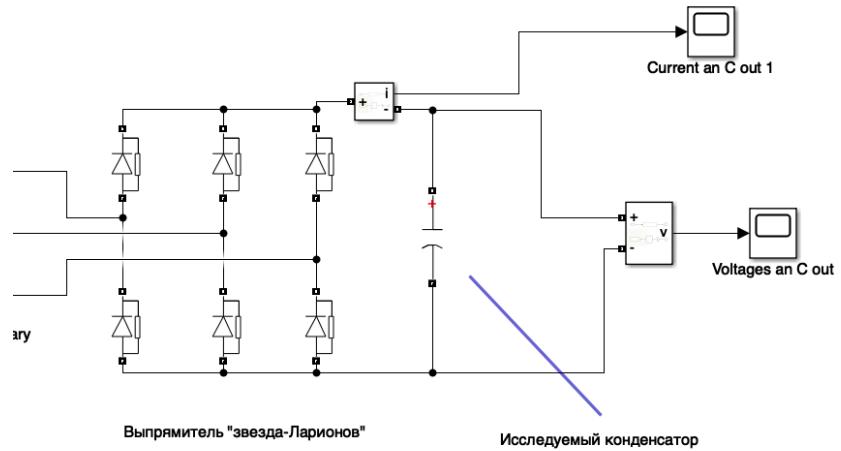


Рис 8.1. Исследуемая низковольтная ячейка

Проведя опыты, были получены такие осциллограммы тока и напряжения на конденсаторе.

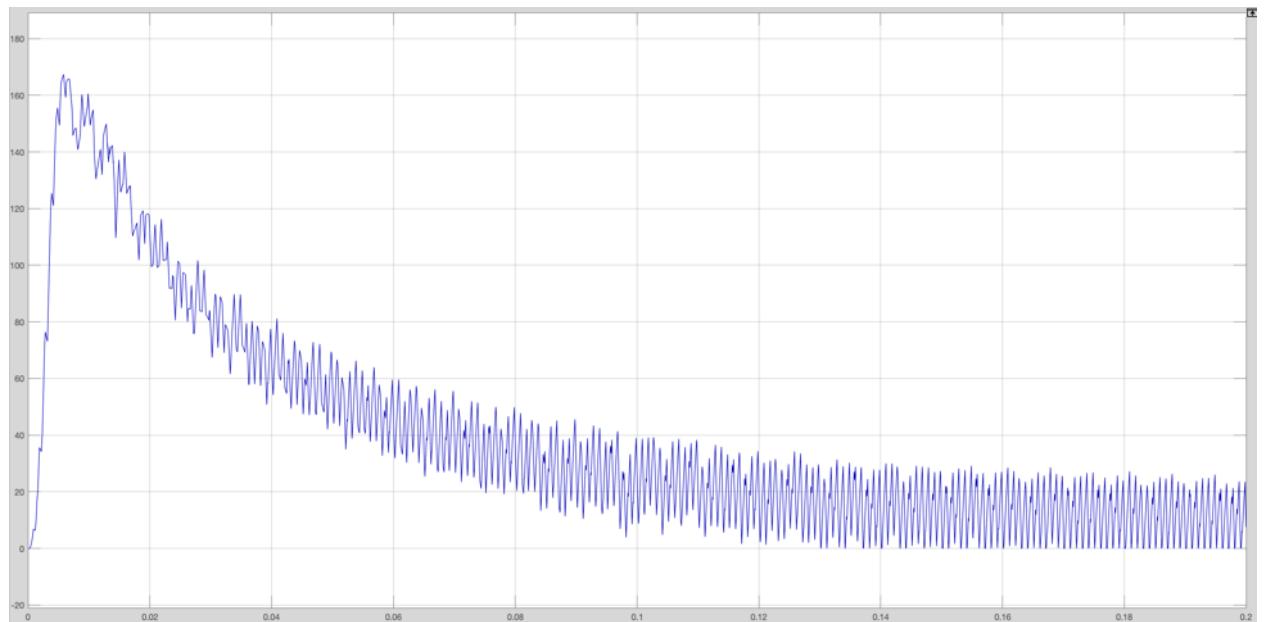


Рис 8.2. Осциллограмма тока заряда звена

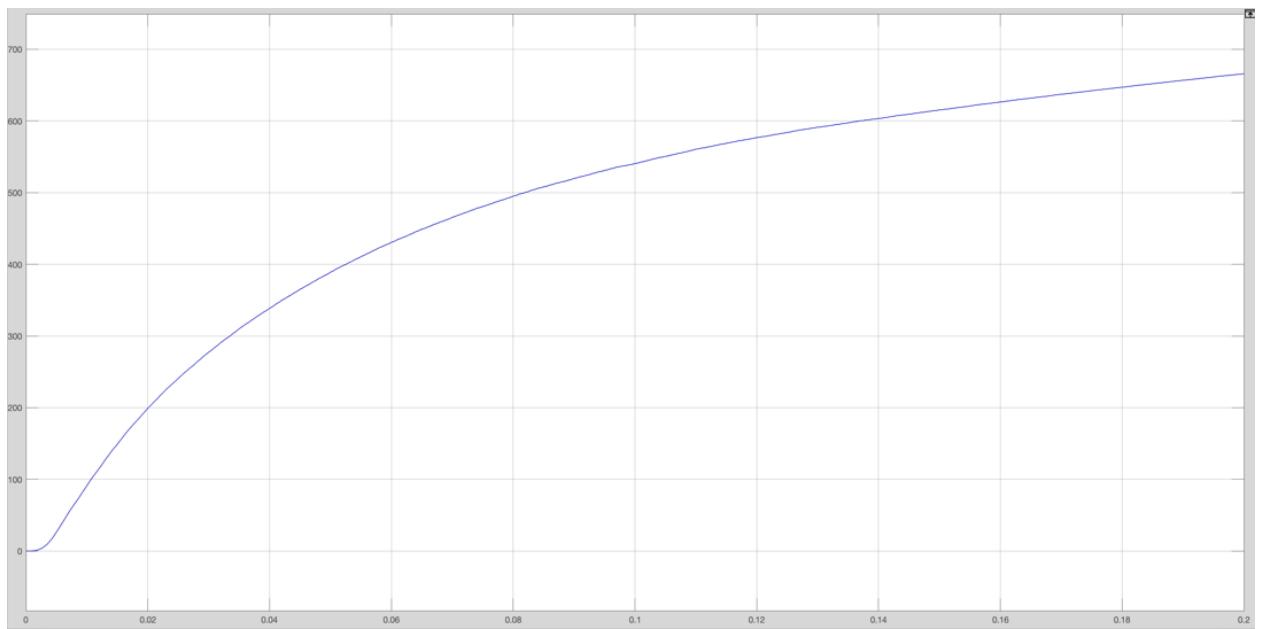


Рис 8.3. Осциллографмма напряжения на конденсаторе

Скорость заряда конденсатора не удовлетворяет цели работы. Ток заряда возрастает скачком – это может привести к аварийному режиму сети. Требуется плавный заряд конденсатора.

Следует задавать напряжение по линейному закону с помощью блоков Ramp и Saturation. Блок Ramp задает скорость возрастания напряжения, блок Saturation ограничивает конечное напряжение.

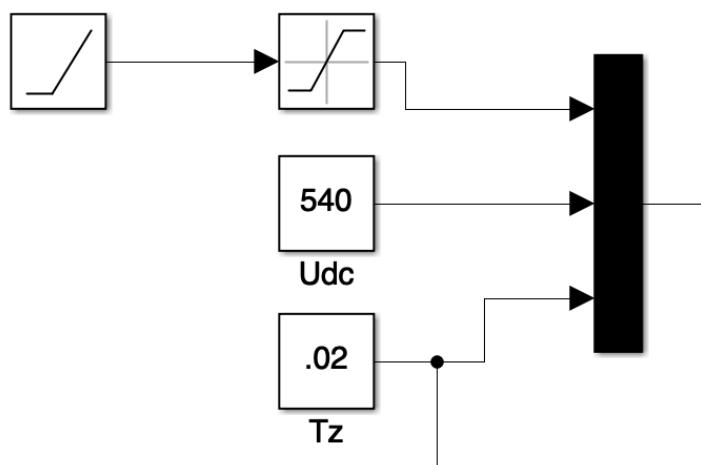
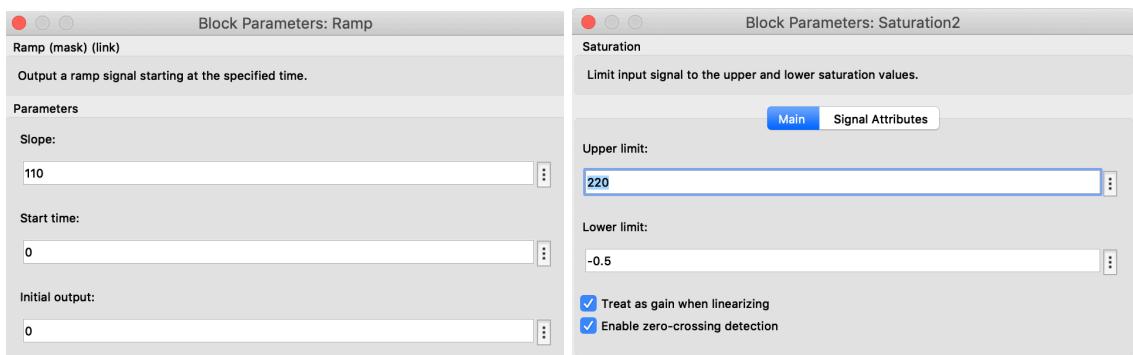


Рис 8.4. Блоки задаваемых величин



a)

б)

Рис 8.5. Параметры формирования напряжения  
по линейному закону  
а – скорость роста; б – конечное напряжение;

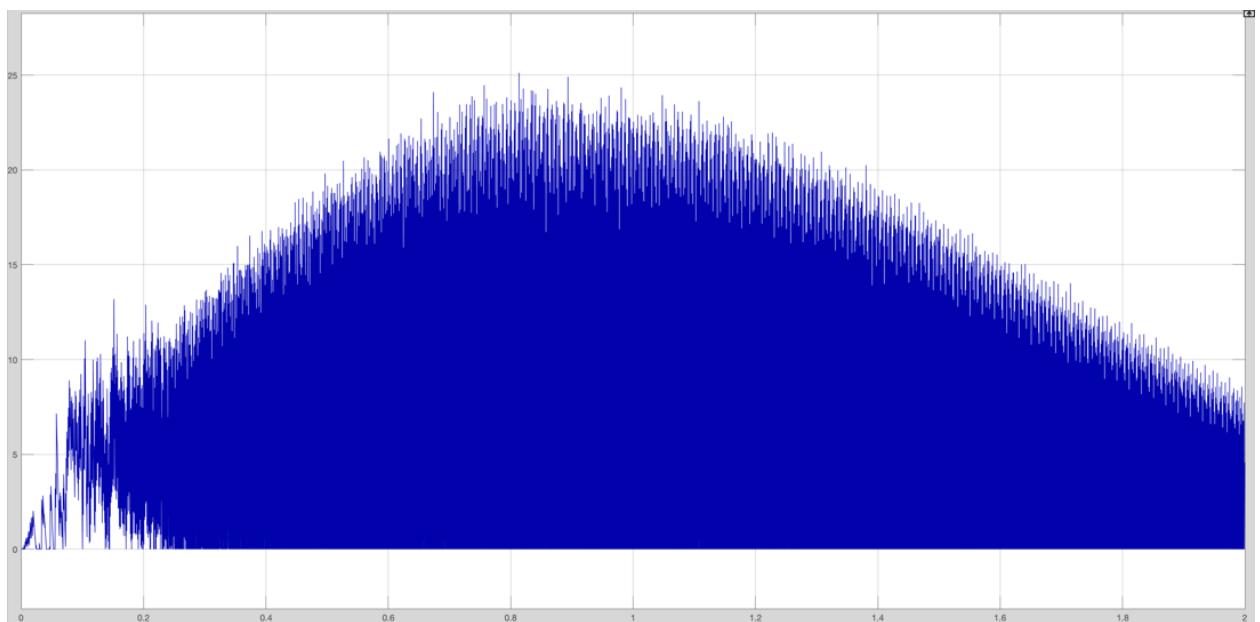


Рис 8.6. Осциллограмма тока заряда конденсатора

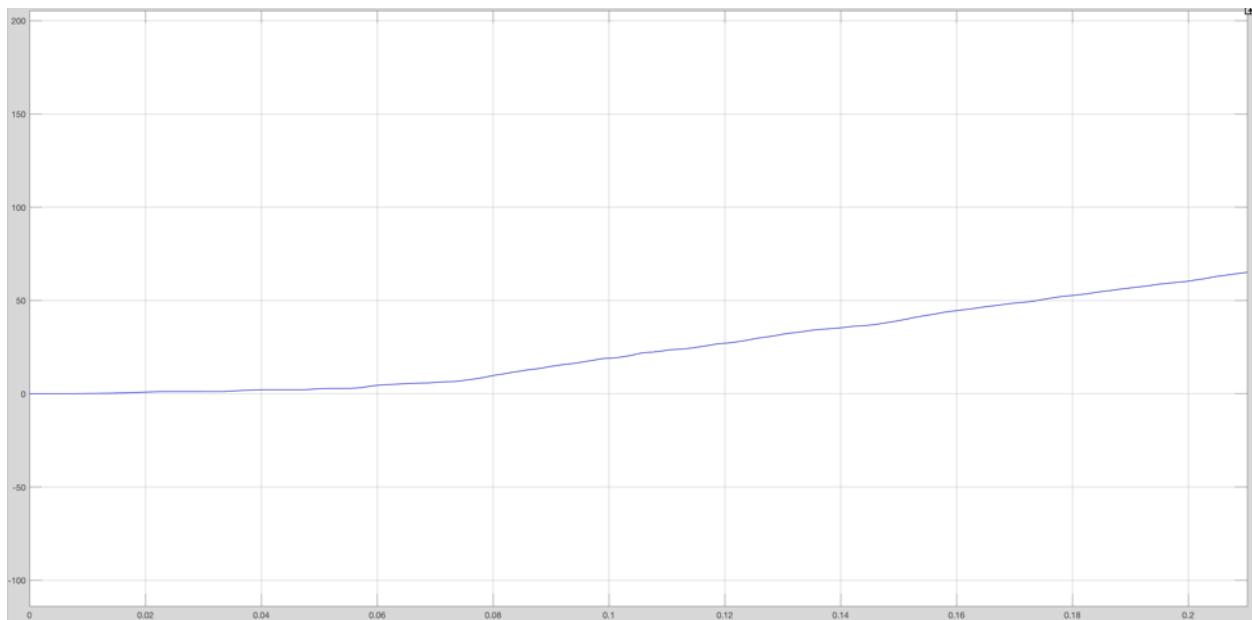


Рис 8.7. Осциллографмма напряжения на конденсаторе

Решено было уменьшить скорость возрастания напряжения с 110/с до 55/с.

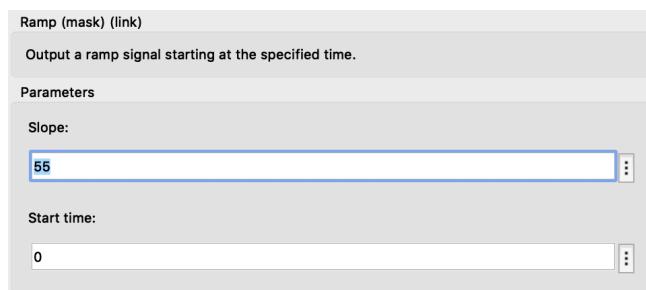


Рис 8.8. Параметры скорости роста

напряжения

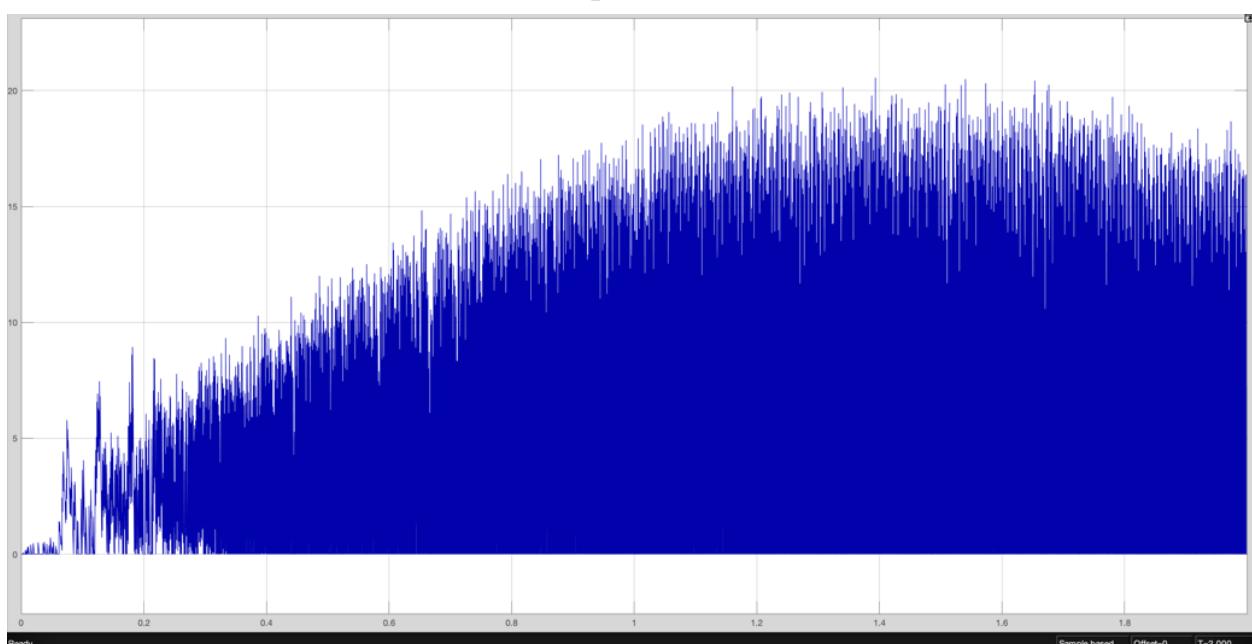


Рис 8.9. Осциллографмма тока заряда конденсатора

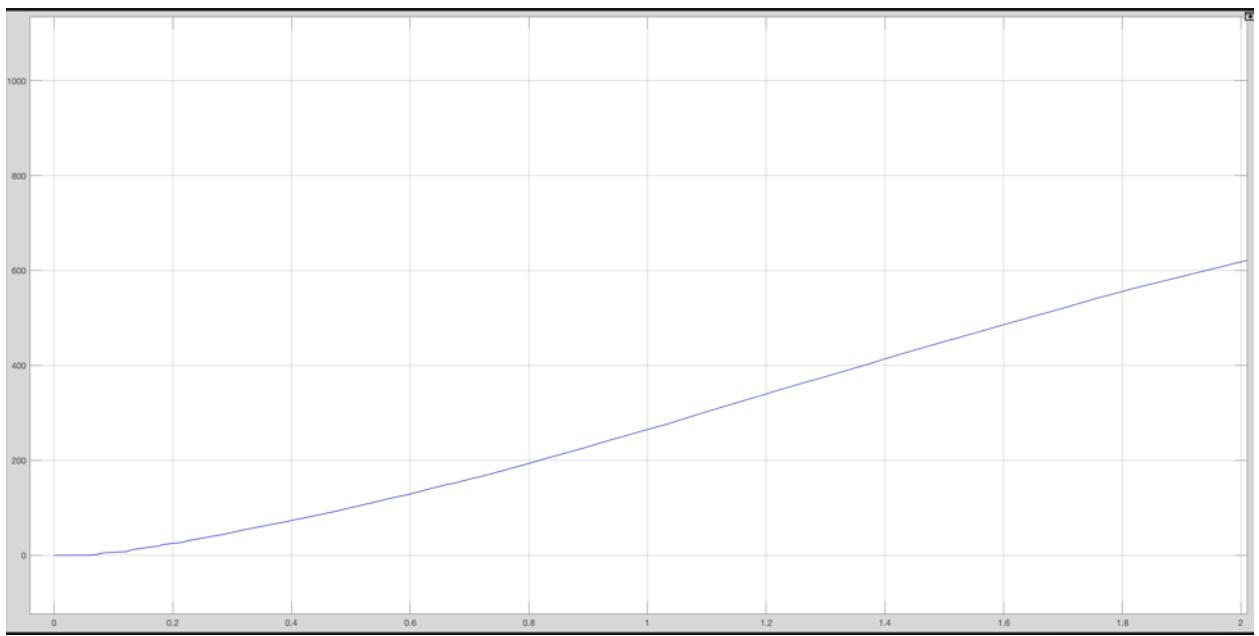


Рис 8.10. Осциллограмма напряжения на конденсаторе

**Заключение:** при использовании нового алгоритма заряда ячеек, ток перестал нарастать скачком. При уменьшении скорости возрастания напряжения в блоке Ramp, скорость наращивания и максимальное значение тока уменьшается. Чем меньше скорость роста подаваемого напряжения, тем меньше скачок тока и тем больше требуется времени для достижения максимума зарядного тока.

## **Список литературы**

1. Попков О.З. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов / О.З. Попков. 3-е изд., стереот. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. — 200 с.: ил.
2. Справочник по силовой электронике / Ю.К. Розанов, С 365 П.А. Воронин, С.Е. Рывкин, Е.Е. Чаплыгин; под ред. Ю.К. Розанова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014. — 472 с., ил.
3. <https://mathworks.com/help/>
4. Лебедев, А.И. Физика полупроводниковых приборов. — Москва: Физматлит, 2008. — 488 с.
5. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы: учеб. пособие / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. — Санкт-Петербург: Лань, 2009. — 480
6. <https://studylib.net/doc/18524195/analysis-of-three-phase-space-vector-pwm-voltage>
7. Анучин А.С. «Системы управления электроприводов», 2015 г., Издательство МЭИ.