

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ЭНИН  
В.М. Завьялов  
«27» августа 2015 г.

## БАЗОВАЯ РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ МЕТОДЫ РАСЧЁТА УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Направление ООП 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль подготовки: Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надёжность

Степень: магистр

Базовый учебный план приёма 2015 г.

Курс 2, семестр 3

Количество кредитов 3

Код дисциплины: ДИСЦ.В.М.1.1

Виды учебной деятельности	Временной ресурс по очной форме обучения
Лекции, ч	8
Практические занятия, ч	16
Лабораторные занятия, ч	8
Аудиторные занятия, ч	32
Самостоятельная работа, ч	76
ИТОГО, ч	108

Вид промежуточной аттестации: зачёт

Обеспечивающее подразделение:

кафедра электрических сетей и электротехники

И. о. заведующего кафедрой



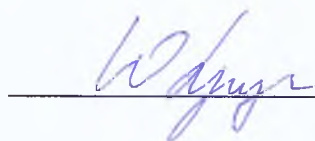
к.т.н. Прохоров А.В.

Руководитель ООП



д.т.н., доцент Завьялов В.М.

Преподаватель



д.т.н., профессор Хрущев Ю.В.

2015 г.

## 1. Цели освоения дисциплины

Основными целями дисциплины являются: формирование углублённых знаний студентов об основных математических методах расчёта статической и динамической устойчивости энергосистем и умений проведения анализа колебательной, апериодической и динамической устойчивости с использованием уточнённых математических моделей энергосистем.

В результате освоения данной дисциплины обеспечивается достижение целей **Ц1, Ц2, Ц3 и Ц5** основной образовательной программы «Электроэнергетика и электротехника». Приобретённые знания, умения и навыки позволят подготовить выпускника:

- к научным исследованиям для решения задач, связанных с разработкой инновационных методов, повышающих эффективность эксплуатации и проектирования электроэнергетических систем (ЭЭС) (**Ц1**);
- к проектно-конструкторской деятельности, связанной с практическими задачами эксплуатации и проектирования ЭЭС при выполнении требований по защите окружающей среды и правил безопасности производства электрической энергии (**Ц2**);
- к производственно-технологической деятельности, связанной с построением и обслуживанием централизованных и локальных устройств противоаварийной автоматики ЭЭС (**Ц3**);
- к самообучению и непрерывному самосовершенствованию (**Ц5**).

## 2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина относится к профессиональному модулю магистерской подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», профили «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надёжность» и «Энергосбережение и энергоэффективность». Дисциплина имеет как самостоятельное значение, так и является базовой для решения задач по противоаварийному управлению в энергосистемах.

Для успешного освоения дисциплины слушателю необходимо:

*знать:*

методы решения дифференциальных уравнений, операционное исчисление, элементы матричного анализа, основы математического моделирования и анализа электромеханических переходных процессов.

*уметь:*

проводить расчёты установившихся режимов энергосистем, формировать упрощённые математические модели электромеханических переходных процессов, представлять системы линейных алгебраических уравнений в компактной матричной форме. Решать простейшие линейные дифференциальные уравнения.

*иметь опыт:*

расчета и анализа электромеханических переходных процессов на основе типовых упрощённых моделей энергосистем.

### 3. Результаты освоения дисциплины

В результате изучения дисциплины студент должен овладеть методами исследования устойчивости энергосистем «в малом» и «в большом», применяемыми в электроэнергетике, научиться формулировать решаемые задачи, самостоятельно определяя необходимые уровни упрощения математических моделей энергосистем.

Уровень освоения дисциплины должен позволять обучающимся проводить расчёт и анализ всех видов устойчивости на базе профессиональных программных комплексов, используемых на предприятиях электроэнергетики.

В соответствии с требованиями ООП освоение дисциплины «Методы расчёта устойчивости энергосистем» направлено на формирование у студентов следующих компетенций (результатов обучения), в т.ч. в соответствии с ФГОС:

Таблица 1

#### Составляющие результатов обучения, которые будут получены при изучении данной дисциплины

Результаты обучения	Составляющие результатов обучения					
	Код	Знания	Код	Умения	Код	Владение опытом
<b>Р2</b>	3.2.1	терминологии делового и профессионального технического иностранного языка	У.2.1	применять знания иностранного языка при проведении рабочих переговоров и составлении документации	В.2.1.	общения на иностранном языке в профессиональной среде
			У.2.2	достоверно и адекватно получать информацию на иностранном языке из различных источников информации	В.2.2	квалифицированного составления документации на иностранном языке
<b>Р4</b>	34.1	основных методов, способов и средств получения, хранения и переработки информации	У4.1	применять компьютерную технику и информационные технологии в своей профессиональной деятельности	В4.1	использования современных технических средства и информационных технологий в профессиональной обла-

Результаты обучения	Составляющие результатов обучения					
	Код	Знания	Код	Умения	Код	Владение опытом
						сти
			У4.2	понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности		
<b>Р5</b>	35.1	основных закономерностей развития науки и техники	У5.1	анализировать полученную информацию	В5.1	аргументированного изложения собственной точки зрения
	35.2	основных научных школ, концепций, источников знаний и приёмы работы с ними	У5.2	анализировать логику различного рода рассуждений	В5.2	ведения дискуссии и полемики
	35.3	методов научно-технического творчества	У5.3	применять методологию научного творчества	В5.3	использования научно-технических методов решения инженерных задач
<b>Р6</b>	36.1	современные достижения науки и передовой технологии в области электроэнергетики			В6.1	планирования процесса решения научно-технической задачи
	36.2	актуальные задачи и проблемы электроэнергетики			В6.2	работы с техническими средствами

Результаты обучения	Составляющие результатов обучения					
	Код	Знания	Код	Умения	Код	Владение опытом
		тики и электротехники				
	36.3	современные аналитические методы и модели комплексного инженерного анализа	У6.3	применять современные методы и средства исследования для решения конкретных задач	В6.3	работы с системами автоматизированного проектирования

В результате освоения дисциплины «Методы расчёта устойчивости энергосистем» студентом должны быть достигнуты следующие результаты:

Таблица 2

### Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Универсальные компетенции</i>		
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способность к активной социальной мобильности.</i>	Требования ФГОС (ОК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	<i>Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовность вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.</i>	Требования ФГОС (ОК-8, ОК-9, ПК-14, ПК-19), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятель-</i>	Требования ФГОС (ПК-1, 2, 36) <sup>1</sup> , Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	ности в области электроэнергетических систем, сетей, электропередач, их режимов, устойчивости и надёжности.	стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
Р6	Ставить и <i>решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетических систем, сетей, электропередач, их режимов, устойчивости и надёжности с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.	Требования ФГОС (ПК-5, 6, 7,9). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .

#### 4. Структура и содержание дисциплины

##### **Введение.**

Объект и цель изучения дисциплины. Модели объектов и явлений.

##### **Раздел 1. Математические основы исследования переходных процессов в энергосистемах**

Нормальная система дифференциальных уравнений. Приведение систем дифференциальных уравнений к нормальной форме. Решения систем дифференциальных уравнений. Матричная форма записи системы линейных дифференциальных уравнений и ее решение. Операторная форма записи дифференциальных уравнений. Матричная форма записи системы операторных уравнений и ее характеристическое уравнение.

*Практические занятия*

*Тема № 1*

*Приведение систем линейных уравнений к нормальному виду и представление их в матричной форме. Определение коэффициентов характеристического уравнения.*

##### **Раздел 2. Передаточные функции и частотные характеристики линейных систем**

Формирование передаточной функции линейной системы (на примере дифференцирующего звена). Передаточные функции типовых звеньев линейных технических систем. Общая форма передаточной функции. Передаточные функции сложных систем. Комплексные коэффициенты усиления и частотные характеристики линейных систем.

*Практические занятия*

*Тема № 2*

*Операторная форма и характеристическое уравнение произвольной системы линейных дифференциальных уравнений. Преобразование передаточных функций линейных объектов. Комплексные коэффициенты усиления и частотные характеристики.*

### **Раздел 3. Математические методы анализа статической устойчивости энергосистем**

Устойчивость в смысле Ляпунова. Необходимые и достаточные условия устойчивости линейных систем. Необходимые условия устойчивости. Алгебраические критерии устойчивости: критерий Гурвица; критерий Рауса. Частотные критерии устойчивости: принцип аргумента; критерий Михайлова. Понятие о Д-разбиении. Д-разбиение по двум параметрам. Штриховка границ Д-разбиения и определение области устойчивости. Д-разбиение по одному параметру. Д-разбиение по трем параметрам.

*Практические занятия*

*Тема № 3*

Расчёт устойчивости линейной системы по критериям Гурвица, Рауса, Михайлова. Построение областей статической устойчивости методом Д-разбиения.

### **Раздел 4. Математическая модель регулируемой одномашинной системы**

Задачи настройки АРВ генераторов. Система уравнений переходных процессов. Система линеаризованных уравнений. Характеристическое уравнение.

*Практические занятия*

*Тема № 4*

Построение математической модели регулируемой одномашинной энергосистемы для анализа статической устойчивости – 3 часа.

*Лабораторная работа 1*

Выбор коэффициентов усиления АРВ СД генератора одномашинной энергосистемы.

## **Раздел 5. Практические методы расчёта статической устойчивости энергосистем**

Общие условия расчёта статической устойчивости. Коэффициенты запаса статической устойчивости. Построение областей допустимых по статической устойчивости режимов энергосистем. Свободный член характеристического уравнения двухмашинной энергосистемы. Свободный член характеристического уравнения сложной нерегулируемой энергосистемы. Свободный член характеристического уравнения сложной регулируемой энергосистемы при наличии шин бесконечной мощности. Свободный член характеристического уравнения при учёте нагрузки статическими характеристиками. Связь между свободным членом характеристического уравнения и практическими критериями статической устойчивости. Связь между свободным членом характеристического уравнения и якобианом системы уравнений установившихся режимов энергосистемы. Условия совпадения якобиана системы уравнений установившихся режимов и свободного члена характеристического уравнения. Методы построения областей статической устойчивости сложных энергосистем. Программы и программные комплексы для расчётов устойчивости энергосистем.

*Практические занятия*

*Тема № 5*

Подготовка математической модели трёхмашинной энергосистемы к расчётам апериодической статической устойчивости на ЦВМ – 10 часов.

*Лабораторная работа 2*

Построение области допустимых режимов по апериодической статической устойчивости трехмашинной энергосистемы.

## **Раздел 6. Методы и алгоритмы расчета динамической устойчивости энергосистем**

Задачи и методы расчета динамической устойчивости энергосистем. Понятие о численном интегрировании дифференциальных уравнений. Метод Эйлера. Интегрирование с помощью рядов Тейлора и определение порядка точности других методов. Исправленный метод Эйлера. Модифицированный метод Эйлера. Метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Метод прогноза и коррекции. Алгоритмы решения систем дифференциальных уравнений.

*Практические занятия*

*Тема № 6*

Численное решение дифференциальных уравнений методом Эйлера, с помощью рядов Тейлора, исправленным и модифицированным методами Эйлера, методом прогноза и коррекции, численное решение дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты четвертого порядка.



## **5. Организация и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов**

Самостоятельная работа является наиболее продуктивной формой образовательной и познавательной деятельности студента в период обучения. Для реализации творческих способностей и более глубокого освоения дисциплины предусмотрены следующие виды самостоятельной работы: *1) текущая и 2) творческая проблемно-ориентированная.*

**5.1. Текущая самостоятельная работа**, направленная на углубление и закрепление знаний студента, развитие практических умений включает:

- работу с лекционным материалом, поиск и обзор литературы и электронных источников информации по индивидуальному заданию;
- опережающую самостоятельную работу;
- изучение тем, вынесенных на самостоятельную проработку;
- подготовку к лабораторным работам;
- изучение нормативно-технической документации;
- подготовку к экзамену.

**5.2. Творческая проблемно-ориентированная самостоятельная работа (ТСР)** предусматривает:

- исследовательскую работу;
- поиск, анализ, структурирование и презентацию информации;
- углублённое исследование вопросов по тематике лабораторных работ.

### **5.3. Содержание самостоятельной работы студентов по дисциплине**

5.3.1. С целью развития творческих навыков у студентов при изучении дисциплины определён перечень *тем научно-исследовательских работ и рефератов по наиболее проблемным задачам и вопросам теоретического и практического содержания:*

– математическое описание одномашиной энергосистемы генератора с АРВ СД, линеаризация уравнений и их запись в исходной и операторной формах, составление характеристического уравнения и его анализ.

– определение границ устойчивости энергосистемы, содержащей генератор с АРВ «сильного» действия, методом D-разбиения;

– определение границ статической устойчивости и границ допустимых режимов трёхмашиной энергосистемы с использованием профессиональных программных комплексов.

#### **5.3.2. Темы индивидуальных заданий для реферативных работ:**

– роль научных трудов Ляпунова А.М. в развитии теории устойчивости электроэнергетических систем;

– построение режимных передаточных функций по линеаризованным дифференциальным уравнениям синхронных машин;

– формирование исходной информации при исследованиях статической и динамической устойчивости энергосистем;

–практические методы расчёта статической устойчивости энергосистем по компьютерным программам, используемых в диспетчерских службах энергообъединений.

#### 5.3.4. Темы, выносимые на самостоятельное изучение:

- особенности получения характеристического определителя энергосистемы, содержащей синхронные генераторы с АРВ сильного действия;
- факторы, определяющие появление параметрического резонанса токов и напряжений синхронной машины;
- изменение индуктивностей синхронной машины в результате вращения ротора;
- физическая природа самовозбуждения синхронной машины.

#### 5.4. Контроль самостоятельной работы студентов

Контроль самостоятельной работы студентов и качество освоения отдельных модулей дисциплины осуществляется посредством:

- защиты лабораторных работ в соответствии графиком выполнения;
- защиты рефератов по выполненным обзорным работам и проведённым исследованиям;
- защитой решений самостоятельно решаемых контрольных задач;
- опроса студентов на практических занятиях.

Оценка текущей успеваемости студентов определяется в баллах в соответствии рейтинг – планом, предусматривающем все виды учебной деятельности.

#### 5.5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

При выполнении самостоятельной работы студенты имеют возможность пользоваться специализированными источниками, приведёнными в разделе 9. «Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины» и *Internet*-ресурсами:

<http://www.so-cdu.ru> – сайт Системного оператора;

<http://www.fsk-ees.ru> – сайт Федеральной сетевой компании;

<http://www.e-m.ru> – сайт журнала «ЭнергоРынок»;

<http://www.oue.panor.ru> – сайт журнала «Оперативное управление в электроэнергетике. Подготовка персонала и поддержание его квалификации».

<http://www.eriras.ru> – сайт института энергетических исследований РАН.

### 6. Средства текущей и итоговой оценки качества освоения дисциплины

Для оценки качества освоения дисциплины при проведении контролируемых мероприятий предусмотрены следующие средства (фонд оценочных средств):

- вопросы входного контроля;
- контрольные вопросы, задаваемых при выполнении и защите лабораторных работ;
- контрольные вопросы, задаваемые при проведении практических занятий,
- вопросы для самоконтроля;
- вопросы, выносимые на экзамен.

Оценка качества освоения дисциплины производится по результатам следующих контролируемых мероприятий:

Контролирующие мероприятия	Результаты обучения по дисциплине
Выполнение и защита лабораторных работ	P2, P4, P5, P6
Презентации по тематике исследований во время проведения конференц-недели	P2, P4, P5, P6
Опрос студентов на практических занятиях	P2, P4, P5, P6
Экзамен	P2, P4, P5, P6

Для промежуточной аттестации подготовлен комплект билетов – 25 шт.; билеты содержат три типа заданий: теоретический вопрос; задача; тестовые задания, например,

#### Экзаменационный билет № 1

1. Дать определение терминам: «физическая модель», «натурная модель» (5 баллов).

2. Проинтегрировать методом Эйлера уравнение  $\dot{x} = x - t$  в пределах  $0 \leq t \leq 2$  с шагом  $h = 1$  при начальных условиях  $t_0 = 0$ ,  $x_0 = 2$  (10 баллов)..

3.

а) Записать аналитические выражения для построения вещественной и мнимой частотных характеристик инерционного (апериодического) звена (10 баллов)..

б) Для характеристического уравнения

$D(p) = a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$  известен коэффициент  $a_0 = 1$  и корни:  $p_1 = 2$ ,  $p_2 = -1 + j3$ ,

$p_3 = -1 - j3$ . Найти численное значение  $a_3$  (15 баллов).

### 7. Рейтинг качества освоения дисциплины

Оценка качества освоения дисциплины в ходе текущей и промежуточной аттестации обучающихся осуществляется в соответствии с приказом ректора № 88/од от 27.12.2013 г. «Положение о проведении текущего оценивания и промежуточной аттестации в ТПУ».

В соответствии с «Календарным планом изучения дисциплины»:

- текущая аттестация (оценка качества усвоения теоретического материала (ответы на вопросы и др.) и результаты практической деятельности (решение задач, выполнение заданий, решение проблем и др.) производится в течение семестра (оценивается в баллах (максимально 60 баллов), к моменту завершения семестра студент должен набрать не менее 33 баллов);
- промежуточная аттестация (экзамен, зачёт) производится в конце семестра (оценивается в баллах (максимально 40 баллов), на экзамене (зачёте) студент должен набрать не менее 22 баллов).

Итоговый рейтинг по дисциплине определяется суммированием баллов, полученных в ходе текущей и промежуточной аттестаций. Максимальный итоговый рейтинг соответствует 100 баллам.

## **8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### *Основная литература:*

1. Хрущев Ю.В. Методы расчёта устойчивости энергосистем. Учебное пособие. – Томск: изд. ТПУ, 2005. – 176с.
2. Дьяконов, В. П. Энциклопедия компьютерной алгебры [Электронный ресурс] / В. П. Дьяконов. - М.: ДМК Пресс, 2010. - 1264 с. Схема доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=1179](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=1179).
3. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. — 4-е изд., перераб. и доп.— Москва: ЭНАС, 2012. — 376 с.
4. Правила устройства электроустановок. — Москва: КноРус, 2014. — 488 с. + CD-ROM. — Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2014 г.
5. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Российская Федерация, Министерство энергетики (Минэнерго России). — Москва: Омега-Л, 2012. — 255 с. — Безопасность и охрана труда. — Утверждено приказом Минэнерго России от 19.06.2003 №229.
6. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – 8-е изд. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2011. – 314 с.

### *Дополнительная литература:*

1. Ракитин, Валентин Иванович Руководство по методам вычислений и приложения МATHCAD: учебное пособие / В. И. Ракитин. — Москва: Физматлит, 2005. — 264 с.
2. Демидович Б.П. Основы вычислительной математики : учебное пособие / Б. П. Демидович, И. А. Марон. — 7-е изд., стер.. — СПб.: Лань, 2009. — 672 с.
3. Гуревич Ю.С., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390с.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов.— 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Высш. шк., 1985.— 536 с.

5. Бермант А.Ф. Краткий курс математического анализа: учебное пособие / А. Ф. Бермант, И. Г. Араманович. — 16-е изд., стер.. — СПб.: Лань, 2010. — 736 с.

6. Методические указания по устойчивости энергосистем / Министерство энергетики Российской Федерации. — Москва: НЦ ЭНАС, 2004. — 16 с. — Утверждено Приказом Минэнерго России от 30 июня 2003 г. № 277.

### 9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для обеспечения дисциплины используются следующие специализированные аудитории:

/п	Наименование (компьютерные классы, учебные лаборатории, оборудование)	Корпус, ауд.
	Компьютерные классы: компьютеры на базе Intel Core 2 Duo E4600 – 15 шт.; лицензионное программное обеспечение.	8 уч. корпус, 119, 120, 121, 126 ауд.
	Специализированные лекционные аудитории с количеством мест от 100 человек: 101, 201, 301, 328	8 уч. корпус
	Специализированные аудитории для практических занятий с количеством мест не менее 30: 325, 326, 327, 330, 331, 346, 315, 316, 317, 310, 312, 306	8 уч. корпус

Программа составлена на основе Стандарта ООП ТПУ в соответствии с требованиями ФГОС по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» и профилям подготовки: «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надёжность», «Энергосбережение и энергоэффективность».

Программа одобрена на заседании кафедры ЭСиЭ ЭНИН (протокол № 35 от «18» июня 2015 г.).

Автор:



Хрущев Ю.В., профессор каф. ЭСиЭ

Рецензент:

Фикс Н.П., доцент каф. ЭСиЭ