

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Математическое моделирование режимов электроэнергетических систем

**Код модуля**  
1157017

**Модуль**  
Моделирование и оптимизация в  
электроэнергетических системах

**Екатеринбург**

Оценочные материалы составлены автором(ами):

<b>№ п/п</b>	<b>Фамилия, имя, отчество</b>	<b>Ученая степень, ученое звание</b>	<b>Должность</b>	<b>Подразделение</b>
1	Чусовитин Павел Валерьевич	кандидат технических наук, без ученого звания	Доцент	автоматизированных электрических систем

**Согласовано:**

Управление образовательных программ

Р.Х. Токарева

**Авторы:**

- Чусовитин Павел Валерьевич, Доцент, автоматизированных электрических систем

### 1. СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ Математическое моделирование режимов электроэнергетических систем

1.	Объем дисциплины в зачетных единицах	3	
2.	Виды аудиторных занятий	Лекции Лабораторные занятия	
3.	Промежуточная аттестация	Зачет	
4.	Текущая аттестация	Расчетная работа	1
		Отчет по лабораторным работам	1

### 2. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ИНДИКАТОРЫ) ПО ДИСЦИПЛИНЕ МОДУЛЯ Математическое моделирование режимов электроэнергетических систем

Индикатор – это признак / сигнал/ маркер, который показывает, на каком уровне обучающийся должен освоить результаты обучения и их предъявление должно подтвердить факт освоения предметного содержания данной дисциплины, указанного в табл. 1.3 РПМ-РПД.

Таблица 1

Код и наименование компетенции	Планируемые результаты обучения (индикаторы)	Контрольно-оценочные средства для оценивания достижения результата обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-2 -Способен самостоятельно ставить, формализовывать и решать задачи, относящиеся к профессиональной деятельности, используя методы моделирования и математического анализа	Д-1 - Проявлять ответственность и настойчивость в достижении цели З-1 - Сделать обзор основных методов моделирования и математического анализа, применимых для формализации и решения задач профессиональной деятельности З-2 - Характеризовать сферы применения и возможности пакетов прикладных программ для решения задач профессиональной деятельности	Зачет Лекции Расчетная работа

	<p>П-1 - Решать самостоятельно сформулированные практические задачи, относящиеся к профессиональной деятельности методами моделирования и математического анализа, в том числе с использованием пакетов прикладных программ</p> <p>У-1 - Самостоятельно сформулировать задачу области профессиональной деятельности, решение которой требует использования методов моделирования и математического анализа</p> <p>У-2 - Использовать методы моделирования и математического анализа, в том числе с использованием пакетов прикладных программ для решения задач профессиональной деятельности</p>	
<p>ПК-1 -Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки</p>	<p>З-16 - Характеризовать методы алгоритмизации расчета электромеханических и электромагнитных переходных процессов в многомашинных энергосистемах</p> <p>З-17 - Описывать модели, используемые для расчётов электромеханических переходных процессов в многомашинных энергосистемах</p> <p>З-18 - Объяснять особенности и скорости протекания переходных процессов в энергосистемах</p> <p>П-8 - Создавать динамические модели электротехнических устройств в специализированных программных комплексах</p> <p>У-10 - Рассчитывать электромагнитные переходные процессы в математических программных пакетах</p>	<p>Зачет Лекции Расчетная работа</p>

	<p>У-8 - Анализировать переходные процессы в многомашинных энергосистемах</p> <p>У-9 - Выбирать степень детализации моделей основного оборудования энергосистем в зависимости от решаемой задачи</p>	
<p>ПК-2 -Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы</p>	<p>З-19 - Характеризовать методы алгоритмизации расчета электромеханических и электромагнитных переходных процессов в многомашинных энергосистемах</p> <p>З-20 - Описывать модели, используемые для расчётов электромеханических переходных процессов в многомашинных энергосистемах</p> <p>З-21 - Объяснять особенности и скорости протекания переходных процессов в энергосистемах</p> <p>П-10 - Создавать динамические модели электротехнических устройств в специализированных программных комплексах</p> <p>У-10 - Анализировать переходные процессы в многомашинных энергосистемах</p> <p>У-11 - Выбирать степень детализации моделей основного оборудования энергосистем в зависимости от решаемой задачи</p> <p>У-12 - Рассчитывать электромагнитные переходные процессы в математических программных пакетах</p>	<p>Зачет</p> <p>Лабораторные занятия</p> <p>Отчет по лабораторным работам</p>
<p>ПК-3 -Способен создавать и анализировать модели электроэнергетических систем и их элементов с целью</p>	<p>З-25 - Характеризовать методы алгоритмизации расчета электромеханических и электромагнитных переходных процессов в многомашинных энергосистемах</p>	<p>Зачет</p> <p>Лабораторные занятия</p> <p>Отчет по лабораторным работам</p> <p>Расчетная работа</p>

<p>анализа их свойств и прогноза состояния</p>	<p>З-26 - Описывать модели, используемые для расчётов электромеханических переходных процессов в многомашинных энергосистемах  З-27 - Объяснять особенности и скорости протекания переходных процессов в энергосистемах  П-14 - Создавать динамические модели электротехнических устройств в специализированных программных комплексах  У-13 - Анализировать переходные процессы в многомашинных энергосистемах  У-14 - Выбирать степень детализации моделей основного оборудования энергосистем в зависимости от решаемой задачи  У-15 - Рассчитывать электромагнитные переходные процессы в математических программных пакетах</p>	
<p>ПК-5 -Способен применять методы и средства автоматизированных систем управления электроэнергетической системой, определять эффективные режимы её работы</p>	<p>З-25 - Характеризовать методы алгоритмизации расчета электромеханических и электромагнитных переходных процессов в многомашинных энергосистемах  З-26 - Описывать модели, используемые для расчётов электромеханических переходных процессов в многомашинных энергосистемах  З-27 - Объяснять особенности и скорости протекания переходных процессов в энергосистемах  П-14 - Создавать динамические модели электротехнических устройств в специализированных программных комплексах  У-13 - Анализировать переходные процессы в</p>	<p>Зачет  Отчет по лабораторным работам  Расчетная работа</p>

	<p>многомашинных энергосистемах</p> <p>У-14 - Выбирать степень детализации моделей основного оборудования энергосистем в зависимости от решаемой задачи</p> <p>У-15 - Рассчитывать электромагнитные переходные процессы в математических программных пакетах</p>	
--	--	--

### 3. ПРОЦЕДУРЫ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ В РАМКАХ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ МОДУЛЯ В БАЛЬНО-РЕЙТИНГОВОЙ СИСТЕМЕ (ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА БРС)

#### 3.1. Процедуры текущей и промежуточной аттестации по дисциплине

<b>1. Лекции: коэффициент значимости совокупных результатов лекционных занятий – 0.75</b>		
<b>Текущая аттестация на лекциях</b>	<b>Сроки – семестр, учебная неделя</b>	<b>Максимальная оценка в баллах</b>
<i>расчетная работа</i>	16	100
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по лекциям – 0.60</b>		
<b>Промежуточная аттестация по лекциям – зачет</b>		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по лекциям – 0.40</b>		
<b>2. Практические/семинарские занятия: коэффициент значимости совокупных результатов практических/семинарских занятий – не предусмотрено</b>		
<b>Текущая аттестация на практических/семинарских занятиях</b>	<b>Сроки – семестр, учебная неделя</b>	<b>Максимальная оценка в баллах</b>
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по практическим/семинарским занятиям – не предусмотрено</b>		
<b>Промежуточная аттестация по практическим/семинарским занятиям – нет</b>		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по практическим/семинарским занятиям – не предусмотрено</b>		
<b>3. Лабораторные занятия: коэффициент значимости совокупных результатов лабораторных занятий – 0.25</b>		
<b>Текущая аттестация на лабораторных занятиях</b>	<b>Сроки – семестр, учебная неделя</b>	<b>Максимальная оценка в баллах</b>
<i>ЛР№3</i>	16	30
<i>ЛР№2</i>	16	25

ЛР№1	16	45
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по лабораторным занятиям -1.00</b>		
<b>Промежуточная аттестация по лабораторным занятиям –нет</b>		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по лабораторным занятиям – 0.00</b>		
<b>4. Онлайн-занятия: коэффициент значимости совокупных результатов онлайн-занятий –не предусмотрено</b>		
<b>Текущая аттестация на онлайн-занятиях</b>	<b>Сроки – семестр, учебная неделя</b>	<b>Максимальная оценка в баллах</b>
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по онлайн-занятиям -не предусмотрено</b>		
<b>Промежуточная аттестация по онлайн-занятиям –нет</b>		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по онлайн-занятиям – не предусмотрено</b>		

### 3.2. Процедуры текущей и промежуточной аттестации курсовой работы/проекта

<b>Текущая аттестация выполнения курсовой работы/проекта</b>	<b>Сроки – семестр, учебная неделя</b>	<b>Максимальная оценка в баллах</b>
<b>Весовой коэффициент текущей аттестации выполнения курсовой работы/проекта– не предусмотрено</b>		
<b>Весовой коэффициент промежуточной аттестации выполнения курсовой работы/проекта– защиты – не предусмотрено</b>		

## 4. КРИТЕРИИ И УРОВНИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ МОДУЛЯ

4.1. В рамках БРС применяются утвержденные на кафедре/институте критерии (признаки) оценивания достижений студентов по дисциплине модуля (табл. 4) в рамках контрольно-оценочных мероприятий на соответствие указанным в табл.1 результатам обучения (индикаторам).

Таблица 4

### Критерии оценивания учебных достижений обучающихся

<b>Результаты обучения</b>	<b>Критерии оценивания учебных достижений, обучающихся на соответствие результатам обучения/индикаторам</b>
Знания	Студент демонстрирует знания и понимание в области изучения на уровне указанных индикаторов и необходимые для продолжения обучения и/или выполнения трудовых функций и действий, связанных с профессиональной деятельностью.
Умения	Студент может применять свои знания и понимание в контекстах, представленных в оценочных заданиях, демонстрирует освоение умений на уровне указанных индикаторов и необходимых для продолжения обучения и/или выполнения трудовых функций и действий, связанных с профессиональной деятельностью.
Опыт /владение	Студент демонстрирует опыт в области изучения на уровне указанных индикаторов.



Другие результаты	<p>Студент демонстрирует ответственность в освоении результатов обучения на уровне запланированных индикаторов.</p> <p>Студент способен выносить суждения, делать оценки и формулировать выводы в области изучения.</p> <p>Студент может сообщать преподавателю и коллегам своего уровня собственное понимание и умения в области изучения.</p>
-------------------	---

4.2 Для оценивания уровня выполнения критериев (уровня достижений обучающихся при проведении контрольно-оценочных мероприятий по дисциплине модуля) используется универсальная шкала (табл. 5).

Таблица 5

### Шкала оценивания достижения результатов обучения (индикаторов) по уровням

Характеристика уровней достижения результатов обучения (индикаторов)				
№ п/п	Содержание уровня выполнения критерия оценивания результатов обучения (выполненное оценочное задание)	Шкала оценивания		
		Традиционная характеристика уровня		Качественная характеристика уровня
1.	Результаты обучения (индикаторы) достигнуты в полном объеме, замечаний нет	Отлично (80-100 баллов)	Зачтено	Высокий (В)
2.	Результаты обучения (индикаторы) в целом достигнуты, имеются замечания, которые не требуют обязательного устранения	Хорошо (60-79 баллов)		Средний (С)
3.	Результаты обучения (индикаторы) достигнуты не в полной мере, есть замечания	Удовлетворительно (40-59 баллов)		Пороговый (П)
4.	Освоение результатов обучения не соответствует индикаторам, имеются существенные ошибки и замечания, требуется доработка	Неудовлетворительно (менее 40 баллов)	Не зачтено	Недостаточный (Н)
5.	Результат обучения не достигнут, задание не выполнено	Недостаточно свидетельств для оценивания		Нет результата

## 5. СОДЕРЖАНИЕ КОНТРОЛЬНО-ОЦЕНОЧНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ МОДУЛЯ

### 5.1. Описание аудиторных контрольно-оценочных мероприятий по дисциплине модуля

#### 5.1.1. Лекции

Самостоятельное изучение теоретического материала по темам/разделам лекций в соответствии с содержанием дисциплины (п. 1.2. РПД)

### 5.1.2. Лабораторные занятия

Примерный перечень тем

1. Создание модели генератора в виде уравнения движения и интеграция её в сеть
  2. Добавление в имеющуюся модель турбины, регулятора скорости и АРВ
  3. Создание модели многомашинной электроэнергетической системы
- LMS-платформа – не предусмотрена

### 5.2. Описание внеаудиторных контрольно-оценочных мероприятий и средств текущего контроля по дисциплине модуля

Разноуровневое (дифференцированное) обучение.

#### Базовый

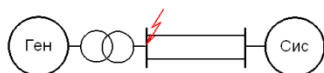
##### 5.2.1. Расчетная работа

Примерный перечень тем

1. Создание одномашинной модели генератора с турбиной, АРС, АРВ, моделирование переходных процессов в ней
2. Создание модели многомашинной электроэнергетической системы, моделирование переходных процессов в ней

Примерные задания

Задание 1. Расчет переходного процесса в одномашинной системе с шинами бесконечной мощности (ШБМ). На рисунке 1 представлена схема энергосистемы, для которой необходимо провести расчет. Исходные данные для расчета предоставляются руководителем расчетной работы.



Для возмущения "наброс механической мощности" предусмотреть два случая: наброс мощности 10% от исходного режима; наброс мощности до величины обеспечивающей сползание режима и нарушение статической устойчивости за время  $2 \cdot T$  (постоянная времени обмотки возбуждения).

Для возмущения "к.з. с отключением ВЛ" выбрать шунт короткого замыкания, чтобы напряжение на зажимах генератора достигло 30% от исходного режима.

Продолжительность короткого замыкания выбрать такой, чтобы угол ротора в ходе переходного процесса превысил значение, соответствующее максимуму угловой характеристики, и чтобы динамический переход был устойчив.

В отчете привести графики:

- для к.з.:  $P_e(t)$ ,  $E'q(t)$ ; график зависимости  $P_e(\delta)$ ,  $d\omega(\delta)$ .
- для обоих случаев наброса мощности в одних осях:  $P_e(t)$ ,  $\delta(t)$ ,  $d\omega(t)$ ,  $E'q(t)$ .

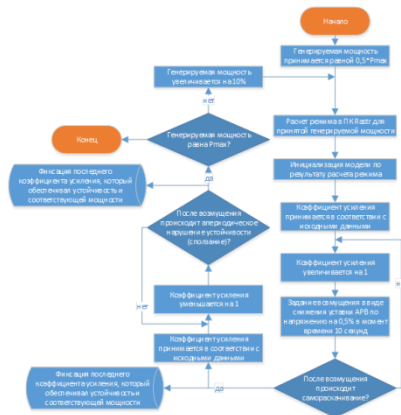
Задание 2. Схема задания 1 дополняется моделями регулятора возбуждения, турбины и регулятора скорости. Параметры этих моделей представлены в приложении 1.

В ходе выполнения задания требуется:

• Смоделировать к.з. в той же точке и с тем же шунтом, что в задании 1. В ходе моделирования получить значение предельного времени отключения к.з. для заданного коэффициента усиления АРВ и для  $K_u=0$ . Привести графики  $d\omega(t)$  и  $U_g(t)$  для  $K_u=\text{заданное}$  и  $K_u=0$  в одних осях для случая, соответствующего предельному времени отключения при  $K_u=0$ .

• Смоделировать 20% наброс мощности на генератор для заданной постоянной времени регулятора скорости и для постоянной времени близкой к 0.

• Получить область устойчивости генератора в координатах  $K_u(P_e)$  в диапазоне мощностей от  $0,5 \cdot P_{ном}$  до  $P_{max}$ . Указать точку исходного состояния генератора в этой области. Алгоритм для получения области устойчивости представлен на рисунке 2.



Задание 3. Расчет переходного процесса в двухмашинной системе с ШБМ. Число узлов в модели - 5. Из них 2 генераторных (моделируются уравнениями движения с турбинами и регуляторами скорости), один ШБМ, остальные нагрузочные.

Параметры схем и исходные данные для выполнения задания представлены в Приложении 2 к Домашнему заданию. Перед выполнением необходимо согласовать вариант с руководителем.

4.1 Расчет переходного процесса осуществляется также, как для первых двух заданий за тем исключением, что матрицы проводимостей и соответственно система уравнений установившегося режима будет большей размерности. Кроме того, необходимо сформировать две группы дифференциальных уравнений (для каждого из генераторов).

4.2 Для инициализации модели следует (как и в предыдущих заданиях) выполнить расчет установившегося режима в Rastr и рассчитать начальные значения дифференцируемых переменных, как это делалось в задании 1 и 2.

4.3 В модели присутствуют нагрузки, которые для расчета требуется пересчитать в шунты и добавить в диагональные элементы матрицы собственных и взаимных проводимостей. Для расчета проводимостей шунтов необходимо использовать напряжения в узлах сети, полученные из расчета в Rastr.

4.4 Трансформаторы генераторов следует вводить в расчет упрощенно - только реактивными сопротивлениями, которые складываются с сопротивлениями генераторов (например, при присоединении генератора к сети следует использовать не  $X'd$ , а  $X'ds=X'd+X_T$ ). Соответственно параметры генераторов приводятся к классу напряжения сети.

4.5 В созданной модели необходимо смоделировать ряд возмущений.

4.5.1 Два последовательных наброса мощности в 10 % от  $P_{ном}$ . На один генератор, затем, когда переходный процесс от этого наброса затухнет, на второй генератор.

4.5.2 Короткое замыкание в точке, определенной заданием. Требуется подобрать шунт к.з. таким, чтобы напряжение при к.з. снижалось до 20% от исходного значения. Необходимо смоделировать к.з. для предельного времени отключения.

4.5.3 Далее необходимо смоделировать к.з. продолжительностью "предельное время отключения + 0,5 секунды". Для этого возмущения необходимо определить линии, по которым происходит асинхронный ход.

4.6 Все моделируемые явления следует пояснить. Состав графиков для пояснения необходимо выбрать самостоятельно. При этом руководитель оставляет за собой право потребовать дополнить работу теми или иными графиками.

Задание 4. В модели задания 4 ШБМ заменяется на генератор, представляемый уравнением движения, регулятором скорости (без турбины) и АРЧМ. Отключением одного из генераторов (по выбору студента и согласованию с руководителем) моделируется возникновение дефицита мощности в энергосистеме. Приводятся несколько графиков изменения частоты оставшегося генератора и внешней системы для трех значений коэффициента усиления АРЧМ. Обязательным значением коэффициента усиления является "0", остальные выбираются по рекомендации руководителя.

LMS-платформа – не предусмотрена

### 5.2.2. Отчет по лабораторным работам

Примерный перечень тем

1. Создание модели генератора в виде уравнения движения и интеграция его в сеть
2. Дополнение созданной модели моделью турбины, регулятора скорости, АРВ
3. Создание модели многомашинной электроэнергетической системы

Примерные задания

ЛР№ 1

На основе стандартных блоков ПО Matlab Simulink необходимо создать модель генератора в виде уравнения движения. Генератор представляется в электрической сети в виде неизменной ЭДС за неизменным сопротивлением. Модель должна быть собрана с применением преобразования координат  $abc\_dq0$  и  $dq0\_abc$ . После создания модели в ней моделируются возмущения: короткое замыкание, наброс механической мощности на вал генератора.

#### ЛР№ 2

В работе модель, созданная в ходе выполнения ЛР№1, дополняется моделью паровой турбины с регулятором скорости, а также модель системы возбуждения с автоматическим регулятором возбуждения. Для созданной модели выполняется моделирование самораскачивания системы из-за некорректных настроек АРВ, а также резкое открытие регулировочного клапана турбины.

#### ЛР№ 3

В работе создается модель многомашинной системы, где каждая машина представляет собой генератор, созданный при выполнении ЛР№1 и ЛР№2. В сложнзамкнутой модели воспроизводится асинхронный ход вызванный коротким замыканием, а также системное снижение частоты, вызванное дефицитом активной мощности.

LMS-платформа – не предусмотрена

### **5.3. Описание контрольно-оценочных мероприятий промежуточного контроля по дисциплине модуля**

#### **5.3.1. Зачет**

Список примерных вопросов

1. Принципы расчета электромеханических переходных процессов в энергосистемах. Последовательность расчета, моделирование возмущений.
2. Система уравнений для расчета установившегося режима. Интеграция генератора в сеть. Особенности перехода из системы координат сети в систему координат генератора и обратно.
3. Уравнение движения: физические закономерности, лежащие в основе модели; вывод уравнений модели; структурная схема; инициализация модели.
4. Переходный процесс в обмотке возбуждения: физические закономерности, лежащие в основе модели; вывод уравнений модели; структурная схема; инициализация модели; влияние учета этого процесса на расчет электромеханических процессов в ЭЭС.
5. Переходные процессы в демпферных контурах: физические закономерности, лежащие в основе модели; вывод уравнений модели; структурная схема; инициализация модели; влияние учета этого процесса на расчет электромеханических процессов в ЭЭС.
6. Автоматический регулятор возбуждения пропорционального действия и возбудитель: Входные управляющие воздействия; уравнение модели; структурная схема модели; инициализация модели. Явление колебательного нарушения устойчивости.
7. Турбина (+ регулятор скорости) и физические закономерности, лежащие в основе модели; вывод уравнений модели; структурная схема; инициализация модели; влияние учета этого процесса на расчет электромеханических процессов в ЭЭС (наброс мощности на генератор).

8. Инициализация полной модели генератора: в каких моделях какие параметры инициализируются; формулы для расчета.

9. Общие принципы описания динамических моделей структурными схемами. Типовые блоки для описания моделей.

10. Типы задач: • По заданной структурной схеме записать уравнения динамической системы; • По заданным уравнениям изобразить структурную схему динамической системы; • Для заданного режима и параметров генератора и уровня детализации модели рассчитать начальные значения дифференцируемых переменных; • Рассчитать переходный процесс в динамической системе, для которой заданы уравнения, их коэффициенты и начальные условия.

LMS-платформа – не предусмотрена

#### **5.4 Содержание контрольно-оценочных мероприятий по направлениям воспитательной деятельности**

Направления воспитательной деятельности сопрягаются со всеми результатами обучения компетенций по образовательной программе, их освоение обеспечивается содержанием всех дисциплин модулей.