

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»



УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета энергетики и систем  
управления А.В. Бурковский  
«31» августа 2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА  
дисциплины**

«Устойчивость электроэнергетических систем»

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Магистерская программа Электроэнергетические системы

Квалификация выпускника магистр

Нормативный период обучения 2 года / 2 года и 4 м.

Форма обучения очная / заочная

Год начала подготовки 2021

Автор программы \_\_\_\_\_ доцент \_\_\_\_\_ /Н.В. Ситников/

И. о. заведующего кафедрой  
Электромеханических  
систем и электроснабжения \_\_\_\_\_ /В.П. Шелякин/

Руководитель ОПОП \_\_\_\_\_ /В.П. Шелякин/

Воронеж 2021

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1.1. Цели дисциплины

- формирование у обучающихся профессиональных компетенций, основанных на теоретических и практических навыках анализа устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС). При этом основное внимание уделяется физической сущности происходящих процессов и методам управления данными процессами с целью повышения статической, динамической и результирующей устойчивости ЭЭС.

### 1.2. Задачи освоения дисциплины

изучение методов анализа статической, динамической и результирующей устойчивости ЭЭС;

- изучение способов повышения устойчивости работы ЭЭС в установившихся и переходных режимах.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Устойчивость электроэнергетических систем» относится к дисциплинам вариативной части блока Б1.

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Устойчивость электроэнергетических систем» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-1 - Способен осуществлять управление электроэнергетическим режимом энергосистемы

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-1	знать основы теории устойчивости ЭЭС для эффективного управления электроэнергетическим режимом
	уметь применять современные методы исследования для оценки устойчивости ЭЭС в установившихся и переходных режимах
	владеть методами анализа и моделирования переходных процессов, при исследовании устойчивости ЭЭС

## 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Устойчивость электроэнергетических систем» составляет 5 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий

**очная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестр
		ы
		2
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	72	72
В том числе:		
Лекции	18	18
Практические занятия (ПЗ), в том числе в форме практической подготовки	36 10	36 10
Лабораторные работы (ЛР), в том числе в форме практической подготовки	18 8	18 8
<b>Самостоятельная работа</b>	72	72
<b>Курсовая работа</b>	+	+
Часы на контроль	36	36
Виды промежуточной аттестации - экзамен	+	+
Общая трудоемкость академические часы з.е.	180 5	180 5

#### **заочная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестр
		ы
		3
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	24	24
В том числе:		
Лекции	8	8
Практические занятия (ПЗ), в том числе в форме практической подготовки	8 6	8 6
Лабораторные работы (ЛР), в том числе в форме практической подготовки	8 4	8 4
<b>Самостоятельная работа</b>	147	147
<b>Курсовая работа</b>	+	+
Часы на контроль	9	9

Виды промежуточной аттестации - экзамен	+	+
Общая трудоемкость академические часы з.е.	180 5	180 5

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### 5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

#### очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб зан.	СРС	Всего час
1	Статическая устойчивость ЭЭС	Классификация переходных процессов. Явления, определяющие электромеханический переходной процесс. Малые и большие возмущения. Виды устойчивости. Понятие о статической устойчивости электрической системы. Анализ статической устойчивости методом малых колебаний.	4	8	4	15	31
		Практическая подготовка		2	4		6
2	Динамическая устойчивость ЭЭС	Понятие о динамической устойчивости и методы ее расчета. Определение предельного времени отключения КЗ по условиям динамической устойчивости.	4	6	4	15	29
		Практическая подготовка		2	2		4
3	Устойчивость узлов нагрузки	Характеристика узлов нагрузки. Статическая устойчивость двигательной нагрузки. Динамическая устойчивость узлов нагрузки. Самозапуск двигателей.	4	4	2	15	25
		Практическая подготовка		2	2		4
4	Результирующая устойчивость ЭЭС	Понятие о результирующей устойчивости. Асинхронный режим ЭЭС. Условия ресинхронизации синхронного генератора.	2	4	-	12	18
		Практическая подготовка		2			2

5	Мероприятия повышающие устойчивость ЭЭС	Средства повышения статической устойчивости ЭЭС. Средства повышения динамической и результирующей устойчивости.	4	4	-	15	23
		Практическая подготовка		2			2
<b>Итого</b>			<b>18</b>	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>72</b>	<b>144</b>

**заочная форма обучения**

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб зан.	СР С	Всего час
1	Статическая устойчивость ЭЭС	Классификация переходных процессов. Явления, определяющие электромеханический переходной процесс. Малые и большие возмущения. Виды устойчивости. Понятие о статической устойчивости электрической системы. Анализ статической устойчивости методом малых колебаний.	2	1	2	36	41
		Практическая подготовка		1	2		3
2	Динамическая устойчивость ЭЭС	Понятие о динамической устойчивости и методы ее расчета. Определение предельного времени отключения КЗ по условиям динамической устойчивости.	2	1	2	34	39
		Практическая подготовка		1	2		3
3	Устойчивость узлов нагрузки	Характеристика узлов нагрузки. Статическая устойчивость двигательной нагрузки. Динамическая устойчивость узлов нагрузки. Самозапуск двигателей.	2		-	28	30
		Практическая подготовка		1			1
4	Результирующая устойчивость ЭЭС	Понятие о результирующей устойчивости. Асинхронный режим ЭЭС. Условия ресинхронизации синхронного генератора.	1		-	21	22
		Практическая подготовка		1			1
5	Мероприятия повышающие	Средства повышения статической устойчивости	1		-	28	29

	устойчивость ЭЭС	ЭЭС. Средства повышения динамической и результирующей устойчивости.					
		Практическая подготовка		2			2
<b>Итого</b>			<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>147</b>	<b>171</b>

Практическая подготовка при освоении дисциплины (модуля) проводится путем непосредственного выполнения обучающимися отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью, способствующих формированию, закреплению и развитию практических навыков и компетенций по профилю соответствующей образовательной программы на практических занятиях и (или) лабораторных работах

№ п/п	Перечень выполняемых обучающимися отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью	Формируемые профессиональные компетенции
1	На практических занятиях в рамках практической подготовки обучающиеся выполняют элементы работ по определению параметров ЭЭС различными расчетными методами с целью повышения устойчивости режима ЭЭС	ПК-1
2	На лабораторных занятиях в рамках практической подготовки обучающиеся выполняют элементы работ по исследованию устойчивости ЭЭС методами моделирования и расчетного эксперимента	ПК-1

## 5.2 Перечень лабораторных работ

Укажите перечень лабораторных работ

Лабораторная работа №1 "Исследование статической устойчивости простейшей ЭЭС с нерегулируемым синхронным генератором".

Лабораторная работа №2 "Исследование статической устойчивости простейшей ЭЭС с синхронным генератором, снабженным АРВ пропорционального действия".

Лабораторная работа №3 "Исследование динамической устойчивости

ЭЭС при симметричном КЗ в линии электропередачи".

Лабораторная работа №4 "Исследование устойчивости синхронного электродвигателя".

## **6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ**

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины предусматривает выполнение курсовой работы в 2 семестре для очной формы обучения, в 3 семестре для заочной формы обучения.

Примерная тематика курсовой работы: «Влияние параметров электропередачи на статическую и динамическую устойчивость простейшей ЭЭС»

Задачи, решаемые при выполнении курсовой работы:

- Определение параметров схемы замещения заданной ЭЭС для установившегося режима.
- Расчет и построение угловой характеристики синхронного генератора.
- Определение предела передаваемой мощности по условиям статической устойчивости.
- Определение параметров схемы замещения заданной ЭЭС для переходного режима (КЗ).
- Определение динамической устойчивости на основе метода площадей.

## **7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания**

### **7.1.1 Этап текущего контроля**

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

<b>Компетенция</b>	<b>Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции</b>	<b>Критерии оценивания</b>	<b>Аттестован</b>	<b>Не аттестован</b>
ПК-1	знать основы теории устойчивости ЭЭС для эффективного управления электроэнергетическим режимом	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсовой работы	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

	уметь применять современные методы исследования для оценки устойчивости ЭЭС в установившихся и переходных режимах	Решение типовых практических задач, написание курсовой работы	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть методами анализа и моделирования переходных процессов, при исследовании устойчивости ЭЭС	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсовой работы	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

### 7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 2 семестре для очной формы обучения, 3 семестре для заочной формы обучения по четырехбалльной системе:

- «отлично»;
- «хорошо»;
- «удовлетворительно»;
- «неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии и оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ПК-1	знать основы теории устойчивости ЭЭС для эффективного управления электроэнергетическим режимом	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	уметь применять современные методы исследования для оценки устойчивости ЭЭС в установившихся и переходных	Решение типовых практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

	режимах			верный ответ во всех задачах		
	владеть методами анализа и моделирования переходных процессов, при исследовании устойчивости ЭЭС	Решение прикладн ых задач в ходе выполнен ия курсовой работы	Задачи решены в полном объеме и получен ы верные ответы	Продемо нстр ирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемон стр ирован верный ход решения в большинс тве задач	Задачи не решены

**7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)**

**7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию**

**1 Укажите какие электромеханические переходные процессы определяют статическую устойчивость ЭЭС.**

- А) Переходные процессы при больших отклонениях мощности и больших изменениях скорости.
- Б) Переходные процессы при малых отклонениях частоты и напряжения.
- В) Переходные процессы при больших отклонениях мощности и малых изменениях скорости.
- Г) Переходные процессы при малых отклонениях мощности и малых изменениях скорости.

**2 Укажите какие электромеханические переходные процессы определяют динамическую устойчивость ЭЭС.**

- А) Переходные процессы при больших отклонениях мощности и больших изменениях скорости.
- Б) Переходные процессы при больших отклонениях частоты и напряжения.
- В) Переходные процессы при больших отклонениях мощности и малых изменениях скорости.
- Г) Переходные процессы при малых отклонениях мощности и малых изменениях скорости.

**3 Укажите правильное определение статической устойчивости ЭЭС.**

- А) Способность системы самопроизвольно восстанавливать исходный режим после ремонтных работ.
- Б) Способность системы самопроизвольно восстанавливать исходный режим после большого возмущения.
- В) Способность системы самопроизвольно восстанавливать исходный режим после малого возмущения.
- Г) Способность системы восстанавливать исходный режим после малого возмущения по команде оперативного персонала.

**4 Укажите не верное допущение, принимаемое при рассмотрении статической устойчивости ЭЭС.**

- А) Не учитываются активные сопротивления статоров генераторов, трансформаторов, ЛЭП;
- Б) Не учитываются динамические свойства статических элементов ЭЭС (трансформаторы,

реакторы, ЛЭП);

В) Не учитываются демпферные контуры генераторов.

Г) Рассматриваются явнополусные генераторы ( $x_d \neq x_q$ ).

**5 Укажите формулу для угловой характеристики синхронного генератора.**

А)  $P_{\text{сущ}} = \frac{E_q U}{x} \cos \delta$ .

Б)  $P = \frac{E_q U}{x} \sin \delta$ .

В)  $I_a x = E_{q\phi} \sin \delta$ .

Г)  $P_m = \frac{E_q U}{x}$ .

**6 Укажите выражение определяющее критерий статической устойчивости ЭЭС.**

А)  $\frac{dP}{d\delta} > 0$ .

Б)  $\frac{dQ}{d\delta} > 0$ .

В)  $\frac{dS}{d\delta} > 0$ .

Г)  $\frac{dP}{d\delta} < 0$ .

**7 Укажите условия определяющие статическую устойчивость ЭЭС по методу малых колебаний.**

А) Система статически устойчива, если все вещественные корни и вещественные части комплексных корней характеристического уравнения отрицательны.

Б) Система статически устойчива, если все комплексные корни характеристического уравнения отрицательны.

В) Система статически устойчива, если все вещественные корни и вещественные части комплексных корней характеристического уравнения положительны.

Г) Система статически устойчива, если все вещественные корни и вещественные части комплексных корней характеристического уравнения равны нулю.

**8 Из приведенных названий укажите алгебраические критерии статической устойчивости.**

А) Критерий Рауса.

Б) Критерий Михайлова.

В) Критерий Найквиста.

Г) Критерий Гурвица.

**9 Укажите правильное определение динамической устойчивости ЭЭС.**

А) Система динамически устойчива, если при малом возмущении она самопроизвольно восстанавливает исходный режим работы.

Б) Система динамически устойчива, если при каком-либо большом возмущении сохраняется синхронная работа всех станций системы.

В) Система динамически устойчива, если отклонение напряжения в аварийном режиме не превышает 15%.

Г) Система динамически устойчива, если возможен переход в утяжеленный установившийся режим без отключения потребителей третьей категории.

**10 К асинхронным режимам относятся. Укажите не правильное утверждение.**

А) Самозапуск синхронных двигателей.

Б) Включение на параллельную работу трансформаторов.

Г) Самосинхронизация синхронных генераторов.

В) Асинхронный пуск синхронных двигателей и синхронных компенсаторов.

### 7.2.2 Примерный перечень заданий для решения типовых задач (минимум 10 вопросов для тестирования с вариантами ответов)

1 На рис. 1 приведена принципиальная схема электрической системы. Для одного из заданных вариантов (табл. 1 и 2) требуется составить схему замещения системы и определить ее параметры.

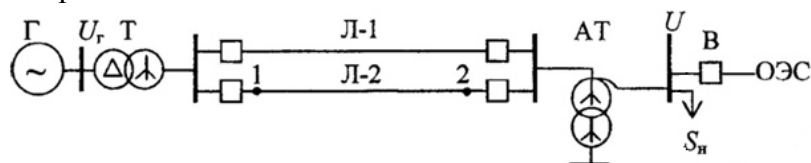


Рис. 1 Схема электрической системы

Таблица 1 - Параметры элементов электрической системы

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{нг}, \text{МВт}$	60	200	300	100	150	200	300	160	100	60
$\cos\varphi_{нг}$	0,8	0,9	0,85	0,85	0,85	0,9	0,9	0,85	0,85	0,85
$U_{нг}, \text{кВ}$	10,5	13,8	20	15,75	10,5	15,75	20	18	10,5	6,3
Кол-во блоков, п	1	1	1	3	1	2	2	2	2	2
$x_d, \%$	200	210	186	210	220	197	210	240	190	161
$x'_d, \%$	32	30	27	35	32,9	29	26	29	28	28
$x_2, \%$	28	27	22	30	28	25	21	26	24	22
$S_{нг}, \text{МВА}$	80	250	400	125	200	250	400	200	125	80
пГ	1	1	1	3	1	2	2	2	2	2
$K_T$	121/10,5	242/13,8	330/20	242/15,75	120/10,5	242/15,75	330/20	242/18	120/10,5	120/6,3
$S_{нАТ}, \text{МВА}$	125	300	400	125	240	300	400	240	125	125
$n_{АТ}$	1	1	1	3	1	2	2	2	2	2
$K_{АТ}$	330/115	330/242	787/330	330/242	347/115	347/242	787/330	347/242	330/121	330/121
$U_{k, \text{В-С}}$	10	11	8	9	10	7	7,6	8	9	10
$U, \text{кВ}$	330	330	750	330	330	330	750	330	330	330
$U_{нЛ}, \text{кВ}$	110	220	330	220	110	220	330	220	110	110
$x_0, \text{Ом/км}$	0,42	0,41	0,32	0,4	0,41	0,42	0,33	0,41	0,43	0,42
$P_n, \text{МВт}$	55	180	250	195	140	190	480	300	190	110
Вид КЗ	$K^{(2)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(2)}$
Место КЗ	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
Длительность КЗ ( $t_{отк}$ ), с	0,30	0,2	0,16	0,25	0,34	0,24	0,16	0,2	0,35	0,32

Таблица 2 - Исходные данные по длинам линий и постоянной механической инерции генераторов

Первая буква фамилии	Последняя цифра номера варианта										$T_{jГ}$
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$c$
	$l = l_1 = l_2, \text{км}$										
А,Б,В	120	420	520	160	200	300	410	250	60	110	4
Г,Д,Е	125	430	530	180	195	290	400	260	65	120	5
Ж,З,И	130	440	540	190	190	280	390	270	70	130	6
К,Л	135	450	560	200	185	270	380	280	75	140	7
М,Н,О	140	460	580	210	170	260	370	290	80	150	8
П,Р,С	145	470	600	220	175	250	360	300	85	160	9
Т,У,Ф	150	480	620	230	160	240	350	310	90	170	10
Х,Ц,Ч,Ш	155	490	640	240	155	230	340	315	95	180	11
Щ,Э,Ю,Я	160	500	650	250	150	220	330	320	10	190	12

2 Для электрической системы (см. рис.1) требуется найти параметры схемы замещения (см. рис. 2). Параметры элементов системы:

Генератор Г:  $P_{нГ} = 150 \text{ МВт}$ ,  $\cos\varphi_{нГ} = 0,85$ ,  $U_{нГ} = 18 \text{ кВ}$ ,  $x_{dГ} = 148,7 \%$ ,  $x'_d = 18 \%$ ,  $x_{2Г} = 14,5 \%$ ,  $T_{jГ} = 8,0 \text{ с}$ ,  $n = 1$ .

Трансформатор Т:  $S_{нТ} = 200 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_{нТ} = 242 \text{ кВ}$ ,  $K_T = 242/18$ ,  $U_K = 11 \%$ ,  $n_T = 1$ .

Линии Л1, Л2:  $l = 120 \text{ км}$ ,  $x_L = 0,43 \text{ Ом/км}$ .

Автотрансформатор АТ:  $S_{нАТ} = 240 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_{нАТ} = 347 \text{ кВ}$ ,  $K_{АТ} = 347/242$ ,  $U_{к,В-С} = 7,6\%$ ,  $n_{АТ} = 1$ .

Нагрузка:  $P_H = 140 \text{ МВт}$ ,  $Q_H = 70 \text{ Мвар}$ .

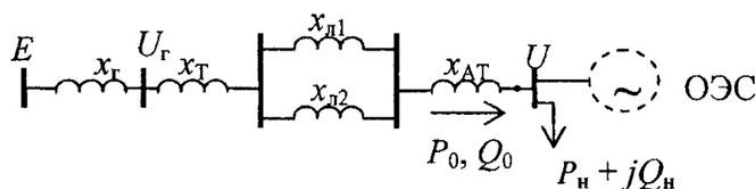


Рис.2 Схема замещения электрической системы

3 Для электрической системы (см. рис. 1) с генератором без автоматического регулятора возбуждения, с АРВ ПД и АРВ СД требуется:

1. Построить угловые характеристики мощности.
2. Определить пределы передаваемой мощности.
3. Рассчитать коэффициенты запаса статической устойчивости.

Передаваемую мощность в ОЭС принять равной мощности нагрузки, т. е.  $P_0 = P_H$ ,  $Q_0 =$

$Q_n$ , а напряжение на шинах приемной системы  $U=330$  кВ. Остальные параметры системы взять из задачи 1.

4 На шины генераторного напряжения электрической системы (см. рис. 1) включена нагрузка  $S_n = P_n + jQ_n$ . В ОЭС передается мощность  $S_o = P_o + jQ_o$ . Схема замещения рассматриваемой системы представлена на рис. 3. По заданному варианту нагрузки  $S_n$  и мощности  $S_o$  (табл. 3) требуется:

1. Вычислить собственную и взаимную проводимость генераторов станции.
2. Записать уравнение и построить угловую характеристику мощности системы.

Параметры  $x_d$  и  $x_c$  взять из решения задачи 1.1, а  $U$  в относительных единицах принять равным 1,0.

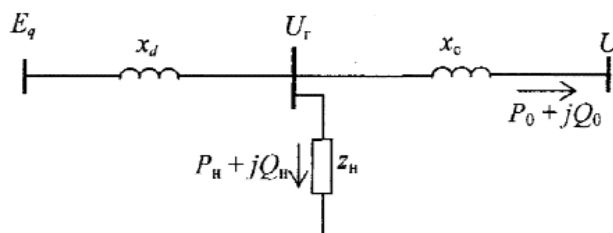


Рис. 3 Схема замещения системы

Таблица 3 - Значения нагрузки системы и мощности, передаваемой в ОЭС

№ варианта	$P_n$ , МВт	$Q_n$ , МВар	$P_o$ , МВт	$Q_o$ , МВар	№ варианта	$P_n$ , МВт	$Q_n$ , МВар	$P_o$ , МВт	$Q_o$ , МВар
1	160	80	40	20	18	120	60	80	40
2	200	100	100	50	19	60	30	40	20
3	220	110	80	40	20	30	15	30	15
4	100	50	40	20	21	100	50	100	50
5	300	150	100	50	22	160	80	140	70
6	400	200	200	100	23	140	70	160	80
7	180	90	80	40	24	40	20	100	50
8	140	70	60	30	25	200	100	200	100
9	80	40	20	10	26	200	100	400	200
10	40	20	20	10	27	80	40	180	90
11	140	70	60	30	28	100	50	100	50
12	220	110	100	50	29	60	30	40	20
13	180	90	120	60	30	20	10	40	20
14	120	60	20	10	31	190	95	110	55
15	340	170	60	30	32	130	65	70	35
16	500	250	100	50	33	150	75	90	45
17	200	100	60	30	34	170	85	100	50

5 На шины генераторного напряжения электрической системы (см. рис. 1) подключена нагрузка  $P_n = 20,45$  МВт,  $Q_n = 40,9$  МВар. В ОЭС передается  $P_o = 40$  МВт,  $Q_o = 20$  МВар. Остальные параметры системы принять из задач 1 и 4.

Для схемы замещения (см. рис. 3) требуется:

1. Вычислить собственную и взаимную проводимости генератора станции без АРВ.
2. Записать уравнение характеристики мощности.

6 Для генераторов станции (см. рис. 1) требуется:

1. Построить угловые характеристики:

- внутренней реактивной мощности;
- реактивной мощности на шинах генераторного напряжения.

2. Сравнить режимы активной и реактивной мощности генераторов при изменении

угла.

Параметры генераторов взять из задачи 1, а значения ЭДС  $E_q$  и напряжения  $U_T$  из задачи 4. Принять значения  $E_q$  и  $U_T$  независимыми от режима работы генераторов.

7 Характеристическое уравнение простейшей электрической системы при отсутствии регулирования возбуждения имеет вид

$$0,12p^3 + 0,1p^2 + 1,72p + 0,5 = 0.$$

Требуется проверить устойчивость системы с помощью:

- 1) критерия Михайлова;
- 2) критерия Гурвица;
- 3) критерия Рауса.

8 В электрической системе (рис. 1.1) возникает КЗ вблизи шин на линии Л-2 в точке 1 или 2. Релейной защитой данная линия отключается. Требуется:

1. Определить параметры схемы замещения системы в аварийном и послеаварийном режимах.

2. Построить динамические характеристики мощности системы.

3. Рассчитать максимально допустимые угол и время отключения КЗ.

Параметры элементов и режимы системы взять из задач 1.1. и 2.1. Принять параметры нулевой последовательности ЛЭП  $x_{л}^{(0)} = 4x_{л}$ .

Схема соединения обмоток: Т-  $\Delta/Y$ , АТ –  $Y/Y$ .

9 При отключении выключателя В в электрической системе (см. рис. 1) с генераторами, оснащенными АРВ ПД, требуется определить критическое напряжение на шинах нагрузки и коэффициент запаса устойчивости по напряжению.

Параметры системы взять из задачи 1.

10 Пять однотипных асинхронных двигателей насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением 6 кВ подключены к трансформатору главной понизительной подстанции (см. рис. 4). Параметры элементов системы электроснабжения:

- двигатель АД:  $P_n = 0,8$  МВт,  $P_o = 0,7$  МВт,  $\cos\varphi_0 = 0,9$ , кратность максимального момента  $b_M = 2,0$ ;

- линия:  $x_0 = 0,38$  Ом/км,  $l = 5$  км;

- трансформатор Т:  $S_{HT} = 25$  МВ А,  $U_K = 11$  %;

- напряжение на шинах двигателей:  $U = 6$  кВ.

Требуется определить:

1. Критическое напряжение на шинах питающей системы.
2. Коэффициент запаса устойчивости по напряжению.

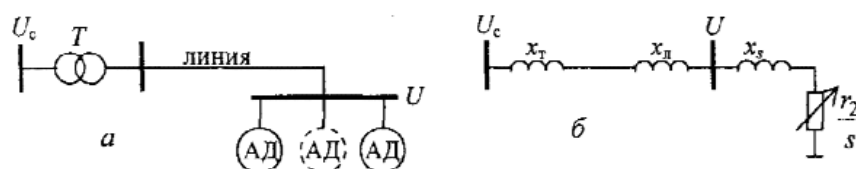


Рис.4 Схемы системы электроснабжения:

а – принципиальная; б – расчетная

### 7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

**Прикладные задачи по данной дисциплине в полном объеме реализованы в курсовой работе.**

### 7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

Не предусмотрено учебным планом

### 7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену

1. Чем отличается электроэнергетическая система от энергетической?
2. Как классифицируются элементы, входящие в состав ЭЭС?
3. Что понимается под режимом ЭЭС и чем он характеризуется?
4. Приведите пример взаимосвязи параметров режима и параметров ЭЭС.
5. Назовите и охарактеризуйте установившиеся режимы ЭЭС.
6. Назовите и охарактеризуйте переходные режимы ЭЭС.
7. Почему понятие установившегося режима ЭЭС считается условным?
8. Какие переходные процессы входят в переходной режим ЭЭС?
9. Укажите основные допущения, вводимые при рассмотрении переходных процессов, проходящих в ЭЭС.
10. Поясните физическую сущность электромеханического переходного процесса, проходящего в ЭЭС при выработке электроэнергии.
11. Что понимают под «малыми» возмущениями, какое влияние они могут оказать на работу ЭЭС?
12. Что понимают под «большими» возмущениями, каковы причины их возникновения в ЭЭС?
13. Запишите уравнение движения ротора СГ в относительных единицах.
14. Запишите уравнение движения ротора СГ в именованных единицах.
15. В каком случае режим ЭЭС считается устойчивым?
16. Как классифицируются электромеханические переходные процессы, проходящие в ЭЭС?
17. Что понимается под статической устойчивостью ЭЭС?
18. Какие допущения вводятся при анализе статической устойчивости ЭЭС?
19. Изобразите принципиальную схему и схемы замещения простейшей ЭЭС.
20. Изобразите векторную диаграмму простейшей ЭЭС для нормального установившегося режима работы.
21. Запишите выражение для угловой характеристики СГ.
22. Что понимается под «идеальным» пределом мощности, как он определяется?
23. Сформулируйте математический критерий статической устойчивости.
24. Как определяется синхронизирующая мощность и какое влияние она оказывает на статическую устойчивость?
25. Докажите, что точки равновесия мощностей СГ и турбины находящиеся на восходящей части угловой характеристики определяют устойчивый режим ЭЭС.
26. Как определяется коэффициент запаса статической устойчивости?
27. Какое влияние на статическую устойчивость оказывает подключение активной нагрузки в промежуточной точке электропередачи?
28. Какое влияние на статическую устойчивость оказывает подключение шунтирующего реактора в промежуточной точке электропередачи?
29. Какое влияние на статическую устойчивость оказывает подключение конденсаторных батарей в промежуточной точке электропередачи?
30. Поясните суть метода малых колебаний для анализа статической устойчивости.
31. В каком случае ЭЭС обладает статической устойчивостью согласно методу малых колебаний?
32. Укажите условия статической устойчивости согласно критерию Гурвица для характеристического уравнения третьего порядка.
33. Что позволяет определить метод Д-разбиений?
34. Изобразите график изменения угла  $\delta$  при мнимых корнях характеристического уравнения.
35. Изобразите график изменения угла  $\delta$  при вещественных корнях характеристического уравнения.

36. Какие моменты оказывают демпфирующее влияние на колебания ротора СМ относительно поля статора?
37. Покажите, как увеличение передаваемой мощности при неизменной ЭДС СГ приводит к снижению напряжения на шинах приёмной системы.
38. Изобразите внешнюю характеристику СГ и укажите зону искусственной устойчивости.
39. В чем суть регулирующего эффекта нагрузки?
40. В каком случае вводится понятие «действительного» предела мощности, как он соотносится с «идеальным» пределом?
41. Изобразите схемы замещения простейшей ЭЭС для случаев: генератор без АРВ; генератор с АРВ ПД; генератор с АРВ СД.
42. Определение динамической устойчивости ЭЭС.
43. Изобразите схемы замещения для нормального и послеаварийного режимов простейшей ЭЭС.
44. Изобразите схему замещения для режима КЗ.
45. Как определяется величина шунта КЗ для различных видов КЗ?
46. От чего зависит амплитуда характеристики мощности в аварийном режиме?
47. Используя графики характеристик мощности для нормального, аварийного и послеаварийного режимов, покажите в каком случае, система обладает динамической устойчивостью.
48. Изобразите график изменения угла  $\delta$ , если система динамически устойчива.
49. Изобразите график изменения угла  $\delta$ , если система динамически неустойчива.
50. Какие допущения вводятся при использовании упрощенных методов анализа динамической устойчивости?
51. Изобразите угловые характеристики СГ и покажите площадки ускорения и торможения.
52. Сформулируйте правило площадей.
53. Как можно определить предельный угол отключения КЗ?
54. В каком случае можно найти предельное время отключения КЗ, решив уравнение движения ротора СГ?
55. Какие факторы могут быть учтены при анализе динамической устойчивости уточнёнными методами?
56. В чем суть метода последовательных интервалов применяемого при анализе динамической устойчивости.
57. Что понимают под узлом нагрузки?
58. Какой состав могут иметь узлы нагрузки?
59. Какое влияние могут оказывать на работу ЭЭС переходные процессы, проходящие в узлах нагрузки?
60. Дайте определение критическому напряжению СД.
61. Какие типы механических характеристик могут быть у приводных механизмов?
62. Изобразите графики механических характеристик приводных механизмов.
63. Изобразите упрощенную Г-образную схему АД.
64. Дайте определение критическому напряжению АД.
65. Как определяется критерий статической устойчивости АД?
66. Как определяется статическая устойчивость узлов нагрузки по критерию Жданова?
67. Как определяется статическая устойчивость узлов нагрузки по критерию, основанному на учете небаланса реактивных мощностей узла нагрузки?
68. Как можно уменьшить отрицательное влияние конденсаторных батарей на устойчивость узлов нагрузки.
69. Какие виды больших возмущений оказывают влияние на динамическую устойчивость узлов нагрузки?
70. Проанализируйте влияние снижения напряжения на динамическую устойчивость

СД.

71. Проанализируйте влияние наброса нагрузки на динамическую устойчивость СД.
72. Проанализируйте влияние наброса нагрузки на динамическую устойчивость АД.
73. На какие периоды разделяют переходной процесс при самозапуске двигателей?
74. В каком случае самозапуск можно считать успешным?
75. Какие условия должны быть учтены при проверке самозапуска АД?
76. Укажите уровни допустимого снижения напряжения при самозапуске СД для разных составов узлов нагрузки.
77. Изобразите векторную диаграмму ЭЭС находящийся в асинхронном режиме.
78. Какие режимы отдельных элементов ЭЭС относят к асинхронным?
79. По каким причинам асинхронный режим ЭЭС считается ненормальным и длительно не допускается?
80. Чем обусловлен асинхронный момент, возникающий при асинхронном ходе ЭЭС?
81. Из каких, составляющих складывается асинхронный момент?
82. Дайте определение результирующей устойчивости ЭЭС.
83. Какие меры необходимо предпринять, чтобы улучшить условия ресинхронизации СГ и СД?
84. Изобразите векторную диаграмму электропередачи в асинхронном режиме.
85. Что понимают под электрическим центром качаний?
86. Изобразите графики изменения напряжений в узлах нагрузки от угла между векторами ЭДС генераторов ЭЭС.
87. Назовите мероприятия для повышения устойчивости на стадии проектирования основных элементов ЭЭС.
88. Какие мероприятия по повышению устойчивости ЭЭС относятся к дополнительным?
89. Перечислите основные средства автоматики, повышающие устойчивость ЭЭС.
90. Какие меры эксплуатационного характера направлены на повышение устойчивости ЭЭС?
91. Почему асинхронизированные синхронные генераторы более устойчивы, чем обычные?
92. Какие параметры ЛЭП оказывают наибольшее влияние на устойчивость ЭЭС?
93. Поясните, как продольная компенсация емкостной проводимости ЛЭП повышает устойчивость ЭЭС.
94. Изобразите векторную диаграмму при подключении СК на промежуточной подстанции.
95. Какие установки предлагается использовать для повышения динамической устойчивости ЭЭС вместо СК?
96. Поясните, как влияет на динамическую устойчивость электрическое торможение СГ.
97. Изобразите схему релейной форсировки возбуждения СГ и поясните принцип её работы.
98. С помощью графиков угловых характеристик поясните влияние форсировки возбуждения на динамическую устойчивость ЭЭС.
99. Поясните, как происходит повышение устойчивости ЭЭС при отключении части синхронных машин в аварийном режиме.
100. Поясните как влияет регулирование режима реактивной мощности на устойчивость ЭЭС.

#### **7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации**

Экзамен проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 10 вопросов и

задачу. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом, задача оценивается в 10 баллов (5 баллов верное решение и 5 баллов за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов – 20.

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 10 баллов.

2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 11 до 14 баллов

3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 15 до 17 баллов.

4. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 18 до 20 баллов.

#### **7.2.7 Паспорт оценочных материалов**

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Статическая устойчивость ЭЭС	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, требования к курсовой работе.
2	Динамическая устойчивость ЭЭС	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, требования к курсовой работе.
3	Устойчивость узлов нагрузки	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, требования к курсовой работе.
4	Результирующая устойчивость ЭЭС	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, требования к курсовой работе.
5	Мероприятия повышающие устойчивость ЭЭС	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, требования к курсовой работе.

#### **7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Тестирование осуществляется, с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение типовых задач осуществляется с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Защита курсовой работы осуществляется согласно требованиям, предъявляемым к работе, описанным в методических материалах. Примерное время защиты на одного

студента составляет 20 мин.

## **8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)**

### **8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

8.1.1 Хрущев Ю.В. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Хрущев Ю.В., Заповодников К.И., Юшков А.Ю.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский политехнический университет, 2012.— 154 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34740.html>.

8.1.2 Электромеханические переходные процессы в электрических системах [Электронный ресурс]: сборник задач/ Д.В. Армеев [и др.].— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2010.— 127 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45200.html>.

8.1.3 Переходные процессы в электрических системах [Электронный ресурс]: сборник задач/ Д.В. Армеев [и др.].— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014.— 331 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45133.html>.

8.1.4 Ситников, Николай Васильевич. Устойчивость электроэнергетических систем [Электронный ресурс] : учебное пособие / ФГБОУ ВО "Воронеж. гос. техн. ун-т", каф. электромех. систем и электроснабжения. - Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2019. - Электрон. текстовые и граф. данные (2,0 Мб) : ил. : табл. - Библиогр.: 97 (7 назв.). - ISBN 978-5-7731-0822-1.

### **8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:**

#### **8.2.1 Программное обеспечение**

- WIN HOME 10 32-bit/64-bit All Lng PK Lic Online DwnLd NR;
- OpenOffice;
- Google Chrome;
- Adobe Acrobat Reader;
- Компас-График LT.

#### **8.2.2 Ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»**

- Российское образование. Федеральный портал. <http://www.edu.ru/>
- Образовательный портал ВГТУ <https://education.cchgeu.ru/>

#### **8.2.3 Информационные справочные системы**

- <https://wiki.cchgeu.ru/>

#### **8.2.4 Современные профессиональные базы данных**

- Сайт ФГБУ Институт стандартизации. Адрес ресурса:

<http://www.gostinfo.ru/catalog/gostlist/>

– Сайт Netelectro Новости электротехники, оборудование и средства автоматизации. Адрес ресурса: <https://netelectro.ru/>

– Marketelectro Отраслевой электротехнический портал. Представлены новости отрасли и компаний, объявления, статьи, информация о мероприятиях, фотогалерея, видеоматериалы, нормативы и стандарты, библиотека, электромаркетинг. Адрес ресурса: <https://marketelectro.ru/>

– Сайт Чертежи.ru - это проекты домов и коттеджей, дипломные и курсовые работы в AutoCad, Компас Адрес ресурса: <https://chertezhi.ru/>

– Online Electric | База данных по электрическим сетям и электрооборудованию. <https://online-electric.ru/dbase.php>

– Проект Русский кабель: RusCable.Ru : Раздел Справочники: ГОСТ-энергетика. Адрес ресурса: <https://www.ruscable.ru/doc/docgost/>

- Элек.ру - Электротехнический портал, каталог компаний, товаров и услуг. Адрес ресурса: <https://www.elec.ru/>

- Сайт ООО «Электропоставка» : Библиотека гостей и типовых проектов. Адрес ресурса: <https://elektropostavka.ru/library>

## **9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

Реализация дисциплины «Устойчивость электроэнергетических систем» требует наличия учебной аудитории для проведения лекционных занятий.

Оборудование аудитории: комплект учебной мебели:

- рабочее место преподавателя (стол, стул);
- рабочие места обучающихся (столы, стулья).

Технические средства обучения:

- проектор;
- экран.

Переносное техническое оборудование:

- переносной компьютер.

Для проведения практических и лабораторных занятий используется учебная аудитория. Оборудование аудитории:

комплект учебной

- рабочие места обучающихся (столы, стулья).

Технические средства обучения:

- персональные компьютеры в сборе – 20 шт.

Для самостоятельной работы используется «Аудитория для групповых и индивидуальных консультаций/ Аудитория для самостоятельной работы»

Оборудование аудитории: комплект учебной мебели:

- рабочее место преподавателя (стол, стул);
- рабочие места обучающихся (столы, стулья).

Технические средства обучения:

- персональный компьютер с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде вуза.

## 10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Устойчивость электроэнергетических систем» .

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета параметров ЭЭС определяющих её статическую и динамическую устойчивость. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Лабораторные работы выполняются на компьютерном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Методика выполнения курсовой работы изложена в учебно-методическом пособии. Выполнять этапы курсового проекта должны своевременно и в установленные сроки.

Контроль усвоения материала дисциплины производится проверкой курсового проекта, защитой курсового проекта.

Методика выполнения курсовой работы изложена в учебно-методическом пособии. Выполнять этапы курсовой работы должны своевременно и в установленные сроки.

Контроль усвоения материала дисциплины производится проверкой курсовой работы, защитой курсовой работы.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.

<p>Практическое занятие</p>	<p>Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.</p>
<p>Лабораторная работа</p>	<p>Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных для подготовки к ним необходимо: следует разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу и источники, решить задачи и выполнить другие письменные задания.</p>
<p>Самостоятельная работа</p>	<p>Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций;</li> <li>- выполнение домашних заданий и расчетов;</li> <li>- работа над темами для самостоятельного изучения;</li> <li>- участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад;</li> <li>- подготовка к промежуточной аттестации.</li> </ul>
<p>Подготовка к промежуточной аттестации</p>	<p>Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед экзаменом, экзаменом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.</p>

## ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведу- ющего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП
1	Актуализированы разделы 8.1, 8.2 пункта 8, а именно «Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины», «Лицензионное программное обеспечение», «Свободно распространяемое и бесплатное программное обеспечение», «Современные профессиональные базы данных». Актуализирован пункт 9 «Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса»	31.08.2025	