

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**М. Н. Кириллов, А. Н. Назаркина**

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ / TRANSIENT  
EFFECTS IN ELECTRICAL SYSTEMS**

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины  
для студентов магистратуры по направлению подготовки  
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»,  
(профиль Electrical Power Engineering and Electrical Engineering)

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2023

УДК 621.311

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики ФГБОУ ВО  
«Калининградский государственный технический университет»

И. Е. Кажекин

**Кириллов, М. Н.**

Переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб.-метод. пособие по изучению дисциплины для студ. магистратуры по направлению подгот. 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль Electrical Power Engineering and Electrical Engineering) / **М. Н. Кириллов, А. Н. Назаркина.** – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 18 с.

Табл. – 2, список лит. – 6 наименований

Учебно-методическое пособие рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией Института морских технологий, энергетики и строительства 29.11.2023 г., протокол № 13

УДК 621.311

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2023 г.  
© Кириллов М. Н., Назаркина А. Н., 2023 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
Содержание дисциплины .....	8
Методические указания по выполнению самостоятельной работы .....	13
Заключение .....	16
Рекомендуемая литература .....	17

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Transient Effects in Electrical Systems / Переходные процессы в электроэнергетических системах» входит в состав образовательной программы для студентов магистратуры по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

*Целью освоения дисциплины* является формирование систематизированных знаний в области переходных процессов как в энергетической системе в целом, так и в отдельных ее элементах, приобретение студентами навыков их расчета при трехфазных и несимметричных коротких замыканиях, а также при обрывах фаз, навыков расчета и анализа переходных режимов электрических систем и узлов нагрузки с учетом действия систем автоматического регулирования и управления.

Основные *задачи* изучения дисциплины заключаются в следующем:

- формирование у студентов прочной теоретической базы по анализу электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах;
- изучение влияния этих процессов на режимы работы электротехнического оборудования, электроэнергетические системы и их объекты;
- усвоение практических методов расчета и анализа режимов коротких замыканий и продольной несимметрии;
- освоение студентами математических моделей различных элементов электроэнергетической системы, в том числе, синхронных генераторов, асинхронных электродвигателей, трансформаторов и др.;
- получение знаний в области методов исследования переходных процессов.

В соответствии с требованиями основной профессиональной образовательной программы магистратуры по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», обучаемые должны:

*Знать:*

- классификацию и виды переходных процессов в электроэнергетических системах,
- методы расчета коэффициентов запаса статической и динамической устойчивости,
- особенности развития переходных процессов в синхронной машине при близкой и удаленной точке короткого замыкания,

- способы и возможности регулирования процессов в синхронных и асинхронных машинах,
- мероприятия по улучшению надежности и качества переходных процессов энергосистем.

*Уметь:*

- составить схему замещения при любом виде короткого замыкания,
- использовать комплексные схемы замещения при анализе сложных несимметричных повреждений,
- анализировать статическую и динамическую устойчивость в нерегулируемой и регулируемой системах.

*Владеть:*

- практическими критериями анализа статической и динамической устойчивости.

Для студентов учебным планом предусмотрены лекции и лабораторные работы.

*К оценочным средствам текущего контроля успеваемости относятся:*

- отчеты по лабораторным работам;
- тестовые задания.

Контроль текущей успеваемости осуществляется по результатам защиты отчетов по лабораторным работам.

Критерии оценивания:

Оценка «отлично» выставляется, если студент активно работает над выполнением задания на лабораторную работу, и показывает при этом глубокое овладение лекционным материалом, самостоятельно выполняет задания, знает расчетные соотношения, грамотно формирует отчет по лабораторной работе.

Оценка «хорошо» выставляется, если студент выполняет задания, но при этом требуется помощь преподавателя, допускает неточности, проявляет недостаточное умение построить модель и сопоставить ее работу с теоретическими положениями, не может четко сделать обобщения и выводы, допускает небрежность в подготовке отчета.

Оценка «удовлетворительно» выставляется в том случае, когда студент в целом выполнил задания, но требует усиленной помощи преподавателя, при защите отчета дает неполные ответы на вопросы, не может обобщить и сделать четкие логические выводы.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае, когда студент не выполняет задания на лабораторную работу, не знает теоретический материал, не понимает постановки задачи, допускает грубые ошибки в расчетной части, существенно нарушает требования к содержанию отчета.

Тестовые задания используются для оценки освоения студентами тем дисциплин модуля. Тестирование обучающихся проводится на занятиях после изучения на лекциях соответствующих разделов. В Фонде оценочных средств приведены типовые тестовые задания в приложении № 1.

По итогам выполнения тестовых заданий оценка выставляется по пятибалльной шкале в соответствии с критериями, представленными в табл. 1.

Таблица 1 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок	2	3	4	5
	0-40 %	41-60 %	61-80 %	81-100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
Критерий	«не зачтено»	«зачтено»		
<b>1 Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов</b>	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полной знаний и системным взглядом на изучаемый объект
<b>2 Работа с информацией</b>	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
<b>3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта</b>	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ра-

				курсы поставленной задачи
<b>4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач</b>	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

*Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме зачета и выставляется по результатам прохождения всех видов текущего контроля успеваемости.*

В учебно-методическом пособии содержатся:

- перечень разделов и тем, изучаемых в дисциплине;
- методические указания по выполнению самостоятельной работы;
- критерии оценивания;
- рекомендуемая литература.

# 1 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

## 1.1 Тематический план лекционных занятий.

Темы занятий приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Разделы и темы занятий по дисциплине

№ п/п	Темы занятий по дисциплине
1	<b>Тема 1.1.</b> Расчет установившихся исходных и квазипереходных режимов
2	<b>Тема 1.2.</b> Основные уравнения электромеханических переходных процессов
3	<b>Тема 1.3.</b> Простейшие методы оценки устойчивости
4	<b>Тема 1.4.</b> Статическая устойчивость
5	<b>Тема 1.5.</b> Изменения частоты и мощности в энергосистемах
6	<b>Тема 1.6.</b> Переходные процессы в узлах нагрузки при малых возмущениях
7	<b>Тема 1.7.</b> Переходные процессы в узлах нагрузки при больших возмущениях.
8	<b>Тема 1.8.</b> Переходные процессы при включении синхронных генераторов
9	<b>Тема 1.9.</b> Асинхронные режимы и результирующая устойчивость

На изучение каждой темы дисциплины выделяется не менее 2 академических часов лекционных занятий. Чтение лекций осуществляется традиционным способом с использованием технических средств обучения.

## 1.2 Содержание дисциплины

Предполагается, что студенты знакомы с основами матричного, векторного и операционного исчисления и освоили теорию электрических машин, работающих в установившемся режиме.

При изложении переходных процессов не учитывается насыщение магнитопроводов, несимметричные режимы рассматриваются в предположении электрической симметрии статора каждой из машин системы, а несимметрией обладает только сеть или статическая нагрузка.

В этом разделе расчет динамической устойчивости синхронного генератора выполнен на основе упрощенной и полной системы уравнений Парка-Горева. Матричные и дифференциальные уравнения решаются с помощью прикладного пакета программ MathCad.

### **Тема 1.1. Расчет установившихся исходных и квазипереходных режимов**

Построение схем замещения. Собственные и взаимные проводимости. Определение токов. Определение мощности. Максимальные и предельные нагрузки.

При изучении данной темы необходимо получить ясное представление о схемах замещения отдельных элементов электрической сети. Для этого рекомендуется повторить разделы курсов «Электрические системы и сети», а также «Электрические машины», посвященные схемам замещения трансформаторов, автотрансформаторов, синхронных и асинхронных машин, воздушных и кабельных линий.

Особое внимание необходимо обратить на построение угловых характеристик активной и реактивной мощности.

Форма проведения занятия: лекция.

Рекомендуемая литература: [п. 1, с. 110]

## **Тема 1.2 Основные уравнения электромеханических переходных процессов**

Система относительных единиц. Виды записи уравнений относительного движения ротора синхронного генератора.

При изучении данной темы необходимо обратить внимание на формы записи в относительных единицах моментов, мощностей и скоростей.

Форма проведения занятия: лекция.

Рекомендуемая литература: [п. 6, с. 511-516]

## **Тема 1.3. Простейшие методы оценки устойчивости**

Статическая устойчивость. Практические критерии статической устойчивости. Энергетическая трактовка практических критериев устойчивости. Динамическая устойчивость. Практические критерии динамической устойчивости. Предельный угол отключения короткого замыкания. Определение предельного времени отключения короткого замыкания.

При анализе статической устойчивости простейшей электрической системы рассматривается передача электрической энергии от удаленной электростанции к системе, мощность которой значительно превышает мощность данной станции. Это условие обеспечивает неизменность напряжения на шинах приемной системы независимо от величины передаваемой мощности. При изучении темы необходимо уяснить зависимость предела передаваемой мощности от ряда факторов: параметров системы, наличия и типа АРВ и т.д.

При расчетах динамической устойчивости ЭДС генераторов их реактивные сопротивления изменяются в течение переходного процесса, однако для упрощения расчетов предполагается, что ЭДС каждого генератора и

его переходные сопротивления остаются неизменными в течение всего рассматриваемого процесса.

При изучении практических методов оценки динамической устойчивости следует усвоить правило площадей и метод последовательных интервалов, который дает возможность получить картину протекания процесса во времени и применяется, в частности, для определения предельного времени отключения.

Форма проведения занятия: лекция.

Рекомендуемая литература: [п. 6, с. 58-87]

#### **Тема 1.4. Статическая устойчивость**

Исследования статической устойчивости методом малых колебаний. Математические критерии устойчивости. Анализ статической устойчивости нерегулируемой системы без учета электромагнитных переходных процессов. Учет автоматического регулирования возбуждения при расчете статической устойчивости.

Форма проведения занятия: лекция.

Рекомендуемая литература: [п. 6, с. 231-255]

#### **Тема 1.5. Изменения частоты и мощности в энергосистемах**

Характер изменений частоты и виды ее регулирования. Статические характеристики системы при изменении частоты, лавина частоты. Автоматическая разгрузка по частоте.

Особое внимание при изучении данной темы следует уделить причинам возникновения и характеру протекания лавины частоты, а также мероприятиям, препятствующим ее появлению.

Форма проведения занятия: лекция.

Рекомендуемая литература: [п. 6, с. 294-311]

#### **Тема 1.6. Переходные процессы в узлах нагрузки при малых возмущениях**

Статические и динамические характеристики двигательной нагрузки. Лавина напряжения. Практические критерии статической устойчивости комплексной нагрузки. Медленные понижения напряжения. Процесс опрокидывания двигателей.

Форма проведения занятия: лекция.

Рекомендуемая литература: [п. 6, с. 328-350]

### **Тема 1.7. Переходные процессы в узлах нагрузки при больших возмущениях**

Динамические и квазидинамические характеристики нагрузки. Пуск двигателей. Резкие изменения режима в системах электроснабжения. Толчкообразные нагрузки. Самозапуск двигателей. Самовозбуждение асинхронных двигателей во время пуска при последовательной емкостной компенсации в сети. Влияние АПВ, АВР и АРВ синхронных двигателей на переходные процессы в узлах нагрузки.

При рассмотрении данной темы особое внимание следует обратить на протекание процессов пуска и самозапуска двигателей и их влияние на режим работы системы. Необходимо также подробно рассмотреть влияние резких изменений нагрузки на валу двигателя и напряжения на его выводах на устойчивость двигателя.

Форма проведения занятия: лекция.

Рекомендуемая литература: [п. 6, с. 362-412]

### **Тема 1.8 Переходные процессы при включении синхронных генераторов**

Синхронизация и самосинхронизация генераторов. Процессы при самосинхронизации. АПВ с самосинхронизацией и без контроля синхронизма.

При рассмотрении данной темы особое внимание следует уделить условиям, при которых происходит синхронизация генераторов, характеру протекания процесса самосинхронизации, в том числе при АПВ.

Форма проведения занятия: лекция.

Рекомендуемая литература: [п. 6, с. 425-436]

### **Тема 1.9 Асинхронные режимы и результирующая устойчивость**

Асинхронные режимы в электрических системах. Характеристики режима простейшей системы при несинхронной скорости синхронной машины. Выпадение из синхронизма, асинхронный ход и ресинхронизация. Результирующая устойчивость.

При изучении данной темы следует обратить внимание на причины, вызывающие асинхронный режим генератора, и особенности этого режима. В асинхронном режиме генератор, кроме моментов, обусловленных его возбуждением, развивает еще и асинхронный момент. При различных скоростях вращения ротора генератора и магнитного поля статора асинхронный момент обуславливается свободными токами, наводимыми в обмотке возбуждения и демпферных контурах, и имеет пульсирующий характер.

Асинхронный момент может быть представлен в виде двух составляющих: среднего асинхронного момента и знакопеременного. Знакопеременная составляющая асинхронного момента не оказывает существенного влияния на протекание асинхронного режима и, следовательно, этой составляющей в расчетах можно пренебречь. В тот момент, когда мгновенное значение скольжения генератора становится равным нулю, генератор из режима асинхронного хода при включении АРВ переходит в режим синхронных качаний, т.е. происходит его ресинхронизация. Успешная ресинхронизация после асинхронного хода определяет результирующую устойчивость системы.

Форма проведения занятия: лекция.

Рекомендуемая литература: [п. 6, с. 444-476]

### *1.3 Тематический план лабораторных работ*

Темы лабораторных работ:

Лабораторная работа №1. Внезапное короткое замыкание в простейшей трехфазной цепи;

Лабораторная работа №2. Исследование влияния состава дифференциальных уравнений синхронной машины на переходный процесс при коротком замыкании якоря;

Лабораторная работа №3. Статическая устойчивость электрической системы.

## 2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

### 2.1 Общие положения о самостоятельной работе

Самостоятельная работа студентов – выполняемая студентами в аудиторное и внеаудиторное время учебная деятельность, методически организованная преподавателем, без его непосредственного участия. Самостоятельная работа студентов является обязательной неотъемлемой частью образовательного процесса.

Цели самостоятельной работы:

- систематизация, углубление, расширение и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений и навыков обучающихся;
- формирование умений использовать нормативную, справочную документацию, учебную и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности, творческой инициативы, самостоятельности, ответственности, организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, совершенствованию и самоорганизации;
- формирование профессиональных компетенций;
- развитие исследовательских умений.

Самостоятельная работа студентов в данной дисциплине реализуется в виде внеаудиторной самостоятельной работы – планируемой учебной деятельности студентов, выполняемой ими вне аудиторных занятий, самостоятельно, по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия. Внеаудиторная самостоятельная работа включает следующие формы:

- подготовка к лекциям;
- подготовка к лабораторным занятиям;
- конспектирование источников;
- работа с электронными ресурсами;
- чтение учебной литературы, конспектов лекций.

Задачи преподавателя по организации самостоятельной работы студента заключаются в следующем:

- информирование о разделах дисциплины, которые будут изучены самостоятельно;
- информирование о формах самостоятельной работы, сроках выполнения и формах контроля;
- разработка и выдача заданий для самостоятельной работы;
- проведение консультаций по вопросам выполнения заданий;

- контроль хода выполнения и результатов самостоятельной работы.

Контроль самостоятельной работы студентов осуществляется в процессе изучения дисциплины, а также в период проведения текущих консультаций. Используются следующие формы контроля самостоятельной работы:

- устные опросы;
- проверка отчетов по лабораторным работам;
- зачет.

## *2.2 Методические рекомендации по отдельным формам самостоятельной работы*

### **Самостоятельная работа с литературой**

Самостоятельная работа с учебниками, книгами, статьями является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации. От того, насколько осознана читающим собственная внутренняя установка при обращении к источнику (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.), во многом зависит эффективность обучения.

Выделяют четыре основные установки в чтении специальной литературы:

- информационно-поисковая (найти, выделить искомую информацию);
- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает готовность в том или ином виде использовать суждения автора, ход его мыслей, дополнить их, подвергнуть проверке).

Основным видом систематизированной записи прочитанного является конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект позволяет всесторонне охватить содержание материала. Читая и конспектируя тот или иной раздел источника, необходимо твердо усвоить основные определения электрических величин и понятий, те закономерности, которыми определяется связь и зависимость одних величин от других. Формулировки основных законов и методике вывода их математических выражений надо знать на память.

Особенно настоятельно рекомендуется выполнять рукописное изложение пройденного материала ходе изучения сложных вопросов: записать в тетрадь определения, выводы формул, начертить схемы, графики. Хорошим методом контроля усвоения материала являются ответы на вопросы для самопроверки.

### **Подготовка к лабораторным работам**

При подготовке к лабораторной работе обучающемуся необходимо изучить лекционный материал по заданной теме, рекомендованные основную и дополнительную литературу; запомнить определения базовых понятий по выполняемой работе; соотнести теоретический материал по осваиваемой теме с теоретическим материалом по ранее изученным темам осваиваемого курса; также выполнить задания, рекомендованные для самостоятельного решения при подготовке к занятию.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В учебно-методическом пособии даны рекомендации по изучению дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах». Объем сведений, рассматриваемых на аудиторных занятиях по данной дисциплине, обеспечивает формирование базового уровня знаний и умений студентов и предполагает значительный объем самостоятельной работы для более широкого и качественного освоения основных тем дисциплины.

В пособии содержатся рекомендации по изучению теоретического материала и самостоятельной подготовке. Знания, умения и навыки в соответствующем разделе электроэнергетики и электротехники, приобретенные в ходе изучения дисциплины, позволят будущим специалистам в дальнейшем успешно решать практические задачи в профессиональной деятельности.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Лозовенко, В.И. Переходные процессы в синхронных машинах. Учебное пособие / В.И. Лозовенко. – Калининград: КГТУ, 2002. – 174 с.
2. ГОСТ 26522-85. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения: Межгосударственный стандарт: дата введения 1986.07.01 / Офиц. переиздание. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 12 с.
3. Долгов, А. П. Переходные режимы и устойчивость электроэнергетических систем: учебник / А. П. Долгов. – Новосибирск: НГТУ, 2022. – 258 с. – ISBN 978-5-7782-4678-2. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/306263> (дата обращения: 19.11.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Важнов, А.И. Основы теории переходных процессов синхронной машины / А. И. Важнов. – Москва; Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 312 с.
5. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник / С. А. Ульянов. – Москва: Энергия, 1970. – 518 с.
6. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. для электроэнергет. спец вузов / В. А. Веников. – 4 изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 1985. – 536 с.

Локальный электронный методический материал

Михаил Николаевич Кириллов  
Александра Николаевна Назаркина

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*Редактор И. Голубева*

Уч.-изд. л. 1,5. Печ. л. 1,1.

Издательство федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет».  
236022, Калининград, Советский проспект, 1