

**Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

**Направление подготовки/специальность: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника**

**Наименование образовательной программы: Электрические аппараты управления и распределения энергии**

**Уровень образования: высшее образование - магистратура**

**Форма обучения: Очная**

**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Системы управления силовыми электронными аппаратами**

**Москва  
2022**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Лепанов М.Г.
	Идентификатор	Rab965209-LepanovMG-ec7ee096

(подпись)

М.Г. Лепанов

(расшифровка  
подписи)

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Курбатов П.А.
	Идентификатор	R1a0c0ffa-KurbatovPA-23b01cca

(подпись)

П.А.  
Курбатов

(расшифровка  
подписи)

Заведующий  
выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Киселев М.Г.
	Идентификатор	R572ca413-KiselevMG-f37ee096

(подпись)

М.Г.  
Киселев

(расшифровка  
подписи)

## ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-1 Способен участвовать в планировании, организации и выполнении исследований и анализировать полученные результаты

ИД-4 Применяет современные средства математического моделирования электрических и электронных аппаратов, а также средства управления качеством на стадии проектирования, производства и эксплуатации электрических и электронных аппаратов

2. ПК-3 Способен участвовать в научно-исследовательской работе в области профессиональной деятельности

ИД-2 Применяет современный набор инструментов управления качеством электрических и электронных аппаратов, включая статистические методы

и включает:

**для текущего контроля успеваемости:**

Форма реализации: Компьютерное задание

1. КР №2 «Исследование методов модуляции в преобразователях напряжения» (Контрольная работа)

2. КР №3 «Вычисление активных и неактивных составляющих тока» (Контрольная работа)

3. КР №4 «Исследование трехфазного четырехквadrантного регулятора» (Контрольная работа)

4. КР №5 «Исследование трехфазного активного выпрямителя» (Контрольная работа)

5. КР №6 «Моделирование силового электронного устройства повышения качества электроэнергии» (Контрольная работа)

Форма реализации: Смешанная форма

1. КР №1 «Анализ работы схем с силовыми электронными ключами» (Контрольная работа)

## БРС дисциплины

3 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %						
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5	КМ-6
	Срок КМ:	3	5	7	10	13	16
Методы управления силовыми электронными устройствами							
Математическое описание (математические модели) электронных аппаратов		+	+				

Методы импульсной модуляции в транзисторных преобразователях		+				
Преобразование координат и теория мгновенной мощности			+			
Четырехквadrантные регуляторы и активные выпрямители						
Регулирование активной и реактивной мощности				+	+	
Компьютерное моделирование четырехквadrантного преобразователя и активного выпрямителя				+	+	
Устройства повышения качества электроэнергии						
Улучшение качества электроэнергии посредством компенсации неактивной мощности. Алгоритмы управления регулятором качества электроэнергии						+
Имитационное моделирование и исследование характеристик многофункционального регулятора качества электроэнергии						+
Вес КМ:	10	20	15	15	15	25

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

## СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

### *I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций*

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ПК-1	ИД-4 <sub>ПК-1</sub> Применяет современные средства математического моделирования электрических и электронных аппаратов, а также средства управления качеством на стадии проектирования, производства и эксплуатации электрических и электронных аппаратов	<p>Знать:</p> <p>схемотехнические решения и принципы построения алгоритмов управления устройств повышения качества электроэнергии принципы функционирования, расчета и выбора основных элементов четырехквadrантных регуляторов и активных выпрямителей</p> <p>Уметь:</p> <p>создавать и отлаживать компьютерные модели силовых электронных аппаратов с использованием программы для имитационного моделирования выполнять расчет и анализ работы, исследовать характеристики силовых</p>	<p>КР №4 «Исследование трехфазного четырехквadrантного регулятора» (Контрольная работа)</p> <p>КР №5 «Исследование трехфазного активного выпрямителя» (Контрольная работа)</p> <p>КР №6 «Моделирование силового электронного устройства повышения качества электроэнергии» (Контрольная работа)</p>

		электронных регуляторов мощности посредством компьютерного моделирования	
ПК-3	ИД-2 <sub>ПК-3</sub> Применяет современный набор инструментов управления качеством электрических и электронных аппаратов, включая статистические методы	<p>Знать:</p> <p>способы анализа электрических процессов в трехфазных системах</p> <p>методы импульсной модуляции, используемые в силовых электронных устройствах</p> <p>Уметь:</p> <p>применять математическое описание трехфазных электрических цепей для анализа токов, напряжений и мощностей</p> <p>составлять математические модели силовых электронных аппаратов и реализовывать методы управления преобразовательными устройствами</p>	<p>КР №1 «Анализ работы схем с силовыми электронными ключами» (Контрольная работа)</p> <p>КР №2 «Исследование методов модуляции в преобразователях напряжения» (Контрольная работа)</p> <p>КР №3 «Вычисление активных и неактивных составляющих тока» (Контрольная работа)</p>

## II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

### КМ-1. КР №1 «Анализ работы схем с силовыми электронными ключами»

**Формы реализации:** Смешанная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 10

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студенту выдается один из вариантов задания, требуется в течение 45 мин. выполнить письменную часть работы, а затем - компьютерное задание. По истечении отведенного на выполнение времени студент сдает работу преподавателю на проверку и демонстрирует на компьютере полученные результаты.

#### Краткое содержание задания:

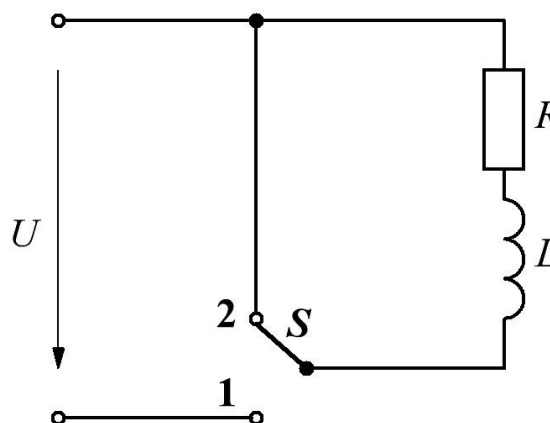
Требуется рассчитать переходные процессы в схеме с ключевым элементом, записать дифференциальное уравнение с использованием переключающей функции и выполнить моделирование заданной схемы в программе MatLab/Simulink.

#### Контрольные вопросы/задания:

Уметь: составлять математические модели силовых электронных аппаратов и реализовывать методы управления преобразовательными устройствами

##### 1. Исходные данные:

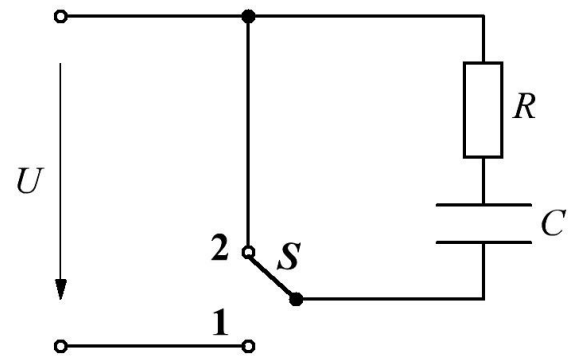
$U = 200 \text{ В}$ ,  $R = 20 \text{ Ом}$ ,  $L = 40 \text{ мГн}$



1. Запишите дифференциальные уравнения для двух состояний ключа и найдите ток и напряжения на элементах схемы при условии, что выключение ключа происходит после завершения переходного процесса при включенном состоянии.
2. Составьте общее дифференциальное уравнение с использованием переключающей функции.
3. Соберите в программе Simulink исследуемую схему для каждого положения ключа. Получите осциллограммы тока и напряжений на элементах схемы.

##### 2. Исходные данные:

$U = 200 \text{ В}$ ,  $R = 20 \text{ Ом}$ ,  $C = 50 \text{ мкФ}$

	 <p>1. Запишите дифференциальные уравнения для двух состояний ключа и найдите ток и напряжения на элементах схемы при условии, что выключение ключа происходит после завершения переходного процесса при включенном состоянии.</p> <p>2. Составьте общее дифференциальное уравнение с использованием переключающей функции.</p> <p>3. Соберите в программе Simulink исследуемую схему для каждого положения ключа. Получите осциллограммы тока и напряжений на элементах схемы.</p>
--	---

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 80*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется, если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно.*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется, если задание в целом выполнено верно, но есть недочеты, замечания, незначительные ошибки.*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется, если задание выполнено не в полном объеме или имеются существенные ошибки.*

**КМ-2. КР №2 «Исследование методов модуляции в преобразователях напряжения»**

**Формы реализации:** Компьютерное задание

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Требуется в течение одной пары выполнить на компьютере задание по моделированию для указанного преподавателем варианта исходных данных. По истечении отведенного времени студент показывает выполненные пункты задания, преподаватель фиксирует объем выполнения работы и соответствие полученных результатов содержанию задания, информирует студента о возможных ошибках, указывает на недочеты и формулирует замечания. После этого студент в назначенный срок должен оформить и сдать на проверку отчет, подготовленный в



соответствии с заданием, затем в течение заранее определенного времени преподаватель проверяет отчет и выставляет оценку.

### Краткое содержание задания:

Для трехфазного мостового инвертора с активно-индуктивной нагрузкой требуется исследовать и выполнить сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции. Для этого необходимо вычислить параметры нагрузки (сопротивление и индуктивность) и собрать модель инвертора в программе MatLab/Simulink на основе преобразователя с идеальными ключами.

Формулировки каждого пункта задания приведены в разделе “Контрольные вопросы на умения”. По результатам выполнения необходимо оформить отчет в виде текстового документа, который должен содержать указанные графики и расчеты с пояснениями и комментариями, а также выводы (заключения), соответствующие заданиям. При формулировании выводов следует ответить на вопросы, представленные в разделе “Контрольные вопросы на знания”.

### Контрольные вопросы/задания:

<p>Знать: методы импульсной модуляции, используемые в силовых электронных устройствах</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Каковы характерные отличия широтно-импульсной модуляции (ШИМ) от метода 180-градусной коммутации при управлении трехфазными преобразователями?</li><li>2. Как определяются коэффициенты модуляции при синусоидальной и векторной ШИМ?</li><li>3. Каковы частоты высших (модуляционных) гармоник фазного и линейного напряжений? Поясните влияние частоты ШИМ на гармонический состав напряжений.</li><li>4. Чему равны амплитуды основных гармоник фазного и линейного напряжений при коэффициенте модуляции <math>M = 5</math> ?</li><li>5. Объясните влияние коэффициента модуляции на уровень гармонических искажений (<math>THD</math>) напряжений, формируемых инвертором. Сравните коэффициенты <math>THD</math> при ШИМ с соответствующим значением при 180-градусном управлении.</li><li>6. Поясните различие амплитуд основных гармоник фазного и линейного напряжений при синусоидальной модуляции по сравнению с ШИМ с инъекцией 3-й гармоники и векторной ШИМ. Как отличаются гармонические составы напряжений для этих методов модуляции?</li><li>7. Чему равно отношение амплитуды основной гармоники фазного напряжения на выходе трехфазного мостового инвертора к входному напряжению при векторной ШИМ с единичным коэффициентом модуляции? Поясните отличие по сравнению с синусоидальной ШИМ.</li><li>8. Каковы достоинства и недостатки гистерезисного управления (релейной модуляции) по сравнению с методами ШИМ?</li><li>9. Поясните влияние ширины зоны срабатывания релейного элемента на коэффициент искажения</li></ol>
---	--

<p>Уметь: составлять математические модели силовых электронных аппаратов и реализовывать методы управления преобразовательными устройствами</p>	<p>выходного тока?</p> <p><b>1. Исследуйте инвертор с синусоидальной ШИМ для двух схем соединения нагрузки ("звезда" с нейтралью и без):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- входное напряжение <math>U_{DC} = 200</math> В;</li> <li>- амплитуда тока нагрузки (при коэффициенте модуляции <math>M = 1</math>): <math>I_m = 10</math> А;</li> <li>- начальная фаза тока нагрузки (при <math>M = 1</math>): <math>\varphi = \frac{\pi}{6}</math>.</li> </ul> <p>Сохраните гармонический состав токов, фазного и линейного напряжений (результат разложения сигналов в ряд Фурье – <i>FFT</i>) при <math>M = 1</math>. Снимите и постройте графики зависимостей амплитуд основных гармоник фазного и линейного напряжений, а также их <i>THD</i> от коэффициента модуляции при изменении <math>M</math> от 0 до 5. Сохраните результат <i>FFT</i>-анализа линейного и фазного напряжений для трёх значений кратности частоты модуляции (следует выбрать ближайшие друг к другу значения кратности меньше 100): а) <math>K_f = 3n</math>; б) <math>K_f = 3m</math>; в) <math>K_f = l</math> (<math>n</math> – нечётное число; <math>m, l</math> – чётные числа).</p> <p><b>2. Исследуйте инвертор с управлением методом ШИМ с инъекцией 3-й гармоники для схемы соединения нагрузки "звезда" с нейтралью (4-проводная):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- входное напряжение <math>U_{DC} = 600</math> В;</li> <li>- амплитуда тока нагрузки (при коэффициенте модуляции <math>M = 1</math>): <math>I_m = 40</math> А;</li> <li>- начальная фаза тока нагрузки (при <math>M = 1</math>): <math>\varphi = \frac{\pi}{12}</math>.</li> </ul> <p>Сформируйте модулирующие сигналы в виде суммы основной гармоники и гармоники с частотой 150 Гц, подберите амплитуду 3-й гармоники для получения сигналов трапецеидальной формы. Определите максимальную амплитуду основной гармоники модулирующих сигналов из условия отсутствия перемодуляции, сохраните несущий сигнал, модулирующие сигналы и их составляющие. Сохраните гармонический состав фазного и линейного напряжений, токов нагрузки и нейтрали.</p> <p><b>3. Исследуйте инвертор с векторной ШИМ для схемы соединения нагрузки "звезда" без нейтрали (3-проводная):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- входное напряжение <math>U_{DC} = 500</math> В;</li> <li>- амплитуда тока нагрузки (при коэффициенте модуляции <math>M = 1</math>): <math>I_m = 50</math> А;</li> <li>- начальная фаза тока нагрузки (при <math>M = 1</math>): <math>\varphi = \frac{\pi}{3}</math>.</li> </ul> <p>Выполните моделирование инвертора, используя для управления блок "SVPWM Generator", задав амплитуду и фазу обобщенного вектора. Сохраните гармонический состав фазного и линейного напряжений при коэффициенте модуляции <math>M = 1</math>.</p>
---	--

	<p>Определите величину <math>M</math>, при которой обеспечивается заданная амплитуда тока.</p> <p>Выполните моделирование для двух алгоритмов переключения (задаются в параметрах блока управления). Сохраните диаграммы импульсов управления.</p> <p><b>4. Исследуйте инвертор с гистерезисным управлением (релейной модуляцией) для двух схем соединения нагрузки (3- и 4-проводной):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- входное напряжение <math>U_{DC} = 800</math> В;</li> <li>- амплитуда тока нагрузки (при коэффициенте модуляции <math>M = 1</math>): <math>I_m = 100</math> А;</li> <li>- начальная фаза тока нагрузки (при <math>M = 1</math>): <math>\varphi = \frac{\pi}{4}</math>.</li> </ul> <p>Выполните моделирование инвертора, используя для формирования импульсов управления три гистерезисных (релейных) элемента, на вход которых поступают сигналы ошибки (отклонения) по току каждой фазы. Сохраните осциллограммы сигналов задания и токов нагрузки, импульсы управления и диаграммы напряжений (для одной фазы), гармонический состав напряжений и токов. Постройте экспериментальные зависимости коэффициента <math>THD</math> и максимального отклонения тока от ширины зоны срабатывания релейного элемента.</p>
--	--

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 80*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется, если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно.*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется, если задание в целом выполнено верно, но есть недочеты, замечания, незначительные ошибки.*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется, если задание выполнено не в полном объеме или имеются существенные ошибки.*

**КМ-3. КР №3 «Вычисление активных и неактивных составляющих тока»**

**Формы реализации:** Компьютерное задание

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 15

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Требуется в течение одной пары выполнить на компьютере задание по моделированию для указанного преподавателем варианта исходных данных. По истечении отведенного времени студент показывает выполненные пункты задания, преподаватель фиксирует объем выполнения работы и соответствие полученных результатов содержанию задания, информирует студента о возможных ошибках, указывает на недочеты и формулирует замечания. После этого студент

в назначенный срок должен оформить и сдать на проверку отчет, подготовленный в соответствии с заданием, затем в течение заранее определенного времени преподаватель проверяет отчет и выставляет оценку.

### Краткое содержание задания:

Для трехфазной сети с нелинейной и несбалансированной нагрузкой требуется вычислить активную и неактивные составляющие токов, используя:

- 1) преобразование координат (посредством синхронных координат  $dq$ );
- 2) теорию мгновенной мощности ( $pq$ -теорию).

Для этого в программе MatLab/Simulink необходимо собрать модель 3-фазной сети с заданной нагрузкой в виде параллельно включенных потребителей трех видов:

симметричный с потреблением реактивной мощности; нелинейный; несимметричный.

Формулировки каждого пункта задания приведены в разделе “Контрольные вопросы на умения”. По результатам выполнения необходимо оформить отчет в виде текстового документа, который должен содержать указанные графики с пояснениями и комментариями, а также выводы (заключения), соответствующие заданиям. При формулировании выводов следует ответить на вопросы, представленные в разделе “Контрольные вопросы на знания”.

### Контрольные вопросы/задания:

<p>Знать: способы анализа электрических процессов в трехфазных системах</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Что такое активная и реактивная составляющие тока?</li> <li>2. Какие высшие гармоники тока являются наиболее значимыми в 3-фазной сети с выпрямительной нагрузкой в случае трехпроводной и четырехпроводной схемы?</li> <li>3. Как вычисляется коэффициент гармонических искажений (<math>THD</math>)?</li> <li>4. Какие гармонические составляющие присутствуют в токе нейтрали?</li> <li>5. Объясните суть метода симметричных составляющих. Как определяются прямая, обратная и нулевая последовательности?</li> <li>6. Какую последовательность представляют собой трехфазные токи 3-й, 5-й, 7-й и 11-й гармоник? Как можно это определить?</li> <li>7. Для чего используется <math>abc/\alpha\beta</math>-преобразование? Какова связь между <math>\alpha\beta</math>- и <math>dq</math>-координатами?</li> <li>8. Как осуществляется <math>abc/dq</math>-преобразование – переход от 3-фазной стационарной системы координат к вращающейся системе координат? Почему <math>dq</math>-координаты называются синхронными и как определить направление осей <math>d</math> и <math>q</math>?</li> <li>9. Каким образом можно применить <math>abc/dq</math>-преобразование для вычисления токов обратной и нулевой последовательностей, а также для определения гармонических составляющих?</li> <li>10. В чем заключается теория мгновенной мощности? Какие составляющие мощности можно выделить, какой они имеют физический смысл?</li> <li>11. Каков алгоритм вычисления неактивной составляющей тока с использованием <math>pq</math>-теории?</li> </ol>
---	--

<p>Уметь: применять математическое описание трехфазных электрических цепей для анализа токов, напряжений и мощностей</p>	<p><b>1. Исследуйте влияние разных видов нагрузок (включены параллельно) на ток, потребляемый из сети:</b>  <math>RL</math> – симметричная активно-индуктивная нагрузка (<math>R = 2 \text{ Ом}; L = 10,7 \text{ мГн}</math>);  <math>Rectifier_{3p}</math> – трехфазный мостовой неуправляемый выпрямитель с емкостным фильтром (<math>1500 \text{ мкФ} / 500 \text{ В}; 5 \text{ Ом}</math>);  <math>R_{unb}</math> – несимметричная резистивная нагрузка (<math>R_A = R_C = 2 \text{ Ом}, R_B = \infty</math>).</p> <p>Параметры сети:  напряжение <math>U = 380 \text{ В}</math>; частота <math>f = 50 \text{ Гц}</math>.  Сохраните осциллограммы фазных напряжений, токов сети, токов каждой нагрузки и тока нейтрали (представьте два периода изменения сигналов).  Сохраните результат разложения фазных токов и тока нейтрали в ряд Фурье (в диапазоне частот до <math>1000 \text{ Гц}</math>). Определите наиболее значимые гармоники и сравните <math>THD</math> токов.</p> <p><b>2. Вычислите составляющие потребляемого тока посредством <math>dq</math>-координат:</b>  <math>RL</math> – симметричная активно-индуктивная нагрузка (<math>R = 2 \text{ Ом}; L = 10,7 \text{ мГн}</math>);  <math>Rectifier_{1p}</math> – три однофазных мостовых неуправляемых выпрямителя с емкостным фильтром (<math>1500 \text{ мкФ} / 150 \text{ В}; 5 \text{ Ом}</math>);  <math>RL_{unb}</math> – несбалансированная активно-индуктивная нагрузка (<math>Z_A = Z_C = 0,5Z_B</math>):  <math>R = 2 \text{ Ом}, L = 11 \text{ мГн} (Z_A = Z_C)</math>;  <math>R = 4 \text{ Ом}, L = 22 \text{ мГн} (Z_B)</math>.</p> <p>Параметры сети:  напряжение <math>U = 380 \text{ В}</math>; частота <math>f = 50 \text{ Гц}</math>.  С использованием синхронных координат (<math>dq</math>) необходимо определить составляющие тока – вычислить активную составляющую и реактивный ток основной гармоники, высшие гармоники тока нагрузки (наиболее значимые), токи обратной и нулевой последовательностей.  Определите направления осей <math>d</math> и <math>q</math>, постройте соответствующую векторную диаграмму напряжения и основной гармоники тока сети, обозначив активную и реактивную составляющие, отметьте угол между векторами и поясните его значение.  Сохраните осциллограммы вычисленных составляющих тока (активной, реактивной, гармоник, обратной и нулевой последовательностей) совместно с их <math>dq</math>-составляющими, а также их сумму. Сравните полученный результат с измеренным током сети, объясните различие.</p> <p><b>3. Вычислите составляющие потребляемого тока посредством <math>pq</math>-теории:</b>  <math>RL</math> – симметричная активно-индуктивная нагрузка</p>
--	--

	<p><math>(R = 2 \text{ Ом}; L = 10,7 \text{ мГн});</math>  <i>Rectifier_1p</i> – три однофазных мостовых  неуправляемых выпрямителя с емкостным фильтром  (1500 мкФ / 150 В; 5 Ом);  <i>R_unb</i> – несимметричная резистивная нагрузка  (<math>R_A = R_C = 0,5R_B; R_B = 2 \text{ Ом}</math>).  Параметры сети:  напряжение <math>U = 380 \text{ В}</math>; частота <math>f = 50 \text{ Гц}</math>.  С использованием теории мгновенной мощности (<i>pq</i>)  реализуйте вычисление активной и реактивной  составляющих тока, основной гармоники и общей  неактивной составляющей тока.  Сохраните осциллограммы мгновенных мощностей и  вычисленных составляющих тока (в  <i>abc</i>-координатах). Сравните результат суммирования  активной и неактивной составляющих с  осциллограммой измеренного тока сети.</p>
--	---

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 80*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется, если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно.

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется, если задание в целом выполнено верно, но есть недочеты, замечания, незначительные ошибки.

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется, если задание выполнено не в полном объеме или имеются существенные ошибки.

**КМ-4. КР №4 «Исследование трехфазного четырехквadrантного регулятора»**

**Формы реализации:** Компьютерное задание

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС: 15**

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Требуется в течение одной пары выполнить на компьютере задание по моделированию для указанного преподавателем варианта исходных данных. По истечении отведенного времени студент показывает выполненные пункты задания, преподаватель фиксирует объем выполнения работы и соответствие полученных результатов содержанию задания, информирует студента о возможных ошибках, указывает на недочеты и формулирует замечания. После этого студент в назначенный срок должен оформить и сдать на проверку отчет, подготовленный в соответствии с заданием, затем в течение заранее определенного времени преподаватель проверяет отчет и выставляет оценку.

**Краткое содержание задания:**

Необходимо выполнить моделирование 3-фазного четырехквadrантного регулятора, реализовав систему управления с обратной связью по току сети. Управляющий сигнал

вычисляется посредством интегрального или пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора по каждой составляющей тока в  $dq$ -координатах.

Формулировки каждого пункта задания приведены в разделе “Контрольные вопросы на умения”. По результатам выполнения необходимо оформить отчет в виде текстового документа, который должен содержать указанные графики с пояснениями и комментариями, а также выводы (заключения), соответствующие заданиям. При формулировании выводов следует ответить на вопросы, представленные в разделе “Контрольные вопросы на знания”.

### Контрольные вопросы/задания:

<p>Знать: принципы функционирования, расчета и выбора основных элементов четырехквadrантных регуляторов и активных выпрямителей</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Приведите формулу для оценки минимального и максимального значения индуктивности дросселей регулятора. Как индуктивность влияет на уровень искажения тока и диапазон регулирования мощности?</li> <li>2. Запишите формулы для вычисления составляющих тока в синхронных координатах (прямого преобразования) и для определения трехфазных сигналов по известным <math>d, q</math>-составляющим (обратного преобразования).</li> <li>3. Как определить связь активной и реактивной составляющих тока сети с его значениями (компонентами) в <math>dq</math>-координатах?</li> <li>4. Как вычисляются сигналы задания напряжения на дросселях и на выходе преобразователя, обеспечивающие требуемые режимы работы регулятора с управлением без обратной связи?</li> <li>5. Какие параметры работы четырехквadrантного регулятора влияют на амплитуду модулирующих сигналов при реализации ШИМ?</li> <li>6. От чего зависит (почему возникает) отклонение амплитуды и фазы тока от требуемых значений при реализации системы управления без обратной связи по току?</li> <li>7. В чем заключается функция пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов при реализации алгоритма управления током на основе синхронных координат?</li> <li>8. Как влияют параметры настройки ПИ-регуляторов (коэффициенты интегрального и пропорционального звеньев) на характер переходного процесса изменения тока?</li> </ol>
<p>Уметь: выполнять расчет и анализ работы, исследовать характеристики силовых электронных регуляторов мощности посредством компьютерного моделирования</p>	<p><b>1. Определите диапазон изменения индуктивности дросселей регулятора.</b> Исходные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- входное напряжение <math>U_{DC} = 760</math> В;</li> <li>- амплитуда тока сети (потребляемого регулятором) <math>I_m = 120</math> А;</li> <li>- угол сдвига (разность фаз) между напряжением и током сети: <math>\varphi = \frac{\pi}{6}</math>;</li> <li>- напряжение и частота сети: <math>U = 380</math> В, <math>f = 50</math> Гц;</li> <li>- требуемый коэффициент искажения тока <math>THD = 5\%</math>;</li> </ul>

- максимальная частота ШИМ: 5 кГц.

**2. Вычислите активную и реактивную составляющие тока посредством  $dq$ -координат (используя формулы для прямого и обратного преобразования координат).**

Исходные данные:

- амплитуда тока сети (потребляемого

регулятором)  $I_m = 60$  А;

- угол сдвига (разность фаз) между напряжением и током сети:  $\varphi = -\frac{\pi}{4}$ .

Определите направления осей  $d$  и  $q$ , постройте векторную диаграмму напряжения и тока сети, обозначив активную, реактивную,  $dq$ -составляющие тока, отметьте угол между векторами.

Сохраните осциллограммы напряжения фазы  $A$ , составляющих тока для фазы  $A$  и их сумму, а также  $dq$ -составляющие тока. Сравните полученный результат с заданным током сети.

**3. Создайте модель регулятора с разомкнутой системой управления.**

Исходные данные:

- входное напряжение  $U_{DC} = 820$  В;

- амплитуда тока сети (потребляемого

регулятором)  $I_m = 50$  А;

- угол сдвига (разность фаз) между напряжением и током сети:  $\varphi = \frac{2\pi}{3}$ .

Для определенного значения индуктивности необходимо вычислить сигнал задания по напряжению на дросселях (в  $dq$ -координатах), а затем получить соответствующий сигнал задания по напряжению преобразователя (в  $abc$ -координатах) и вычислить соответствующий модулирующий сигнал для ШИМ. В случае перемодуляции измените индуктивность дросселей.

Сохраните гармонический состав тока и напряжения преобразователя, осциллограммы напряжений и токов сети,  $dq$ -составляющие напряжения задания на дросселях, напряжение преобразователя (для фазы  $A$ ) и его основную гармонику, выделив ее из импульсного сигнала (представьте не более двух периодов изменения сигналов). Определите отклонение амплитуды и фазы тока от требуемых значений.

**4. Выполните моделирование регулятора с замкнутой системой управления.**

Исходные данные:

- входное напряжение  $U_{DC} = 800$  В;

- амплитуда тока сети (потребляемого

регулятором)  $I_m = 90$  А;

- угол сдвига (разность фаз) между напряжением и током сети:  $\varphi = -\frac{5\pi}{6}$ .



	<p>Реализуйте вычисление управляющих сигналов посредством ПИ-регулятора, подав на его вход сигнал ошибки (отклонения) по току в <math>dq</math>-координатах. Настройте ПИ-регулятор (подберите коэффициенты интегрального и пропорционального звеньев) так, чтобы время регулирования составляло примерно 0,1 с., при этом характер переходного процесса должен быть близок к апериодическому. Сохраните осциллограммы входных и выходных сигналов ПИ-регулятора, токов и напряжений сети. Проверьте точность формируемого тока (амплитуду и фазу). Найдите максимальный ток, который можно сформировать посредством ШИМ (без перемодуляции) при заданных параметрах регулятора.</p>
--	--

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 80*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется, если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно.

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется, если задание в целом выполнено верно, но есть недочеты, замечания, незначительные ошибки.

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется, если задание выполнено не в полном объеме или имеются существенные ошибки.

**КМ-5. КР №5 «Исследование трехфазного активного выпрямителя»**

**Формы реализации:** Компьютерное задание

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 15

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Требуется в течение одной пары выполнить на компьютере задание по моделированию для указанного преподавателем варианта исходных данных. По истечении отведенного времени студент показывает выполненные пункты задания, преподаватель фиксирует объем выполнения работы и соответствие полученных результатов содержанию задания, информирует студента о возможных ошибках, указывает на недочеты и формулирует замечания. После этого студент в назначенный срок должен оформить и сдать на проверку отчет, подготовленный в соответствии с заданием, затем в течение заранее определенного времени преподаватель проверяет отчет и выставляет оценку.

**Краткое содержание задания:**

Необходимо выполнить моделирование 3-фазного активного выпрямителя, реализовав систему управления с обратной связью по напряжению на нагрузке.

Формулировки каждого пункта задания приведены в разделе "Контрольные вопросы на умения". По результатам выполнения необходимо оформить отчет в виде текстового документа, который должен содержать указанные графики с пояснениями и

комментариями, а также выводы (заключения), соответствующие заданиям. При формулировании выводов следует ответить на вопросы, представленные в разделе “Контрольные вопросы на знания”.

### Контрольные вопросы/задания:

<p>Знать: принципы функционирования, расчета и выбора основных элементов четырехквadrантных регуляторов и активных выпрямителей</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Приведите формулу для определения тока, потребляемого трехфазным активным выпрямителем с известными параметрами нагрузки.</li> <li>2. До какого значения напряжения зарядится конденсатор, включенный на стороне постоянного тока трехфазного преобразователя, работающего в режиме неуправляемого выпрямителя?</li> <li>3. Какие значения амплитуды и фазы должно иметь напряжение преобразователя (относительно напряжения сети), чтобы обеспечить его работу в выпрямительном режиме с коэффициентом мощности близким к единице?</li> <li>4. Каким образом в системе управления активного выпрямителя формируется <math>q</math>-составляющая сигнала задания напряжения на дросселях? Почему именно эту составляющую требуется контролировать?</li> <li>5. В каком случае необходимо регулировать обе составляющие напряжения на дросселях при построении алгоритма управления на основе <math>dq</math>-координат?</li> <li>6. Поясните принцип вычисления сигнала задания тока активного выпрямителя с гистерезисным управлением.</li> </ol>
<p>Уметь: выполнять расчет и анализ работы, исследовать характеристики силовых электронных регуляторов мощности посредством компьютерного моделирования</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Оцените (рассчитайте) индуктивность дросселей активного выпрямителя.</b> Исходные данные:  <ul style="list-style-type: none"> <li>- параметры нагрузки (выходное напряжение и сопротивление): <math>U_{DC} = 725</math> В, <math>R_H = 29</math> Ом;</li> <li>- емкость фильтрующего конденсатора (включен параллельно нагрузке) <math>C = 7,5</math> мФ;</li> <li>- напряжение и частота сети: <math>U = 380</math> В, <math>f = 50</math> Гц;</li> <li>- требуемый коэффициент искажения тока <math>THD = 5\%</math>;</li> <li>- максимальная частота ШИМ: 5 кГц.</li> </ul> </li> <li>2. <b>Выполните моделирование процесса начального заряда выходного конденсатора.</b> Исходные данные:  <ul style="list-style-type: none"> <li>- параметры нагрузки (выходное напряжение и сопротивление): <math>U_{DC} = 700</math> В, <math>R_H = 10</math> Ом;</li> <li>- емкость фильтрующего конденсатора (включен параллельно нагрузке) <math>C = 7</math> мФ.</li> </ul>           На первом этапе необходимо реализовать режим неуправляемого выпрямителя при отсутствии нагрузки, а затем осуществить регулирование выходного напряжения (при холостом ходе) за счет обратной связи по напряжению, т.е. вычислить сигнал задания напряжения на дросселях посредством пропорционально-интегрального (ПИ)         </li> </ol>

	<p>закон регулирования (определить его амплитуду и фазу, а также <math>q</math>-составляющую сигнала в синхронных координатах).</p> <p>Сохраните осциллограммы входных и выходных сигналов ПИ-регулятора, токов и напряжений сети, а также напряжения на конденсаторе, тока конденсатора и его постоянной составляющей. Определите сдвиг фаз между током и напряжением сети.</p> <p><b>3. Выполните моделирование активного выпрямителя в номинальном режиме работы.</b></p> <p>Исходные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- параметры нагрузки (выходное напряжение и сопротивление): <math>U_{DC} = 630</math> В, <math>R_H = 14</math> Ом;</li> <li>- емкость фильтрующего конденсатора <math>C = 7</math> мФ.</li> </ul> <p>Необходимо установить начальное значение напряжения на конденсаторе (максимальное) и реализовать регулирование напряжения на нагрузке, потребляемые выпрямителем токи должны совпадать по фазе с напряжениями сети, время регулирования должно составлять примерно 0,2 с., при этом характер переходного процесса должен быть близок к апериодическому.</p> <p>Сохраните осциллограммы входных и выходных сигналов ПИ-регуляторов в каналах регулирования <math>d</math>- и <math>q</math>-составляющей напряжения, токов и напряжений сети, а также напряжения на конденсаторе, тока конденсатора и его постоянной составляющей. Определите сдвиг фаз между током и напряжением сети.</p> <p>Сохраните напряжение преобразователя (для фазы <math>A</math>) и его основную гармонику (выделить из импульсного сигнала). Сохраните гармонический состав тока.</p> <p><b>4. Исследуйте активный выпрямитель с гистерезисным управлением.</b></p> <p>Исходные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- параметры нагрузки (выходное напряжение и сопротивление): <math>U_{DC} = 680</math> В, <math>R_H = 34</math> Ом;</li> <li>- емкость фильтрующего конденсатора <math>C = 9</math> мФ;</li> <li>- требуемый коэффициент искажения тока <math>THD = 5\%</math>.</li> </ul> <p>Вычислите амплитуду активной составляющей тока задания посредством ПИ-регулятора по отклонению напряжения на нагрузке. Настройте релейный элемент, обеспечив заданное значение <math>THD</math>.</p> <p>Сохраните осциллограммы токов задания, токов и напряжений сети, а также гармонический состав тока.</p>
--	---

**Описание шкалы оценивания:**

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 80

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется, если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно.

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется, если задание в целом выполнено верно, но есть недочеты, замечания, незначительные ошибки.

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется, если задание выполнено не в полном объеме или имеются существенные ошибки.

### **КМ-6. КР №6 «Моделирование силового электронного устройства повышения качества электроэнергии»**

**Формы реализации:** Компьютерное задание

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС: 25**

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Требуется в течение одной пары выполнить на компьютере задание по моделированию для указанного преподавателем варианта исходных данных. По истечении отведенного времени студент показывает выполненные пункты задания, преподаватель фиксирует объем выполнения работы и соответствие полученных результатов содержанию задания, информирует студента о возможных ошибках, указывает на недочеты и формулирует замечания. После этого студент в назначенный срок должен оформить и сдать на проверку отчет, подготовленный в соответствии с заданием, затем в течение заранее определенного времени преподаватель проверяет отчет и выставляет оценку.

#### **Краткое содержание задания:**

Требуется собрать в программе MatLab/Simulink и отладить модель силового электронного устройства на базе 3-фазного мостового преобразователя напряжения, которое посредством компенсации неактивной мощности, потребляемой нагрузкой, обеспечивает повышение коэффициента мощности сети. Регулятор выполняет несколько функций повышения качества электроэнергии (указаны в исходных данных): компенсацию реактивной мощности, симметрирование токов, активную фильтрацию наиболее значимых гармоник. Система управления устройства обеспечивает регулирование мощности за счет обратной связи по току.

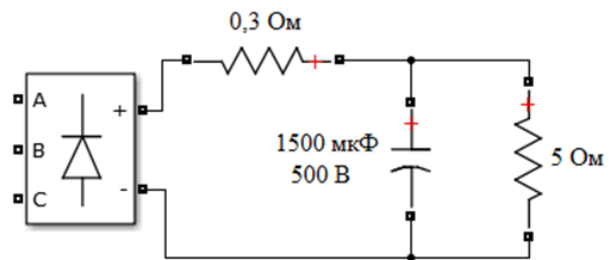
Формулировки каждого пункта задания приведены в разделе "Контрольные вопросы на умения". По результатам выполнения необходимо оформить отчет в виде текстового документа, который должен содержать указанные графики с пояснениями и комментариями, а также выводы (заключения), соответствующие заданиям. При формулировании выводов следует ответить на вопросы, представленные в разделе "Контрольные вопросы на знания".

#### **Контрольные вопросы/задания:**

Знать: схмотехнические решения и принципы построения алгоритмов управления устройств повышения качества электроэнергии	1.Поясните понятие «неактивная мощность». Какие составляющие мощности рассматривают при анализе трехфазных систем электроснабжения, как они вычисляются и какова связь между ними? 2.Что называют коэффициентом мощности? Какое влияние на его значение оказывают разные виды потребителей? 3.Сформулируйте основную причину увеличения тока нейтрали в четырехпроводных сетях? К каким последствиям может привести высокий уровень тока
--	--

	<p>нейтрали?</p> <p>4.Перечислите основные параметры (показатели) качества электроэнергии. Назовите причины их нарушения и связанные с этим негативные последствия.</p> <p>5.Какие существуют традиционные способы (средства) компенсации реактивной мощности и регулирования (стабилизации) напряжения? Каковы особенности их применения?</p> <p>6.Объясните принцип действия силового электронного регулятора качества электроэнергии. Какие составляющие тока необходимо сформировать на выходе устройства в зависимости от вида нагрузки, подключенной к трехфазной сети?</p> <p>7.Какие способы вычисления неактивных составляющих тока используются при реализации алгоритмов управления силовым электронным устройством повышения качества электроэнергии, в каких случаях рациональнее применять тот или иной подход (алгоритм)?</p> <p>8.Приведите структуру алгоритма работы системы управления многофункционального регулятора качества электроэнергии на основе преобразователя с ШИМ-управлением.</p> <p>9.Каково назначение блока синхронизации при реализации алгоритма управления устройством повышения качества электроэнергии? Каков принцип синхронизации с использованием <math>dq</math>-координат?</p> <p>10.Как теоретически вычислить напряжение преобразователя, требуемое для обеспечения функций повышения качества электроэнергии? Поясните принцип определения сигнала задания напряжения при реализации алгоритма управления устройством.</p> <p>11.Как происходит формирование модулирующих сигналов для реализации ШИМ-управления? Какие при этом существуют ограничения?</p> <p>12.Поясните принцип реализации релейной модуляции и приведите структуру алгоритма работы системы управления многофункционального регулятора на основе преобразователя с гистерезисным управлением. Как в этом алгоритме осуществить регулирование напряжения на конденсаторе, включенном на стороне постоянного тока преобразователя?</p>
<p>Уметь: создавать и отлаживать компьютерные модели силовых электронных аппаратов с использованием программы для имитационного моделирования</p>	<p><b>1.Исследуйте влияние нагрузки, состоящей из двух параллельно включенных потребителей, на качество токов трехфазной сети.</b></p> <p>Параметры сети: тип – трехпроводная; напряжение <math>U = 380</math> В; частота <math>f = 50</math> Гц.</p> <p>Параметры нагрузки:  <math>RL</math> – симметричная активно-индуктивная нагрузка</p>

( $R = 2 \text{ Ом}; L = 10,7 \text{ мГн}$ );  
*Rectifier\_3p* – трехфазный мостовой выпрямитель



Параметры регулятора качества электроэнергии:

- напряжение входного источника преобразователя  $U_{DC} = 760 \text{ В}$ ;
- функции:  $Q$  – компенсация реактивной мощности,  $AF-5$  – активная фильтрация 5-й гармоники тока.

**Проанализируйте гармонический состав фазных токов:**

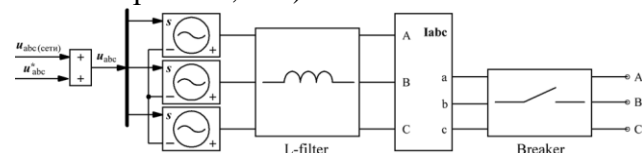
- получите осциллограммы фазных напряжений сети и потребляемых токов (представьте два периода изменения сигналов);
- сохраните результат разложения токов в ряд Фурье (в диапазоне частот до 1000 Гц).

**С использованием синхронных координат ( $dq$ ) вычислите неактивную составляющую тока нагрузки – ток задания регулятора:**

- приведите необходимые формулы для прямого и обратного преобразования координат;
- сохраните осциллограммы тока задания и его составляющих (реактивной и гармонической) в виде  $dq$ - и  $abc$ -сигналов;
- определите направления осей  $d$  и  $q$ , постройте соответствующую векторную диаграмму напряжения и основной гармоники тока сети.

**2. Реализуйте Simulink-модель регулятора с управляемыми источниками.**

Упрощенная модель регулятора (момент включения контактора  $t = 0,02 \text{ с}$ ):



Параметры сети: тип – трехпроводная; напряжение  $U = 380 \text{ В}$ ; частота  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Параметры нагрузки:

$RL$  – симметричная активно-индуктивная нагрузка ( $R = 2 \text{ Ом}; L = 10,7 \text{ мГн}$ );

$R_{unb}$  – несимметричная резистивная нагрузка ( $R_A = R_C = 0,5R_B; R_B = 2 \text{ Ом}$ ).

Параметры регулятора:

- напряжение входного источника преобразователя  $U_{DC} = 820 \text{ В}$ ;
- функции:  $Q$  – компенсация реактивной мощности,

$S$  – симметрирование токов.

**Определите предварительное значение индуктивности дросселей регулятора:**

$$L = \frac{(U_{\text{пр},m} - U_{\text{с},m})}{2\pi f \cdot I_m},$$

где  $I_m, f$  – амплитуда и частота наиболее значимой гармоники тока задания;

$U_{\text{пр},m} = 0,5 \cdot U_{\text{DC}}$  – максимальная амплитуда фазного напряжения преобразователя;

$U_{\text{с},m}$  – амплитуда фазного напряжения сети.

**Рассчитайте напряжение задания  $u^*(abc)$  как сумму требуемых составляющих напряжения, вычислив каждую в  $dq$ -координатах:**

$$u_d = -i_q \cdot 2\pi f \cdot L, \quad u_q = i_d \cdot 2\pi f \cdot L,$$

где  $f$  – частота соответствующей составляющей тока задания;  $i_d, i_q$  –  $dq$ -составляющие тока задания.

Если максимальная амплитуда полученных напряжений  $u(abc)$  превышает  $0,5U_{\text{DC}}$ , то следует уменьшить индуктивность дросселей.

Сохраните осциллограммы напряжений источников, а также токов нагрузки, регулятора и сети.

**3. Выполните моделирование регулятора, реализовав систему управления и используя ШИМ-преобразователь.**

Параметры сети: тип – четырехпроводная; напряжение  $U = 380$  В; частота  $f = 50$  Гц.

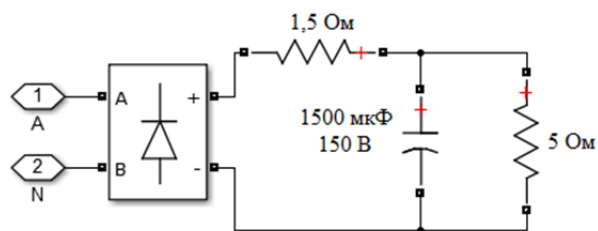
Параметры нагрузки:

$RL\_unb$  – несбалансированная активно-индуктивная нагрузка ( $Z_A = Z_C = 0,5Z_B$ ):

$$R = 2 \text{ Ом}, L = 11 \text{ мГн} (Z_A = Z_C);$$

$$R = 4 \text{ Ом}, L = 22 \text{ мГн} (Z_B).$$

$Rectifier\_1p$  – три однофазных мостовых выпрямителя



Параметры регулятора качества электроэнергии:

- напряжение входного источника преобразователя  $U_{\text{DC}} = 740$  В;
- функции:  $AF-3$  – активная фильтрация 3-й гармоники тока,

$S$  – симметрирование токов.

**Вычислите напряжение задания посредством интегральных регуляторов, подав на них сигналы отклонения тока в  $dq$ -координатах:**

$$\Delta i_{dq} = i_{dq} - i_{dq,\text{изм}},$$

где  $i_{dq}$  – ток задания в  $dq$ -координатах;

$i_{dq,\text{изм}}$  – измеряемый ток в  $dq$ -координатах;

	<p>расчет необходимо выполнить для каждой требуемой составляющей тока, при этом по результату интегрирования <math>\Delta i_d</math> определяется <math>u_q</math>, а по <math>\Delta i_q</math> находится составляющая <math>-u_d</math>.</p> <p>Настройте интегральные регуляторы с целью получения апериодического переходного процесса длительностью не больше 0,1 с.</p> <p>Сохраните осциллограммы входных и выходных сигналов интегральных регуляторов, а также токов дросселей.</p> <p><b>Реализуйте Simulink-модель регулятора с ШИМ-преобразователем:</b></p> <p>Выберите частоту модуляции и сформируйте модулирующий сигнал для ШИМ-модуля:</p> $u_M = \frac{u_{abc}}{0,5 \cdot U_{DC}},$ <p>где <math>u_{abc}</math> – суммарный трехфазный сигнал требуемого напряжения преобразователя.</p> <p>Сохраните осциллограммы выходных сигналов интегральных регуляторов и модулирующего сигнала.</p> <p>Сохраните осциллограммы токов нагрузки, регулятора, сети и токов нейтрали сети и нагрузки, а также гармонический состав токов регулятора и сети.</p> <p>В случае высокого содержания модуляционных гармоник в токах регулятора следует изменить частоту ШИМ и/или скорректировать значение индуктивности дросселей.</p>
--	--

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 80*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется, если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно.*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется, если задание в целом выполнено верно, но есть недочеты, замечания, незначительные ошибки.*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется, если задание выполнено не в полном объеме или имеются существенные ошибки.*



# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

## 3 семестр

**Форма промежуточной аттестации:** Зачет с оценкой

### Пример билета

#### 1. Теоретический вопрос.

Методы синусоидальной и векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в трехфазном мостовом преобразователе.

#### 2. Практическое задание.

В программе MatLab/Simulink выполните моделирование трехфазного четырехквadrантного регулятора с разомкнутой системой управления на основе  $dq$ -координат.

Исходные данные:

- амплитуда тока, потребляемого из сети:  $I_m = 100$  А;
- разность фаз между напряжением и током сети:  $\varphi = \frac{\pi}{4}$ ;
- напряжение и частота сети:  $U = 380$  В,  $f = 50$  Гц.

Необходимо:

- оценить индуктивность дросселей и входное напряжение преобразователя, выбрать частоту ШИМ;
- вычислить активную и реактивную составляющие тока, используя прямое и обратное преобразования координат;
- вычислить напряжение на дросселях (в  $dq$ -координатах), напряжение преобразователя (в  $abc$ -координатах) и получить модулирующий сигнал;
- продемонстрировать осциллограммы полученных сигналов и гармонический состав тока.

### Процедура проведения

Для сдачи зачета необходимо дать ответ на теоретический вопрос и выполнить практическое задание. На подготовку дается не менее 60 минут. Студент должен изложить свой ответ на вопрос билета, продемонстрировать результат выполнения практического задания, дав необходимые комментарии, пояснения и характеристику полученных результатов.

### *1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины*

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-4<sub>ПК-1</sub> Применяет современные средства математического моделирования электрических и электронных аппаратов, а также средства управления качеством на стадии проектирования, производства и эксплуатации электрических и электронных аппаратов

### Вопросы, задания

1. Четырехквadrантный регулятор и активный выпрямитель.
2. Принцип реализации алгоритма синхронизации с использованием  $dq$ -координат.
3. Компенсация неактивной мощности сети посредством многофункционального силового электронного регулятора.
4. Обобщенная структурная схема алгоритма управления регулятором качества электроэнергии.
5. Алгоритм вычисления тока регулятора качества электроэнергии на основе синхронных координат.

6. Алгоритм вычисления тока регулятора качества электроэнергии на основе теории мгновенной мощности.

### Материалы для проверки остаточных знаний

**1. Какие мощности, рассматриваемые при анализе трехфазных систем электроснабжения, являются «неактивными»?**

Ответы:

- 1) реактивная мощность основной гармоники;
- 2) реактивная, мощности искажения и несимметрии;
- 3) полная мощность;
- 4) мощности искажения и несимметрии.

Верный ответ: 2) реактивная, мощности искажения и несимметрии

**2. Выберите соотношение, соответствующее определению коэффициента мощности в системах электроснабжения с нелинейными потребителями**

**( $P$  - активная мощность;  $Q$  - реактивная мощность;  $D$  - мощность искажения;  $S$  - полная мощность):**

Ответы:

- 1)  $\chi = \frac{Q}{P}$ ;
- 2)  $\chi = \frac{P}{D}$ ;
- 3)  $\chi = \frac{Q}{S}$ ;
- 4)  $\chi = \frac{P}{S}$ .

Верный ответ: 4)

**3. Какую минимальную частоту модуляции должен иметь преобразователь в составе активного фильтра, подключенного к сети с частотой 50 Гц, который обеспечивает фильтрацию 11-й гармоники?**

Ответы:

- 1) 0,05 кГц;
- 2) 0,5 кГц;
- 3) 1 кГц;
- 4) 5 кГц.

Верный ответ: 2) 0,5 кГц

**4. Для реализации функции компенсации реактивной мощности посредством силового электронного регулятора с управлением на основе теории мгновенной мощности необходимо вычислять:**

Ответы:

- 1) действительную составляющую мгновенной мощности;
- 2) мнимую мгновенную мощность;
- 3) переменную составляющую мгновенной мощности;
- 4) постоянную составляющую мнимой мгновенной мощности.

Верный ответ: 4) постоянную составляющую мнимой мгновенной мощности

**5. С целью снижения тока нейтрали при несимметричной нагрузке посредством силового электронного регулятора для вычисления токов задания используется:**

Ответы:

- 1)  $abc/dq$ -преобразование для прямой последовательности;
- 2)  $abc/dq$ -преобразование для обратной последовательности;
- 3)  $abc/dq$ -преобразование для нулевой последовательности;
- 4)  $abc/dq$ -преобразование на частоте 3-й гармоники.

Верный ответ: 3)  $abc/dq$ -преобразование для нулевой последовательности

**6. В чем заключается функция пропорционально-интегральных регуляторов в алгоритме управления статическим компенсатором реактивной мощности на основе синхронных координат?**

Ответы:

- 1) вычисление управляющих напряжений;
- 2) вычисление тока задания;
- 3) вычисление требуемой реактивной мощности;

4) вычисление ошибки по току компенсатора.

Верный ответ: 1) вычисление управляющих напряжений

**2. Компетенция/Индикатор:** ИД-2ПК-3 Применяет современный набор инструментов управления качеством электрических и электронных аппаратов, включая статистические методы

### Вопросы, задания

1. Методы синусоидальной и векторной широтно-импульсной модуляции в трехфазном мостовом преобразователе.

2. Преобразование трехфазной системы в двухфазную с неподвижными осями  $\alpha$  и  $\beta$ .

3. Преобразование трехфазной системы в двухфазную вращающуюся синхронную систему  $dq$ -координат.

4. Преобразование мгновенной мощности трехфазной системы в мощность двухфазной системы ( $pq$ -теория).

### Материалы для проверки остаточных знаний

**1. Характерным отличием широтно-импульсной модуляции (ШИМ) от метода 180-градусной коммутации при управлении трехфазными транзисторными преобразователями является:**

Ответы:

1) высокая частота коммутации полупроводниковых ключей;

2) возможность регулирования выходного напряжения (тока);

3) формирование синусоидального напряжения (тока);

4) постоянная частота коммутации полупроводниковых ключей.

Верный ответ: 1) высокая частота коммутации полупроводниковых ключей

**2. Коэффициент модуляции при ШИМ-управлении определяется как:**

Ответы:

1) отношение амплитуды модулирующего сигнала к амплитуде несущего сигнала;

2) отношение амплитуды несущего сигнала к амплитуде модулирующего сигнала;

3) отношение частоты несущего сигнала к частоте модулирующего сигнала;

4) отношение частоты модулирующего сигнала к частоте несущего сигнала.

Верный ответ: 1) отношение амплитуды модулирующего сигнала к амплитуде несущего сигнала

**3. Чему равно отношение амплитуды основной гармоники фазного напряжения на выходе трехфазного мостового инвертора к входному напряжению при векторной ШИМ с единичным коэффициентом модуляции?**

Ответы:

1) 0,5;

2) 1;

3) 1,15;

4) 0,58.

Верный ответ: 3) 1,15

**4. Амплитудные значения синусоидальных сигналов в  $abc$ - и  $\alpha\beta$ -координатах будут одинаковыми, если в формулах прямого преобразования значение коэффициента равно:**

Ответы:

1)  $\frac{2}{3}$ ; 2)  $\frac{1}{3}$ ; 3) 1; 4)  $\sqrt{\frac{2}{3}}$ .

Верный ответ: 4)

## ***II. Описание шкалы оценивания***

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 80*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно, четко сформулированы ответы на дополнительные и уточняющие вопросы.

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно, задание в целом выполнено верно, но есть недочеты, замечания, незначительные ошибки.

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Задание выполнено не в полном объеме или имеются существенные ошибки и выявлены недостатки в теоретической подготовке.

## ***III. Правила выставления итоговой оценки по курсу***

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и аттестационной составляющих.