***На правах рукописи***

Минобрнауки России

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

**«Оренбургский государственный университет»**

Кафедра электро- и теплоэнергетики

**Методические указания по освоению дисциплины**

*«М.1.В.ОД.5 Статическая и динамическая устойчивость энергосистем»*

Уровень высшего образования

МАГИСТРАТУРА

Направление подготовки

*13.03.02 Электроэнергетика и электротехника*

(код и наименование направления подготовки)

*Автоматизированные энергетические системы и комплексы*

(наименование направленности (профиля) образовательной программы)

Тип образовательной программы

*Программа академического магистратуры*

Квалификация

*Магистр*

Форма обучения

*Очная*

Год набора 2023

Составители \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Пилипенко В.Т.

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании кафедры электро- и теплоэнергетики «\_\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20\_\_\_\_г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Соколов В.Ю.

Методические указания является приложением к рабочей программе по дисциплине Статическая и динамическая устойчивость энергосистем, зарегистрированной в ЦИТ под учетным номером\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Содержание**

|  |  |
| --- | --- |
| 1 Методические указания по лекционным занятиям ………………........ | 4 |
| 2 Методические указания по практическим занятиям ………………….. | 10 |
| 3 Методические указания по лабораторным занятиям …..…………...... | 12 |
| 4 Методические указания по самостоятельной работе …..…………..... | 12 |
| 4.1 Методические указания по выполнению курсовой работы…………… | 12 |
| 5 Методические указания по промежуточной аттестации по дисциплине | 12 |
| Список рекомендованных источников……………………………………… | 13 |

**1 Методические указания по лекционным занятиям**

**1.1 Общий подход к анализу устойчивости**

**1.1.1 Программа**

Классификация видов устойчивости. Устойчивость «в малом».

Графическая иллюстрация определения устойчивости по Ляпунову.

Теоремы Ляпунова. Оценка устойчивости системы по корням характеристического уравнения.

Устойчивость «в большом». Устойчивость «в целом».

**1.1.2 Методические указания**

Материал этого раздела очень важен при изучении всех последующих разделов курса и поэтому студент должен прочно его усвоить. Основное внимание необходимо обратить на различия в видах устойчивости.

На электроэнергетическую систему всегда действуют различные возмущения, которые могут нарушить её устойчивую работу. Поэтому в общем случае рассматривая нелинейные системы, к которым относятся и электроэнергетические системы, вводят понятия устойчивости «в малом», «в большом» и «в целом». Система устойчива «в малом», если констатируют лишь факт наличия области устойчивости, но не определяют каким-либо образом её границы. Систему называют устойчивой «в большом», когда определены границы области устойчивости, т.е. определены границы области начальных отклонений, при которых система возвращается в исходное состояние, и выяснено, что реальные начальные отклонения принадлежат этой области. В том случае, когда система возвращается в исходное состояние при любых начальных отклонениях, систему называют устойчивой «в целом». Такой вид устойчивости для определённого класса нелинейных систем называют «абсолютной» устойчивостью.

Литература: О.1: гл.9 (9.1 – 9.3), Д.2 гл.6 (6.1).

**1.1.3 Контрольные вопросы**

1 Что понимается под устойчивостью системы «в малом», «в большом», «в целом»?

2 Какое движение системы называется *невозмущёным*?

3 Что понимается под *возмущённым движением* системы?

4 Как формулируется определение устойчивости по Ляпунову?

5 О чём говорят 1-я и 2-я теоремы Ляпунова?

6 Что является необходимым и достаточным условием устойчивости системы с точки зрения вида корней характеристического уравнения?

**1.2 Статическая устойчивость простейшей системы**

**1.2.1 Программа**

Роль индуктивного сопротивления системы. Запас и коэффициент запаса статической устойчивости. Влияние явнополюсности генераторов на характеристику мощности. Влияние АРВ генераторов на предел передаваемой мощности. Действительный предел передаваемой мощности. Характеристика мощности при сложной связи генератора с приемной системой.

**1.2.2 Методические указания**

Материал раздела посвящен рассмотрению устойчивости установившегося режима при малых возмущениях, когда система может

считаться линейной.

Основными задачами анализа статической устойчивости является определение предельного по устойчивости режима, проверка устойчивости заданного установившегося режима, выбор параметров и настройка регулирующих устройств генераторов электростанций.

При изучении этого раздела необходимо обратить внимание на виды пределов передаваемой мощности: идеальный, внутренний и действительный. Существование этих видов пределов зависит от допущений постоянства ЭДС генераторов или напряжения на шинах приемной системы.

Важно представлять себе, что АРВ генераторов является эффективным средством повышения статической устойчивости. Это связано с тем, что применение АРВ не только расширяет зону естественной устойчивости генераторов, но и, что особенно важно, позволяет последним работать за внутренним пределом передаваемой мощности в так называемой зоне искусственной устойчивости. Это особенно важно при тяжелых авариях, т.к. позволяет иметь дополнительный запас надежности в послеаварийных режимах.

Литература: О.1: гл.9 (9.6 – 9.8, 9.11.1).

**1.2.3 Контрольные вопросы**

1 Что такое запас статической устойчивости и какова его количественная характеристика?

2 Изменяется ли устойчивость системы под влиянием явнополюсности генераторов?

3 Каковы различия между идеальным, внутренним и действительным пределами передаваемой мощности?

4 Чем объяснить, что внутренний предел передаваемой мощности наступает при значениях угла > 90º, а действительный предел при < 90º?

5 Как приближенно определить запас статической устойчивости системы, генераторы которой снабжены АРВ: а) пропорционального типа; б) сильного действия?

6 Как изменится вид угловой характеристики мощности, если в сопротивлении связи генератора с приемной системой учесть активные сопротивления?

**1.3 Динамическая устойчивость простейшей системы**

**1.3.1 Программа**

Основные сведения о динамической устойчивости. Основные допущения, принимаемые при расчетах динамической устойчивости. Схемы замещения при коротких замыканиях.

Угловая характеристика мощности генератора в переходном режиме.

Динамическая устойчивость станции, работающей на шины неизменного напряжения. Правило площадей. Метод последовательных интервалов.

Учет АРВ при расчетах динамической устойчивости.

**1.3.2 Методические указания**

В этом разделе развиваются основные положения динамической устойчивости и способы ее исследования. При изучении материала особое внимание следует уделить допущениям, принимаемым при различных методах расчета, обусловленным как скоростью протекания электромеханического переходного процесса, так и различными целями исследования динамической устойчивости. Одним из основных допущений является постоянство результирующего потокосцепления в продольной оси машины, что позволяет считать переходную ЭДС и переходную реактивность генераторов неизменными в течение всего переходного процесса.

Следует обратить особое внимание на условие правила площадей и метод последовательных интервалов, причем главное внимание необходимо уделить физической сущности проходящих при больших возмущениях процессов.

Нужно уметь проиллюстрировать ход процесса в простейшей системе построением угловых характеристик мощности в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах с указанием характерных углов «δ» и площадей ускорения и торможения.

При изучении материала раздела должно быть четко усвоено влияние постоянной инерции машины и обращено внимание на то, что эта величина не влияет на предельный угол отключения КЗ, а оказывает влияние на предельное время отключения короткого замыкания.

Литература: О.1: гл.10 (10.2 – 10.5).

**1.3.3 Контрольные вопросы**

1 Какие допущения принимаются при расчетах динамической устойчивости в зависимости от их назначения?

2 В чем состоит правило площадей? Каково его физическое объяснение?

3 Что такое аварийный шунт и какую величину он имеет при различных видах КЗ?

4 Какой характер изменения угла «δ» и электрической мощности во времени при устойчивом переходе от одного режима к другому в следующих случаях:

а) при работе в линейной части характеристики мощности?

б) при работе вблизи предела мощности?

5 В каком случае и в связи с чем уравнение относительного движения ротора генератора может быть решено в общем виде?

6 Основные допущения, принимаемые при использовании метода последовательных интервалов. Какой величины и почему выбирается интервал времени?

7 Как определяются предельные значения угла и времени отключения КЗ?

8 Как учитывается АРВ генераторов в расчетах динамической устойчивости?

**1.4 Статическая устойчивость сложной системы**

**1.4.1 Программа**

Определение мощностей в сложной системе по принципу наложения. Определение собственных и взаимных проводимостей. Метод малых колебаний. Анализ устойчивости системы из двух станций работающих на общую нагрузку. Анализ статической устойчивости и расчет переходного процесса сложной системы, содержащей произвольное число станций и нагрузок. Анализ статической устойчивости системы с учётом демпфирования. Самораскачивание и самовозбуждение в электроэнергетической системе. Алгебраические и частотные критерии устойчивости.

**1.4.2 Методические указания**

Электрическая система, состоящая из большого количества станций (больше двух) и нагрузок, рассматривается как сложная. Анализ статической

устойчивости подобных систем с успехом используется метод малых колебаний. Метод основан на исследовании линеаризованных уравнений переходных процессов, т.е. линейного приближения исходных уравнений. Возможность исследования устойчивости по линеаризованным уравнениям доказана известным ученым А.М.Ляпуновым, который показал, что система в малом, если устойчиво ее линейное приближение. При изучении метода необходимо освоить процедуры линеаризации исходных уравнений разложением в ряд Тейлора и получения характеристических уравнений.

В случае необходимости расчета системы, содержащей большое число станций, прибегают к упрощению сложной системы, которое сводится к замене нескольких станций одной эквивалентной.

Изучая материал раздела, студент должен усвоить определение мощностей в сложной системе, знать, как определяется предел передаваемой мощности в сложной системе (на примере системы из двух станций), а также особенности расчета переходного процесса сложной системы, содержащей произвольное число станций и нагрузок.

Литература: О.1: гл.9 (9.10.1, 9.10.2); Д.2: гл.6 (6.2 – 6.8).

**1.4.3 Контрольные вопросы**

1 Как определяются мощности, отдаваемые генераторами в сложной системе?

2 Как определяются собственные и взаимные проводимости?

3 Как разделяются системы по признаку сложности?

4 В чем заключается метод малых колебаний?

5 Каковы возможности применения практических критериев в условиях сложной системы?

6 Что понимают под демпфированием?

7 Как протекает процесс демпфирования колебаний ротора генератора?

8 Что такое самораскачивание и каковы вызывающие его причины?

9 Как протекает процесс самораскачивания в сети со значительным активным сопротивлением?

10 Как протекает процесс самораскачивания под действием АРВ?

11 Что такое самовозбуждение синхронных машин и причины его возникновения?

12 Охарактеризуйте виды самовозбуждения.

13 Что представляет собой критерий устойчивости Гурвица?

14 Что представляет собой критерий устойчивости Гурвица?

15 Что представляет собой критерий устойчивости Рауса?

16 Что представляет собой критерий устойчивости Михайлова?

17 Что такое метод «D-разбиения»?

**1.5 Асинхронные режимы синхронных генераторов**

**1.5.1 Программа**

Понятие асинхронных режимов и причины их возникновения. Установившийся асинхронный ход. Ресинхронизация синхронных генераторов и двигателей. Понятие результирующей устойчивости.

**1.5.2 Методические указания**

В этом разделе рассматривается поведение электрических систем при появлении в них асинхронного хода и процессы, происходящие при их ресинхронизации.

В энергосистемах временно допускается асинхронный ход выпавших из синхронизма машин и последующая их ресинхронизация без вмешательства обслуживающего персонала или при некотором ег7о воздействии на устройства регулирования скорости вращения выпавшего агрегата (результирующая устойчивость).

Простейший, практический подход к оценке установившегося скольжения при асинхронном ходе заключается в отыскании точки пересечения зависимостей мощности турбины и асинхронного момента генератора. Необходимым условием осуществления ресинхронизации в простейшем случае является факт прохождения мгновенного скольжения через ноль.

В результате изучения материала этого раздела студент должен чётко представлять себе причины возникновения асинхронных режимов, знать действующие при асинхронном ходе моменты, условия ресинхронизации, порядок расчёта результирующей устойчивости, допущения, принимаемые при расчётах асинхронного режима и ресинхронизации.

Литература: О.1: гл.11 ( 11.1 – 11.3).

**1.5.3 Контрольные вопросы**

1 Как меняется полный угол при асинхронном ходе генератора по отношению к шинам неизменного напряжения?

2 Какие составляющие имеет вращающий момент синхронной машины, работающей асинхронно с системой неограниченной мощности?

3 В чём состоит критерий ресинхронизации и при каких допущениях он справедлив?

4 Как происходит втягивание в синхронизм асинхронно работающего генератора?

5 Как изменяется активная мощность и напряжение на шинах асинхронно работающего генератора?

6 В чём опасность асинхронного режима для асинхронно работающих генераторов и для системы, в которой эти генераторы работают?

7 Как происходит процесс выпадения из синхронизма синхронного генератора при нарушении динамической устойчивости?

**1.6 Статическая устойчивость узлов нагрузки**

**1.6.1 Программа**

Понятие узла нагрузки. Характеристики различных типов нагрузки. Устойчивость асинхронного двигателя. Критерий устойчивости, критическое скольжение, критическое напряжение. Влияние на устойчивость асинхронного двигателя электрической удаленности шин постоянного напряжения. Вторичные критерии устойчивости нагрузки. Статическая устойчивость синхронных двигателей. Влияние компенсации реактивной мощности на устойчивость узла нагрузки.

**1.6.2 Методические указания**

Переходные процессы в узлах нагрузки следует рассматривать с позиции обеспечения устойчивости всей системы электроснабжения в целом, т.е. устойчивости как потребителей электроэнергии, так и источников питания.

При изучении темы следует ознакомиться с характеристиками отдельных типов потребителей (осветительной, двигательной, преобразовательной нагрузок и т.д.), критериями устойчивости и факторами, влияющими на устойчивость узлов нагрузки. Надо представлять, что такое «эквивалентный двигатель» и на чём основывается анализ его устойчивости.

Необходимо выяснить, что представляют собой вторичные критерии устойчивости нагрузки и каковы области их применения.

Литература: О.1: гл.9 (9.11.2, 9.11.3)

**1.6.3 Контрольные вопросы**

1 Что называют критическим напряжением?

2 Как влияет наличие реактивного сопротивления между источником питания и асинхронным двигателем нагрузки на устойчивости этой системы?

3 Что такое лавина напряжения и каковы причины ее возникновения?

4 Каковы причины «опрокидывания» асинхронных двигателей нагрузки? Как развивается этот процесс и как он влияет на режим системы?

5 Каков прямой критерий устойчивости асинхронного двигателя?

5 Что такое эквивалентный асинхронный двигатель? Какие факторы влияют на его статическую устойчивость?

6 Что понимают под вторичными критериями устойчивости нагрузки?

**1.7 Динамическая устойчивость узлов нагрузки**

**1.7.1.Программа**

Резкие изменения параметров режима в системах электроснабжения.

Переходный процесс в узле нагрузки при пуске асинхронного двигателя. Переходный процесс в узле нагрузки при пуске синхронного двигателя. Самозапуск асинхронных двигателей. Самозапуск синхронных двигателей. Самовозбуждение асинхронных двигателей во время пуска при применении последовательной ёмкостной компенсации в сети.

**1.7.2 Методические указания**

Необходимо разобраться в явлении лавины напряжения, в процессе пуска двигателей и в процессах, происходящих при самозапуске двигателей. Необходимо также понять, что при рассмотрении вопроса динамической устойчивости асинхронного двигателя надо определить время, при котором будет достигнуто то или иное скольжение, что осуществляется путём решения уравнения движения ротора двигателя. Важно понять, в чём заключается различие в процессах пуска и самозапуска асинхронных и синхронных двигателей. Необходимо разобраться в сути процесса самовозбуждения асинхронных двигателей и причинах его возникновения.

**1.7.3.Контрольные вопросы**

1 Какие бывают условия пуска двигателей?

2 В чем особенность пуска синхронных и асинхронных двигателей? В каких случаях необходимо применять специальные пусковые устройства?

3 Для чего применяется самозапуск? Что нужно определить для установления допустимости самозапуска?

4 Каковы критерии успешности самозапуска?

5 Каков порядок расчёта самозапуска?

6 В чём различие самозапуска синхронных и асинхронных двигателей?

7 Как оценивается динамическая устойчивость двигателей нагрузки?

8 Что такое лавина напряжения и каковы причины ее возникновения?

Литература: О1: гл.10 (10.7.1, 10.8, 10.9)

**2 Методические указания по практическим занятиям**

При подготовке к практическим занятиям необходимо ознакомиться с соответствующими материалами раздела 1 настоящих указаний и рекомендуемой литературы.

**2.2.1 Угловые характеристики мощности простейшей системы**

Необходимо чётко представлять при каких допущениях система электропередачи может считаться простейшей и как принятые допущения сказываются на структуре аналитического выражения угловой характеристики мощности и её графическом изображении. Также нужно иметь представление о простейших способах учёта влияния АРВ на вид угловой характеристики мощности и запас статической устойчивости.

**2.2.2 Угловые характеристики мощности при сложной связи генераторов с приёмной системой**

Нужно помнить, что понятие сложной связи вводится в рассмотрение в том случае, когда хотя бы один элемент расчётной схемы представляется в схеме замещения полным комплексным сопротивлением. Необходимо представлять как и в чём проявляется влияние активного сопротивления элементов на аналитическое выражение и вид угловой характеристики мощности.

**2.2.3 Составление схемы замещения нормального режима работы системы, определение параметров режима, собственных и взаимных проводимостей схемы**

Необходимо понимать какими параметрами должен учитываться исходный установившийся режим работы системы и как они определяются. Как выглядит выражение угловой характеристики мощности, что такое собственные и взаимные проводимости схемы и какую роль они играют в расчётах

**2.2.4 Составление схемы замещения аварийного режима системы при несимметричном КЗ. Определение собственных и взаимных проводимостей**

Нужно знать, что понимается под аварийным шунтом при коротком замыкании и способы определения его сопротивления. Соответственно, надо чётко представлять себе отличия в схемах замещения нормального и аварийного режимов работы системы. Необходимо также знать как и в чём проявляется влияние сопротивления шунта на угловую характеристику мощности и запас устойчивости.

**2.2.5 Составление схемы замещения послеаварийного режима и определение проводимостей**

Система переходит в послеаварийный режим в результате отключения

релейной защитой участка схемы, где произошло короткое замыкание. В результате изменяется конфигурация схемы, а значит и схемы замещения. Необходимо понять, как при этом изменятся проводимости схемы и, соответственно, как это повлияет на устойчивость системы.

**2.2.6 Построение угловых характеристик мощности для всех режимов с определением коэффициента запаса динамической устойчивости. Определение предельного угла отключения КЗ и предельного времени отключения КЗ**

Следует понимать, что построение угловых характеристик мощности осуществляется с целью выяснения размеров площадок при ускорении и торможении ротора генератора, на основании сравнения которых делается вывод о динамической устойчивости системы в аварийном режиме. В случае нарушения устойчивости необходимо предпринять попытку сохранения устойчивости с определением предельного времени отключения КЗ. Необходимо понимать, что это время может быть определено в результате решения уравнения относительного движения ротора генератора, например методом последовательных интервалов.

**2.2.7 Расчёт статической устойчивости сложных систем с помощью алгебраических критериев**

Расчёт начинается с составления схемы замещения системы. Далее необходимо разобраться с выражениями характеристик синхронных машин, входящих в систему. Для непосредственного анализа устойчивости системы надо выяснить как составляются характеристическое уравнение и его определитель, по знаку которого делается вывод об устойчивости. Для определения запас устойчивости необходимо определить величину коэффициента запаса устойчивости.

**2.2.8 Расчёт устойчивости комплексной нагрузки**

Комплексная нагрузка обычно состоит из различного рода потребителей электрической энергии. Значительную долю среди прочих составляет асинхронная двигательная нагрузка. Поэтому процессы нарушения статической устойчивости комплексной нагрузки в целом схожи с процессами в чисто двигательной нагрузке. Следовательно, для анализа устойчивости комплексной нагрузки можно применять те же критерии, что и для асинхронных двигателей или же вторичные критерии устойчивости, которые изменяют свой знак одновременно с изменением знака прямого критерия устойчивости асинхронного двигателя.

**2.2.9 Расчёт самозапуска синхронных и асинхронных двигателей**

Необходимо понимать, что в режиме самозапуска величина остаточного напряжения на шинах, где подключены двигатели, должна быть такой, чтобы вращающий момент двигателей был больше статического момента сопротивления механизмов. Для этого в режиме самозапуска оставляют включенными только двигатели наиболее ответственных механизмов. Таким образом расчёт самозапуска сводится к определению числа и суммарной мощности неотключаемых двигателей, остаточного напряжения и величины вращающего момента двигателей, который должен превышать статический момент механизмов.

**3 Методические указания по лабораторным работам**

Методические указания по лабораторным работам приведены в следующем источнике:

3.1 Пилипенко В.Т. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: методические указания к лабораторным работам для студентов направления 140400.62 Электроэнергетика и электротехника по профилям «Электроснабжение» и «Электрические станции» /В.Т.Пилипенко. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2015.- 62 с.

**4 Методические указания по самостоятельной работе**

**4.1 Методические указания по выполнению курсовой работы**

Методические указания по выполнению курсовой работы приведены в следующем источнике:

4.1.1 Пилипенко, В.Т. Статическая и динамическая устойчивость энергосистем : методические указания для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / В. Т. Пилипенко; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т". - Оренбург : ОГУ, 2017. - 64 с.

**5 Методические указания по промежуточной аттестации по дисциплине**

Процесс подготовки к экзаменам должен начинаться, по существу, с самого первого этапа изучения дисциплины. Он включает в себя самостоятельную работу над рекомендованной литературой. Как правило, он начинается за полтора-два месяца до экзаменационной сессии. Изучив и законспектировав рекомендованные источники, выполнив предусмотренные учебным планом лабораторные работы, практические задания, курсовые и защитив их, студент может начать непосредственную подготовку к экзаменам с тщательной отработки курса в соответствии с требованиями учебной программы и выполнения рекомендаций преподавателя. На этом этапе студент должен повторить изученное по учебникам и учебным пособиям, личным конспектам, записям лекций и другим материалам. При этом особое внимание должно быть обращено на тщательную отработку тех конкретных вопросов и тем учебной программы, которые слабо усвоены.

При повторении материала перед экзаменами или зачетами необходима самопроверка или взаимная проверка знаний. В этом случае по каждой теме надо еще раз хорошо продумать материал, разобрать примеры практических расчётов. Вполне себя оправдывает групповая взаимная проверка. Для этого рекомендуется собираться по 3-4 человека и проводить разбор вопросов по курсу.

Необходимо пользоваться настоящими указаниями в плане рекомендаций по изучению различных тем и разделов дисциплины и проверки степени усвоения материала с помощью предлагаемых контрольных вопросов.

**Список рекомендованных источников**

Основной

1 Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учебное пособие/Ю.А. Куликов. – Новосибирск: НГТУ, М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2004. – 283 с.

2 Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем [текст]/П.С. Жданов; Под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.

Дополнительный

1 Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях [текст]: Учебное пособие /Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, В.В. Ежков и др.; Под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.

2 Калентионок, Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем: Учебное пособие/ Е.В. Калентионок. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 376 с. - Режим доступа: <http://wave9.ru/books/learning/189138-Ustoychivost-elektroenergeticheskih-sistem.html>