

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Галунин Сергей Александрович  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 24.05.2023 10:11:41  
Уникальный программный ключ:  
08ef34338325bdb0ac5a47baa5472ce36cc3fc3b

Приложение к ОПОП  
«Электрооборудование и автома-  
тика судов»



**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)»**  
**(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

---

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

**ДИСЦИПЛИНЫ**

**«ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ»**

для подготовки бакалавров

по направлению

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

по профилю

«Электрооборудование и автоматика судов»

Санкт-Петербург

2022

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Разработчики:

доцент, к.т.н., с.н.с. Второв В.Б.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры САУ  
14.02.2022, протокол № 02-2/2022

Рабочая программа рассмотрена и одобрена учебно-методической комиссией  
ФЭА, 22.02.2022, протокол № 2

Согласовано в ИС ИОТ

Начальник ОМОЛА Загороднюк О.В.

## 1 СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

|   |     |
|---|-----|
| Обеспечивающий факультет  | ФЭА |
| Обеспечивающая кафедра  | САУ |
| Общая трудоемкость (ЗЕТ)  | 4   |
| Курс  | 4   |
| Семестр   | 8   |
| <b>Виды занятий</b>   |     |
| Лекции (академ. часов)  | 30  |
| Практические занятия (академ. часов)                                | 30  |
| Иная контактная работа (академ. часов)                              | 1   |
| Все контактные часы (академ. часов)                                 | 61  |
| Самостоятельная работа, включая часы на контроль<br>(академ. часов) | 83  |
| Всего (академ. часов)   | 144 |
| <b>Вид промежуточной аттестации</b>                                 |     |
| Зачет (курс)  | 4   |

## **2 АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **«ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ»**

В дисциплине изучаются математические методы анализа устойчивости динамических систем: первый метод Ляпунова, метод функций Ляпунова, методы анализа устойчивости линейных систем, не изучавшиеся в базовом курсе теории автоматического управления. Рассматриваются методы синтеза законов управления динамическими объектами, использующие теорию устойчивости, в частности алгоритм скоростного градиента. Даются основные понятия и результаты по устойчивости, грубости и робастности неопределенных систем.

### **SUBJECT SUMMARY**

### **«FUNDAMENTALS OF MATHEMATICAL STABILITY THEORY»**

The discipline studies mathematical methods for analyzing the stability of dynamical systems: the first Lyapunov's method, the method of Lyapunov functions, methods for analyzing the stability of linear systems, which were not studied in the basic course of automatic control theory. Methods of synthesis of dynamic object control laws are considered, using the theory of stability, in particular the Speed Gradient Algorithm. Basic concepts and results on stability and robustness of uncertain systems are given.

## 3 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 3.1 Цели и задачи дисциплины

1. Цель дисциплины -приобретение базовых знаний по математической теории устойчивости динамических систем и формирование умений и навыков применения ее методов в профессиональной деятельности.

2. Задачи дисциплины:

Изучение математических методов исследования устойчивости движения и состояний равновесия линейных и нелинейных систем автоматического управления.

Освоение методов синтеза законов управления на основе теории устойчивости.

3. Знания математических методов исследования устойчивости движения и состояний равновесия линейных и нелинейных систем управления:

-методов линеаризации;

-первого метода Ляпунова;

-типов квадратичных форм;

-теорем второго метода Ляпунова об устойчивости и неустойчивости;

-методов построения функций Ляпунова;

-методов синтеза систем с позиций теории устойчивости.

4. Умения:

как линеаризовать нелинейные математические модели систем;

как строить функции Ляпунова;

как определять тип квадратичных форм;

как применять теорию устойчивости для обеспечения сходимости процессов адаптивного управления динамическими объектами.

5. Навыки анализа устойчивости с помощью первого и второго методов Ляпунова, алгоритма скоростного градиента, харитоновских методов, методов ана-

лиза устойчивости линейных систем.

### **3.2 Место дисциплины в структуре ОПОП**

Дисциплина изучается на основе ранее освоенных дисциплин учебного плана:

1. «Алгебра и геометрия»
2. «Теория автоматического управления»

и обеспечивает подготовку выпускной квалификационной работы.

### 3.3 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

В результате освоения образовательной программы обучающийся должен достичь следующие результаты обучения по дисциплине:

| <b>Код компетенции/<br/>индикатора<br/>компетенции</b> | <b>Наименование компетенции/индикатора компетенции</b>   |
|--|--|
| СПК-3  | Способен разрабатывать технические решения по проектированию судовых электроприводов, судовых электроэнергетических систем, гребных электрических установок, электротехнических комплексов единых электроэнергетических систем, используя средства автоматизации проектирования по отработанным прототипам |
| <i>СПК-3.1</i>   | <i>Обосновывает выбор целесообразного решения</i>  |
| <i>СПК-3.2</i>   | <i>Выполняет сбор и анализ данных для проектирования</i>   |

## 4 СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1 Содержание разделов дисциплины

#### 4.1.1 Наименование тем и часы на все виды нагрузки

| № п/п | Наименование темы дисциплины   | Лек, ач | Пр, ач | ИКР, ач | СР, ач |
|-------|--|---------|--------|---------|--------|
| 1     | Тема 1. Особенности нелинейных систем. Математические модели динамических систем                     | 2       | 1      |         | 3      |
| 2     | Тема 2. Линеаризация нелинейных математических моделей   | 4       | 2      |         | 7      |
| 3     | Тема 3. Квадратичные формы.  | 4       | 4      |         | 16     |
| 4     | Тема 4. Решение матричного уравнения состояния. Состояние равновесия динамической системы            | 1       | 2      |         | 8      |
| 5     | Тема 5. Устойчивость состояний равновесия и решений дифференциальных уравнений Первый метод Ляпунова | 4       | 4      |         | 8      |
| 6     | Тема 6. Некоторые методы анализа устойчивости линейных систем  | 1       | 2      |         | 4      |
| 7     | Тема 7. Второй метод Ляпунова  | 4       | 6      |         | 16     |
| 8     | Тема 8. Методы построения функций Ляпунова   | 2       | 2      |         | 6      |
| 9     | Тема 9. Применение методов теории устойчивости в задачах синтеза адаптивных систем                   | 3       | 4      | 1       | 6      |
| 10    | Тема 10. Алгоритм скоростного градиента  | 3       | 2      | 0       | 6      |
| 11    | Тема 11. Управление неопределенными системами  | 2       | 1      |         | 3      |
|       | Итого, ач  | 30      | 30     | 1       | 83     |
|       | Из них ач на контроль  | 0       | 0      | 0       | 0      |
|       | Общая трудоемкость освоения, ач/зе   | 144/4   |        |         |        |

#### 4.1.2 Содержание

| № п/п | Наименование темы дисциплины   | Содержание   |
|-------|--|--|
| 1     | Тема 1. Особенности нелинейных систем. Математические модели динамических систем | Виды математических моделей динамических систем. Нелинейные системы. Статические и динамические нелинейные звенья. Уравнения нелинейных систем. Описание нелинейных систем в пространстве состояний.   |
| 2     | Тема 2. Линеаризация нелинейных математических моделей                           | Линеаризация нелинейной статической характеристики – функции одной переменной – методом разложения в ряд Тейлора. Линеаризация функции нескольких переменных. Линеаризация уравнений в форме переменных состояния. Практические методы линеаризации. |



| № п/п | Наименование темы дисциплины   | Содержание  |
|-------|--|---|
| 3     | Тема 3. Квадратичные формы.  | Знакоопределенные (положительно и отрицательно определенные) и знакопостоянные (положительно полуопределенные и отрицательно полуопределенные) квадратичные формы и соответствующие им матрицы. Неопределенные (знакопеременные) квадратичные формы. Критерий Сильвестра. Связь между типом матрицы и ее собственными значениями. Функции Ляпунова. |
| 4     | Тема 4. Решение матричного уравнения состояния. Состояние равновесия динамической системы            | Переходная матрица. Матричная экспонента и методы ее определения. Формула Коши. Состояние равновесия. Методы определения состояний равновесия.  |
| 5     | Тема 5. Устойчивость состояний равновесия и решений дифференциальных уравнений Первый метод Ляпунова | Устойчивость состояния равновесия. Устойчивость по Ляпунову и асимптотическая устойчивость («в малом» и «в целом»). Устойчивость решений дифференциальных уравнений. Первый метод Ляпунова.   |
| 6     | Тема 6. Некоторые методы анализа устойчивости линейных систем  | Критерии устойчивости Рауса, Льенара-Шипара, Михайлова, Липатова-Соколова.  |
| 7     | Тема 7. Второй метод Ляпунова  | Функции Ляпунова. Метод функций Ляпунова в анализе и синтезе нелинейных систем. Теоремы Ляпунова, Красовского и Барбашина-Красовского об устойчивости и асимптотической устойчивости. Теоремы Ляпунова и Четаева о неустойчивости движения. Уравнение Ляпунова.   |
| 8     | Тема 8. Методы построения функций Ляпунова   | Метод неопределенных коэффициентов. Функции Ляпунова вида «квадратичная форма плюс интеграл от нелинейности»  |
| 9     | Тема 9. Применение методов теории устойчивости в задачах синтеза адаптивных систем                   | Некоторые результаты матричной алгебры. Уравнения адаптивной системы с эталонной моделью (АСЭМ). Синтез алгоритма параметрической адаптации в АСЭМ на основе второго метода Ляпунова. Уравнения и структура АСЭМ.   |
| 10    | Тема 10. Алгоритм скоростного градиента  | Алгоритм скоростного градиента и его применение к синтезу адаптивной системы.   |
| 11    | Тема 11. Управление неопределенными системами  | Неопределенные объекты и системы. Грубость и робастность. Задача адаптивного управления. Интервальные системы. Теоремы Харитонова.  |

#### 4.2 Перечень лабораторных работ

Лабораторные работы не предусмотрены.

#### 4.3 Перечень практических занятий

| <b>Наименование практических занятий</b>   | <b>Количество ауд. часов</b> |
|--|------------------------------|
| 1. Составление уравнений нелинейных систем в форме переменных состояния  | 1                            |
| 2. Линеаризация уравнений динамических систем  | 2                            |
| 3. Квадратичные формы. Определение типа матриц на основе критерия Сильвестра и анализа собственных значений матриц | 4                            |
| 4. Практикум по некоторым результатам матричной алгебры. Решение уравнений состояния                               | 2                            |
| 5. Состояния равновесия динамической системы. Анализ устойчивости на основе первого метода Ляпунова                | 4                            |
| 6. Анализ устойчивости линейных и нелинейных систем методом функций Ляпунова. Уравнение Ляпунова                   | 6                            |
| 7. Методы построения функций Ляпунова  | 2                            |
| 8. Критерии устойчивости Михайлова, Рауса, Льенара-Шипара и Липатова-Соколова                                      | 2                            |
| 9. Алгоритм скоростного градиента  | 2                            |
| 10. Синтез алгоритма параметрической адаптации в АСЭМ на основе второго метода Ляпунова                            | 4                            |
| 11. Анализ устойчивости интервальных систем  | 1                            |
| Итого  | 30                           |

#### **4.4 Курсовое проектирование**

Курсовая работа (проект) не предусмотрены.

#### **4.5 Реферат**

Реферат не предусмотрен.

#### **4.6 Индивидуальное домашнее задание**

Цель ИДЗ - контроль освоения материала тем "Линеаризация нелинейных математических моделей" и "Квадратичные формы".

Содержание ИДЗ:

1 Линеаризация заданной функции нескольких переменных. Линеаризация заданной системы уравнений в форме переменных состояния

2. Определение типа заданной квадратичной формы или матрицы.

Оформление ИДЗ по общепринятым в университете «Требования к оформле-

нию научно-технических отчетов». Ограничений по количеству страниц в ИДЗ нет. Срок сдачи ИДЗ преподавателю - через две недели с момента выдачи задания. ИДЗ сдается преподавателю на проверку на бумажном носителе.

#### **4.7 Доклад**

Доклад не предусмотрен.

#### **4.8 Кейс**

Кейс не предусмотрен.

#### **4.9 Организация и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы**

Изучение дисциплины сопровождается самостоятельной работой студентов с рекомендованными преподавателем литературными источниками и информационными ресурсами сети Интернет.

Планирование времени для изучения дисциплины осуществляется на весь период обучения, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного материала. Обучающимся, в рамках внеаудиторной самостоятельной работы, необходимо регулярно дополнять сведениями из литературных источников материал, законспектированный на лекциях. При этом на основе изучения рекомендованной литературы целесообразно составить конспект основных положений, терминов и определений, необходимых для освоения разделов учебной дисциплины.

Особое место уделяется консультированию, как одной из форм обучения и контроля самостоятельной работы. Консультирование предполагает особым образом организованное взаимодействие между преподавателем и студентами, при этом предполагается, что консультант либо знает готовое решение, которое он может предписать консультируемому, либо он владеет способами деятель-

ности, которые указывают путь решения проблемы.

| <b>Текущая СРС</b>  | <b>Примерная<br/>трудоемкость, ач</b> |
|---|---------------------------------------|
| Работа с лекционным материалом, с учебной литературой   | 20                                    |
| Опережающая самостоятельная работа (изучение нового материала до его изложения на занятиях)                 | 0                                     |
| Самостоятельное изучение разделов дисциплины  | 20                                    |
| Выполнение домашних заданий, домашних контрольных работ   | 20                                    |
| Подготовка к лабораторным работам, к практическим и семинарским занятиям                                    | 0                                     |
| Подготовка к контрольным работам, коллоквиумам  | 20                                    |
| Выполнение расчетно-графических работ   | 0                                     |
| Выполнение курсового проекта или курсовой работы  | 0                                     |
| Поиск, изучение и презентация информации по заданной проблеме, анализ научных публикаций по заданной теме   | 0                                     |
| Работа над междисциплинарным проектом   | 0                                     |
| Анализ данных по заданной теме, выполнение расчетов, составление схем и моделей, на основе собранных данных | 0                                     |
| Подготовка к зачету, дифференцированному зачету, экзамену   | 3                                     |
| <b>ИТОГО СРС</b>  | <b>83</b>                             |

## 5 Учебно-методическое обеспечение дисциплины

### 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

| № п/п                     | Название, библиографическое описание   | К-во экз. в библи. |
|---------------------------|--|--------------------|
| Основная литература       |  |                    |
| 1                         | Мирошник, Илья Васильевич. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы [Текст] : учеб. пособие для вузов по группе направлений подгот. бакалавров и магистров 550000 - "Техн. науки" и диплом. специалистов 650000 - "Техника и технологии" дисциплине "Теория автомат. управления" / И.В. Мирошник, 2006. -271 с. | 51                 |
| 2                         | Демидович, Борис Павлович. Лекции по математической теории устойчивости [Текст] : Учеб. пособие для вузов по направлению и специальности "Математика" / Б.П.Демидович, 1998. -480 с.   | 32                 |
| Дополнительная литература |  |                    |
| 1                         | Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления [Текст] : Учеб. для вузов по машиностроит. и приборостроит. специальностям / К.А.Пупков, Н.Д.Егупов, А.И.Гаврилов и др.; Под ред. Н.Д.Егупова, 2001. -743 с.   | 12                 |
| 2                         | Фомин, Владимир Николаевич. Адаптивное управление динамическими объектами [Текст] / В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, В.А. Якубович, 1981. -447 с.   | 11                 |

### 5.2 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», используемых при освоении дисциплины

| № п/п | Электронный адрес   |
|-------|---|
| 1     | Матросов В.М., Козлов Р.И., Матросова Н.И. Теория устойчивости многокомпонентных нелинейных систем. Издательство "Физматлит", 2007, с. 184. <a href="https://e.lanbook.com/book/59482">https://e.lanbook.com/book/59482</a> |

### 5.3 Адрес сайта курса

Адрес сайта курса: <https://vec.etu.ru/moodle/course/view.php?id=12992>

## **6 Критерии оценивания и оценочные материалы**

### **6.1 Критерии оценивания**

Для дисциплины «Основы математической теории устойчивости» формой промежуточной аттестации является зачет. Оценивание качества освоения дисциплины производится с использованием рейтинговой системы.

## **Особенности допуска**

Условия допуска к зачету:

подготовка и сдача ИДЗ;

выполнение каждой из 2 контрольных работ не менее, чем на 21 балл.

Зачет выставляется в форме недифференцированной оценки. Для получения оценки "зачтено" студентам необходимо набрать за курс не менее 50 баллов (сумма баллов за контрольные работы и ИДЗ).

## **6.2 Оценочные материалы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине**

### **Образцы задач (заданий) для контрольных (проверочных) работ**

#### **Вопросы к первой контрольной работе по курсу ОМТУ**

##### *Теоретические вопросы*

1. Линеаризация функции нескольких переменных (подробное обоснование).
2. Линеаризация уравнений в форме переменных состояния (подробное обоснование).
3. Состояние равновесия (определение, метод нахождения).
4. Устойчивость по Ляпунову и асимптотическая устойчивость (определения).
5. Критерий устойчивости Михайлова (формулировка, графическая иллюстрация, в том числе нахождения на границе устойчивости).
6. Первый метод Ляпунова (теорема).

##### *Задачи*

1. Линеаризовать заданную нелинейную функцию нескольких переменных в окрестности заданной точки.

2. Определить с. з.  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и сделать заключение о типе матрицы  $R$  (п. о., о. о. и т. д).

3. Для квадратичной формы  $Q(x_1, x_2) = \dots\dots\dots = x^T R x$  записать матрицу  $R$  и определить ее тип с помощью критерия Сильвестра.

***Контрольная работа рассчитана на два академических часа. Каждому студенту будет составлен индивидуальный набор теоретических вопросов и задач из вышеприведенных перечней.***

Весь комплект контрольно-измерительных материалов для проверки сформированности компетенции (индикатора компетенции) размещен в закрытой части по адресу, указанному в п. 5.3



### 6.3 График текущего контроля успеваемости

| Неделя | Темы занятий  | Вид контроля       |
|--------|---|--------------------|
| 6      | Тема 2. Линеаризация нелинейных математических моделей<br>Тема 3. Квадратичные формы. | ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ |
| 7      | Тема 6. Некоторые методы анализа устойчивости линейных систем                         | Контрольная работа |
| 9      | Тема 7. Второй метод Ляпунова   | Контрольная работа |

### 6.4 Методика текущего контроля

#### на лекционных занятиях

Текущий контроль включает в себя контроль посещаемости (не менее **80** % занятий), по результатам которого студент получает допуск к зачету.

#### на практических (семинарских) занятиях

Текущий контроль включает в себя контроль посещаемости (не менее **80** % занятий), по результатам которого студент получает допуск к зачету.

В ходе проведения семинарских и практических занятий целесообразно привлечение студентов к как можно более активному участию в дискуссиях, решении задач, обсуждениях и т. д. При этом активность студентов также может учитываться преподавателем, как один из способов текущего контроля на практических занятиях.

Текущий контроль проводится по результатам ИДЗ и две контрольные работы - на 7 и 9 неделях. Рейтинг студента вычисляется как взвешенная сумма оценок за ИДЗ и 2 контрольные работы (с максимальным значением 100) с равными весовыми коэффициентами.

Каждая контрольная работа содержит несколько теоретических вопросов и несколько задач. максимальная оценка за контрольную работу **40 баллов**.

Индивидуальное задание оценивается **максимально в 20 баллов**.

Для допуска к зачёту за каждую контрольную работу студент должен по-

лучить не менее 21 балла.

### **самостоятельной работы студентов**

Контроль самостоятельной работы студентов осуществляется на лекционных и практических занятиях студентов по методикам, описанным выше.

## 7 Описание информационных технологий и материально-технической базы

| Тип занятий            | Тип помещения                        | Требования к помещению   | Требования к программному обеспечению  |
|------------------------|--------------------------------------|--|--|
| Лекция                 | Лекционная аудитория                 | Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, компьютер или ноутбук, проектор, экран, меловая или маркерная доска       | 1) Windows 7 и выше;<br>2) Microsoft Office 2007 и выше                              |
| Практические занятия   | Аудитория                            | Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, меловая или маркерная доска   |  |
| Самостоятельная работа | Помещение для самостоятельной работы | Оснащено компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета. | 1) Windows 7 и выше;<br>2) Microsoft Office 2007 и выше<br>3) Matlab R2014b или выше |

## **8 Адаптация рабочей программы для лиц с ОВЗ**

Адаптированная программа разрабатывается при наличии заявления со стороны обучающегося (родителей, законных представителей) и медицинских показаний (рекомендациями психолого-медико-педагогической комиссии). Для инвалидов адаптированная образовательная программа разрабатывается в соответствии с индивидуальной программой реабилитации.

## ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

| <b>№<br/>п/п</b> | <b>Дата</b> | <b>Изменение</b> | <b>Дата и номер протокола<br/>заседания УМК</b> | <b>Автор</b> | <b>Начальник<br/>ОМОЛА</b> |
|------------------|-------------|------------------|---|--------------|----------------------------|
|                  |             |                  |   |              |                            |
|                  |             |                  |   |              |                            |
|                  |             |                  |   |              |                            |
|                  |             |                  |   |              |                            |
|                  |             |                  |   |              |                            |