

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И АВТОМАТИКИ

Широбокова О.Е.

## **РАСЧЕТЫ УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ**

Методические рекомендации  
по организации самостоятельной работы  
по дисциплине «Расчёты установившихся и переходных  
электрических режимов» для студентов очной и заочной форм обучения  
направления подготовки  
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Брянская область 2018

УДК 621.316 (076)  
БКК 31.27  
Ш 64

Широбокова, О. Е. Расчеты установившихся и переходных электрических режимов: методические рекомендации по организации самостоятельной работы по дисциплине «Расчеты установившихся и переходных электрических режимов» для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / О. Е. Широбокова. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018. – 37 с.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов являются обязательной частью учебно-методических комплексов учебных дисциплин, реализуемых в ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, в том числе и по направлению подготовки магистров 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Цель методических рекомендаций для самостоятельной работы студентов – определить роль и место самостоятельной работы в учебном процессе; конкретизировать ее уровни, формы и виды; обобщить методы и приемы выполнения определенных видов учебных заданий; объяснить критерии оценивания.

Рецензент: д.т.н., проф. Кисель Ю.Е.

*Рекомендовано к изданию методической комиссией института энергетики и природопользования Брянского ГАУ, протокол № 6 от 10.04.2018 года.*

© Брянский ГАУ, 2018 г.

© Широбокова О.Е., 2018 г.

## Введение

Дисциплина расчеты установившихся и переходных электрических режимов базируется на курсе теоретические основы электротехники, специальная математика, электромагнитные и электромеханические переходные процессы, электроэнергетические системы и сети.

Цель освоения дисциплины: совершенствование методов расчета и анализа установившихся нормальных и аварийных режимов электрических сетей для повышения точности, достоверности и надежности работы энергосистем.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов являются обязательной частью учебно-методических комплексов учебных дисциплин, реализуемых в ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, в том числе и по направлению подготовки магистров 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Цель методических рекомендаций для самостоятельной работы студентов – определить роль и место самостоятельной работы в учебном процессе; конкретизировать ее уровни, формы и виды; обобщить методы и приемы выполнения определенных видов учебных заданий; объяснить критерии оценивания.

Главной целью профессионального образования является подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности. Решение поставленных задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов в освоении учебного материала, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста студентов, воспитание творческой активности и инициативы.

Самостоятельная работа студентов – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (возможно частичное непосредственное участие преподавателя при сохранении ведущей роли студентов).

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками по профилю будущей профессии, опытом творческой, исследовательской деятельности, развитие самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровней.

Для расширения знаний по дисциплине рекомендуется использовать интернет-ресурсы: проводить поиск информации в различных поисковых системах, на сайтах и в обучающих программах, рекомендованных преподавателем на лекционных занятиях. Для лучшего усвоения учебного материала и подготовки к занятиям предполагается активная внеаудиторная самостоятельная работа студентов с учебной литературой, с нормативными, методическими и справочными материалами.

Содержание пособия имеет назначение помочь студентам – магистрам электрических специальностей, углубить теоретические знания по применению методов расчета электрических цепей в переходных и установившихся режимах и получить практические навыки самостоятельного решения задач.

# 1 Структура и основные разделы дисциплины

1. Общие сведения режимов электрических систем
  - 1.1 Классификация режимов
  - 1.2 Параметры установившихся режимов
2. Расчет электроэнергетических режимов
  - 2.1 Методы расчета установившихся режимов
    - 2.1.1 Уравнения режимов
  - 2.2 Применение алгебры матриц для расчета режимов
  - 2.3 Частные случаи расчета режимов электрических сетей
  - 2.4 Численные методы решения уравнений режима
    - 2.4.1 Общие положения
    - 2.4.2 Метод Зейделя
    - 2.4.3 Метод Ньютона
    - 2.4.4 Модификация метода Ньютона
  - 2.5 Алгоритмизация методов расчета режимов
  - 2.6 Учет слабой заполненности матрицы узловых проводимостей
  - 2.7 Существование, единственность и устойчивость решения уравнений режима
  - 2.8. Сходимость итерационного процесса
  - 2.9. Особые режимы электрических систем
    - 2.9.1. Расчет несимметричных режимов методом фазных координат
    - 2.9.2. Расчет несимметричных режимов методом симметричных составляющих
    - 2.9.3 Расчет неполнофазных режимов
    - 2.9.4 Расчет несинусоидальных режимов
3. Оптимизация режимов
  - 3.1. Общие положения
  - 3.2 Методы оптимизации
  - 3.3 Оптимизация распределения активных мощностей между электростанциями
  - 3.4 Оптимизация режима электрической сети по напряжению, реактивной мощности и коэффициентам трансформации
  - 3.5 Краткая характеристика других задач оптимизации
4. Основы управления режимами электрических систем.
5. Практические методы расчета установившихся режимов.
6. Примерные темы рефератов.
7. Библиографический список.

## 2 Контрольные задания и критерии оценки

### 2.1 Контрольные вопросы

1. Понятия об установившихся и переходных электрических режимах.
2. Виды КЗ и простых замыканий в электрических сетях. Причины возникновения КЗ.
3. Последствия КЗ.
4. С какой целью проводят расчеты  $I_{к.з.}$  и переходных процессов.
5. Основные допущения, принимаемые при расчетах  $I_{к.з.}$
6. Расчетные схемы и параметры замещения.
7. Расчет схемы параметров замещения.
8. Преобразование схем замещения.
9. Назначение релейной защиты и автоматики.
10. Функции релейной защиты и автоматики и основные требования, предъявляемые к этим устройствам.
11. Устойчивость систем и узлов нагрузки. Предмет изучения основные понятия и определения.
12. Элементы устройств релейной защиты и автоматики.
13. Задачи расчёта. Понятие статической устойчивости.
14. Задачи расчёта. Понятие динамической устойчивости.
15. Задачи расчёта. Понятие результирующей и искусственной устойчивости.
16. Основные характеристики режимов электрической системы и задачи их анализа.
17. Условия существования стационарного режима.
18. Моделирование элементов энергосистем в расчетах установившихся режимов.
19. Рациональная запись уравнений источников и приемников электрической энергии.
20. Практические методы расчета установившихся режимов.
21. Расчет установившегося режима методом узловых напряжений.
22. Методы решения системы узловых уравнений
23. Моделирование элементов энергосистем в расчетах установившихся режимов. Моделирование нагрузки.
24. Моделирование элементов энергосистем в расчетах установившихся режимов. Моделирование генераторов.
25. Практические методы расчета установившихся режимов. Расчет установившегося режима методом эквивалентных преобразований.
26. Моделирование вращающихся машин. Системы координат.
27. Уравнения Парка-Горева их использование и соглашения, принимаемые при записи уравнений.
28. Математическая модель синхронного генератора.
29. Уравнение синхронного генератора в собственных  $d, q$  осях.
30. Упрощенное уравнение синхронного генератора.
31. Математическая модель комплексной нагрузки.
32. Структура модели. Требования к модели нагрузки.
33. Динамическая модель асинхронного электродвигателя. Учет и рассеивание потерь в асинхронном двигателе.

34. Упрощенные уравнения асинхронного двигателя.
35. Статическая модель асинхронного двигателя.
36. Расчет параметров модели асинхронного двигателя по каталожным данным.
37. Динамическая модель синхронного электродвигателя.
38. Статическая модель синхронного двигателя.
39. Расчет параметров модели синхронного двигателя по каталожным данным.
40. Расчеты переходных процессов в узлах нагрузки.
41. Самозапуск асинхронных электродвигателей.
42. Пуск асинхронных двигателей от автономных источников.
43. Влияние конденсаторных батарей на переходные процессы в узле нагрузки.
44. Снижение потерь мощности и напряжения в системе электроснабжения компенсацией реактивной мощности.
45. Мероприятия по компенсации реактивной мощности.
46. Расчет статических компенсаторов и управление ими.

### Критерии оценки компетенций

Промежуточная аттестация студентов по дисциплине «Расчеты установившихся и переходных электрических режимов» проводится в соответствии с Уставом Университета, Положением о текущем контроле успеваемости и промежуточной аттестации студентов по программам ВО. Промежуточная аттестация по дисциплине «Расчёты установившихся и переходных электрических режимов» проводится в соответствии с рабочим учебным планом в форме диф. зачета. Студент допускается к диф. зачёту по дисциплине в случае выполнения им учебного плана по дисциплине: выполнения всех заданий, предусмотренных рабочей программой дисциплины.

Знания, умения, навыки студента на дифференцированном зачете оцениваются оценками: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно».

Приемами создания и анализа моделей, позволяющих прогнозировать свойства и поведение объектов профессиональной деятельности

|                  |  |
|------------------|--|
| Результат зачета | <p><b>Студент знает:</b> Возможные риски и меры безопасности разрабатываемых новых технологий. Основные средства автоматизации. Методы создания и анализа моделей с целью прогнозирования свойств и поведения объектов профессиональной деятельности.</p> <p><b>Студент умеет:</b> Оценивать риск и определять меры по обеспечению безопасности. Формулировать технические задания, разрабатывать и использовать средства автоматизации. Применять методы создания и анализа моделей объектов профессиональной деятельности.</p> <p><b>Студент владеет:</b> Способностью оценивать риск и определять меры по обеспечению безопасности разрабатываемых новых технологий, объектов профессиональной деятельности. Способностью формулировать технические задания, разрабатывать и использовать средства автоматизации для решения профессиональных задач. Приемами создания и анализа моделей, позволяющих прогнозировать свойства и поведение объектов профессиональной деятельности.</p> |
|------------------|--|

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ И ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ

### 1. Электроэнергетическая система - это?

- a. Совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией;
- b. Совокупность электроустановок электрических станций и электрических сетей энергосистемы;
- c. *Электрическая часть энергосистемы и питающиеся от нее приемники электрической энергии, предназначенные для производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии;*

### 2. Дайте определение понятия “Узел нагрузки”.

- a. Совокупность электроустановок электрических станций и электрических сетей энергосистемы;
- b. *Группа разнородных потребителей электрической энергии, подключенных к шинам электрической станции или подстанции;*
- c. Электрическая часть энергосистемы и питающиеся от нее приемники электрической энергии;

### 3. Что подразумевают под системной аварией электроэнергетической системы?

- a. *Нарушение нормального режима работы всей или значительной части электроэнергетической системы, связанной с массовым нарушением электропитания потребителей;*
- b. Режим, возникающий в результате аварий в электроэнергетической системе (короткое замыкание, аварийное отключение нагрузок и др.);
- c. Дискретное изменение установившегося режима электроэнергетической системы под воздействием различных причин (КЗ, включение и отключение электроприемника, переключение на резервное питание);

### 4. Что понимается под аварийным режимом электроэнергетической системы?

- a. Дискретное изменение установившегося режима электроэнергетической системы под воздействием различных причин (КЗ, включение и отключение электроприемника, переключение на резервное питание);
- b. Нарушение нормального режима работы всей или значительной части электроэнергетической системы, связанной с массовым нарушением электроснабжения потребителей;
- c. *Режим, возникающий в результате аварий в электроэнергетической системе (короткое замыкание, аварийное отключение нагрузок и др.);*
- d. Режим, в котором находится электроэнергетическая система после локализации аварии до установления нормального режима.

## **5. Нормальный режим работы электроэнергетической системы - это?**

- a. Дискретное изменение установившегося режима электроэнергетической системы под воздействием различных причин (КЗ, включение и отключение электроприемника, переключение на резервное питание);
- b. Режим, в котором находится электроэнергетическая система после локализации аварии до установления нормального режима;
- c. Переход от одного установившегося режима электроэнергетической системы в другой, который начинается с момента возмущения и продолжается до окончания вызванных этим возмущением электромагнитных и электромеханических процессов;
- d. *Режим электроэнергетической системы, при котором все потребители снабжаются электрической энергией надлежащего качества в соответствии с договорами и диспетчерскими графиками, а значения технических параметров режима системы и оборудования находятся в пределах допустимых значений.*

## **6. Под переходным процессом понимают -?**

- a. Изменение установившегося режима электроэнергетической системы под воздействием различных причин (КЗ, включение и отключение электроприемника, переключение на резервное питание);
- b. *Переход от одного установившегося режима электроэнергетической системы в другой, который начинается с момента возмущения и продолжается до окончания вызванных этим возмущением электромагнитных и электромеханических процессов;*
- c. Режим, в котором находится электроэнергетическая система после локализации аварии до установления нормального режима.

## **7. Установившийся режим – это?**

- a. Режим, в котором находится электроэнергетическая система после локализации аварии до установления нормального режима;
- b. Режим электроэнергетической системы, при котором все потребители снабжаются электрической энергией надлежащего качества в соответствии с договорами и диспетчерскими графиками, а значения технических параметров режима системы и оборудования находятся в пределах допустимых значений.
- c. *Режим электроэнергетической системы, который характеризуется неизменными параметрами;*
- d. Режим, возникающий в результате аварий в электроэнергетической системе (короткое замыкание, аварийное отключение нагрузок и др.).

## **8. Что понимают под нарушением устойчивости электроэнергетической системы?**

- a. Нарушение синхронной работы генераторов электростанций и/или "опрокидывание" двигателей узлов нагрузки в течение незначительного промежутка времени;
- b. Режим, в котором находится электроэнергетическая система после локализации аварии до установления нормального режима;



*с. Нарушение синхронной работы генераторов электростанций и/или "опрокидывание" двигателей узлов нагрузки в течение длительного времени;*

**9. Какую зависимость называют угловой характеристикой мощности?**

*а. Зависимость активной мощности от угла  $\delta$  между векторами напряжения на шинах приёмной системы и ЭДС синхронной машины;*

*б. Зависимость реактивной мощности от угла  $\delta$  между векторами напряжения на шинах приёмной системы и ЭДС синхронной машины;*

*с. Зависимость полной мощности от угла  $\delta$  между векторами напряжения на шинах приёмной системы и ЭДС синхронной машины;*

**10. Какой критерий устойчивости является практическим критерием устойчивости синхронной машины?**

*а.  $\frac{dP}{d\delta} > 0 \dots$*

*б.  $\frac{dP}{d\delta} = 0$ ;*

*с.  $\frac{dP}{d\delta} < 0$ .*

**11. При каких условиях происходит нарушение статической устойчивости «сползанием»?**

*а. При работе синхронного генератора на ёмкостную нагрузку;*

*б. При перегрузке электропередачи;*

*с. При работе синхронного генератора на полную нагрузку.*

**12. При каких условиях может произойти нарушение статической устойчивости из-за самовозбуждения?**

*а. При работе синхронного генератора на ёмкостную нагрузку.*

*б. При перегрузке электропередачи;*

*с. При работе синхронного генератора на индуктивную нагрузку.*

**13. Как изменяется активная мощность генераторов, работающих с полной нагрузкой через электропередачу на систему бесконечно большой мощности, при коротком замыкании на электропередаче?**

*а. Значительно уменьшается;*

*б. Значительно увеличивается;*

*с. Увеличивается незначительно.*

**14. Как изменяется реактивная мощность генераторов, работающих с полной нагрузкой через электропередачу на систему бесконечно большой мощности, при коротком замыкании на электропередаче?**

*а. Значительно уменьшается;*

*б. Значительно увеличивается;*

*с. Увеличивается незначительно.*

**15. Как изменяется скорость вращения генераторов, работающих с полной нагрузкой через электропередачу на систему бесконечно большой мощности, при коротком замыкании на электропередаче?**

- a. Увеличивается.
- b. Уменьшится;
- c. Значительно уменьшится.

**16. Как изменяется скорость вращения двигателя, получающего питание по линии электропередачи, при возникновении на ней короткого замыкания?**

- a. Уменьшится;
- b. Значительно уменьшается;
- c. Значительно увеличится.

**17. Какова величина по нормам запаса статической устойчивости по мощности (для электропередачи) в нормальном режиме?**

- a. 20%.
- b. 30%;
- c. 15%

**18. Какова величина по нормам запаса статической устойчивости по мощности (для электропередачи) в послеаварийном режиме?**

- a. 20%;
- b. 8%;
- c. 10%.

**19. Какова величина по нормам запаса статической устойчивости по напряжению (для узлов нагрузки) в нормальном режиме?**

- a. 30%
- b. 20%;
- c. 15%.

**20. Укажите, какой критерий является практическим критерием асинхронной нагрузки.**

- a.  $\frac{dP}{ds} > 0 (+)$
- b.  $\frac{dE}{dU} > 0$
- c.  $\frac{dP}{ds} < 0$

**21. Для каких двигателей применяется прямой пуск?**

- a. Для двигателей малой мощности;
- b. Для двигателей средней мощности (до 12,5 МВт);
- c. Для синхронных двигателей большой мощности

**22. Укажите, какой критерий является практическим критерием устойчивости узла комплексной нагрузки, при питании узла от одного источника питания.**

a.  $\frac{dP}{ds} > 0$

b.  $\frac{dE}{dU} > 0(+)$

c.  $\frac{dP}{ds} < 0$

**23. Укажите, какой критерий является практическим критерием устойчивости узла комплексной нагрузки, при питании узла от нескольких источников питания.**

a.  $\frac{dP}{ds} > 0$

b.  $\frac{dE}{dU} > 0$

c.  $\frac{d\Delta Q}{dU} > 0(+)$

**24. Что служит признаком нарушения устойчивости синхронной машины.**

a. Незначительное уменьшение угла  $\delta$ ;

b. Значительное уменьшение угла  $\delta$ ;

c. Значительное увеличение угла  $\delta$ ;

d. Правильные ответы а, с.

**25. Какова должна быть величина пускового момента (пусковой мощности) при нормальных условиях пуска?**

a.  $10 \div 15\%$ .

b.  $50 \div 75\%.(+)$

c.  $\geq 100\%$ .

**26. Какова должна быть величина пускового момента (пусковой мощности) при тяжёлых условиях пуска?**

a.  $\geq 100\%.(+)$

b.  $10 \div 15\%$ .

c.  $50 \div 75\%$ .

**27. При каком значении напряжения на питающих шинах при самозапуске считают, что самозапуск будет успешным?**

a. При напряжении, равном  $0,55 \div 0,65$  от номинального.

b. При номинальном напряжении;

c. При напряжении, равном  $0,75 \div 0,8$  от номинального;

d. При напряжении, равном  $0,8 \div 0,9$  от номинального.

**28. С помощью каких средств можно повысить статическую устойчивость электрической системы?**

- a. Установкой на генераторах электрической системы АРВ-СД.
- b. Установкой конденсаторных батарей;
- c. Правильные ответы а и б.

**29. С помощью каких средств можно повысить статическую устойчивость узлов нагрузки?**

- a. Установкой на синхронных двигателях узлов нагрузки АРВ-СД и АРВ-ПТ там, где их нет.
- b. Установкой на генераторах электрической системы АРВ-СД.
- c. Установкой конденсаторных батарей;

**30. Назовите условия устойчивости установившегося режима синхронной машины, работающей в электроэнергетической системе.**

- a. Вращающий момент должен быть меньше тормозящего момента;
- b. Вращающий момент должен быть равен тормозящему и при отклонении от положения равновесия должен возникать момент, противодействующий отклонению.
- c. Вращающий момент должен быть больше тормозящего момента.

### 3 Индивидуальные задания

#### 3.1 Практические методы расчета установившихся режимов

##### 3.1.1 Схемы замещения и определение параметров исходного режима

Исходными данными для выполнения являются расчетная схема распределительной сети, изображенная на рис.3.1, и основные технические параметры элементов схемы электроснабжения, приведенные в табл.3.1.

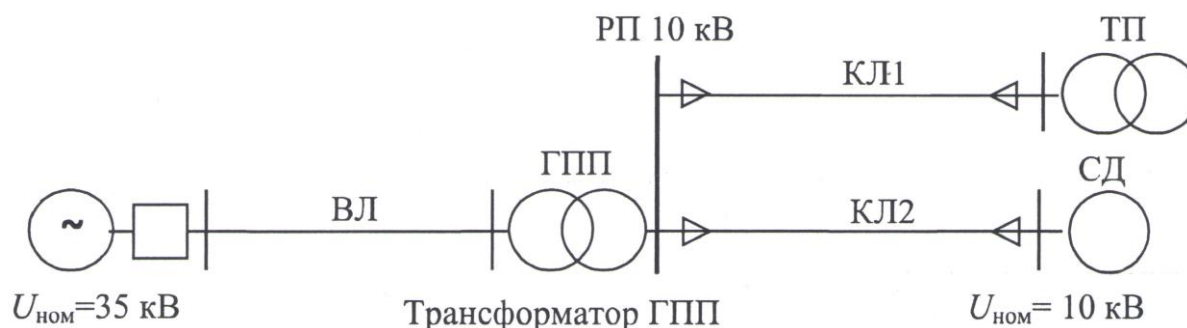


Рисунок 3.1 - Расчетная схема распределительной сети

## Варианты заданий

| №<br>вар | Система | ВЛ                   |                  | Трансформатор<br>ГПП |                 | КЛ1          |                  | КЛ2            |                  |
|----------|---------|----------------------|------------------|----------------------|-----------------|--------------|------------------|----------------|------------------|
|          |         | $S_{кз}, \text{МВА}$ | $S, \text{мм}^2$ | $l, \text{км}$       | $S, \text{МВА}$ | $U_{кз}, \%$ | $S, \text{мм}^2$ | $l, \text{км}$ | $S, \text{мм}^2$ |
| 1        | 5000    | АС-240               | 5,6              | 40                   | 11              | 150          | 1,2              | 95             | 0,5              |
| 2        | 4000    | АС-185               | 10,2             | 32                   | 10,5            | 120          | 0,6              | 70             | 1,2              |
| 3        | 3000    | АС-150               | 5,4              | 25                   | 10,5            | 120          | 0,8              | 95             | 0,6              |
| 4        | 2000    | АС-120               | 6,8              | 16                   | 10,5            | 95           | 1,2              | 50             | 0,8              |
| 5        | 2000    | АС-150               | 10,5             | 25                   | 11              | 95           | 1,2              | 120            | 0,3              |
| 6        | 3000    | АС-120               | 4,1              | 32                   | 11              | 70           | 0,4              | 70             | 0,2              |
| 7        | 1000    | АС-95                | 2,2              | 16                   | 10,5            | 50           | 0,2              | 70             | 0,5              |
| 8        | 1000    | АС-70                | 3,4              | 10                   | 10,5            | 35           | 0,4              | 50             | 0,2              |
| 9        | 2000    | АС-240               | 12,5             | 32                   | 11              | 120          | 2,2              | 95             | 1,1              |
| 10       | 3000    | АС-185               | 5                | 25                   | 10,5            | 70           | 3,5              | 50             | 0,4              |
| 11       | 3000    | АС-120               | 4,5              | 30                   | 11              | 70           | 0,38             | 70             | 0,25             |
| 12       | 5000    | АС-240               | 6                | 42                   | 11              | 150          | 1,3              | 95             | 0,6              |

При расчете токов КЗ в сетях выше 1000 В обязателен учет индуктивных сопротивлений элементов сети: электродвигателей, трансформаторов, реакторов, воздушных и кабельных линий, токопроводов. Активное сопротивление учитывается для воздушных ЛЭП с малым сечением проводов и со стальными проводами, а также для кабельных линий большой протяженности с малым сечением жил. При расчётах, необходимо учитывать активное сопротивление, если  $r_{\Sigma} \geq x_{\Sigma} / 3$ , где  $r_{\Sigma}$ ,  $x_{\Sigma}$  - суммарные активное и реактивное сопротивления сети от источника питания до места КЗ.





Активное сопротивление трансформаторов также необходимо учитывать в расчетах токов КЗ, если  $r_{тр} \geq 0,3 x_{тр}$ . Кроме этого, на сопротивление влияет изменение числа витков обмоток устройствами регулирования напряжения. Учесть действительное положение ответвлений каждого трансформатора в распределительных сетях практически невозможно, поскольку их положение изменяется в зависимости от значения нагрузки, схемы и режима работы сети. Поэтому при расчетах принимается, что все трансформаторы включены на основное ответвление, соответствующее их номинальному напряжению.

Все сопротивления схемы замещения подсчитывают в именованных (Ом) или в относительных единицах. При расчете в относительных единицах задаются базовыми величинами: напряжением  $U_б$  и мощностью  $S_б$ .

Расчетные формулы для моделирования элементов системы электроснабжения приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

## Расчетные формулы для определения сопротивлений

| Элемент ЭУ, его схема и исходный параметр   | Схема замещения  | Расчетные формулы  |   |
|---|--|--|---|
|   |  | именованные единицы, Ом  | относительные единицы   |
| Генератор<br>$X_d, \%$  |   | $x = \frac{X_d \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$   | $x = \frac{X_d \%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{\text{ном}}}$   |
| Энергосистема<br>$I_{\text{откл.ном}}$<br>$S_{\text{кз.сист}}$<br>$x_{\text{сист}}$ |   | $x = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3}I_{\text{откл.ном}}}$<br>или $x = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{кз.сист}}}$ | $x = \frac{S_б}{\sqrt{3}I_{\text{откл.ном}} U_{\text{ср.ном}}}$<br>или $x = \frac{S_б}{S_{\text{кз.сист}}}$ |
| Двухобмоточный трансформатор<br>$u_{\text{кз}}, \%$                                 |   | $x = \frac{u_{\text{кз}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{номтр}}}$                                | $x = \frac{u_{\text{кз}} \%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{\text{номтр}}}$                                       |
| Реактор<br>$x_p, \text{Ом}$   |  | $x = x_p \frac{U_{\text{ном}}^2}{U_{\text{ср}}^2}$   | $x = x_p \frac{S_{\text{ном}}^2}{U_{\text{ср}}^2}$  |
| Линия<br>$r_0, x_0$   |  | $x = x_0 l$<br>$r = r_0 l$   | $x = x_0 l \frac{S_б}{U_{\text{ср.ном}}^2}$<br>$r = r_0 l \frac{S_б}{U_{\text{ср.ном}}^2}$                  |

$S_{\text{ном}}$  - номинальные мощности элементов, МВА;

$S_б$  - базовая мощность, МВА;

$S_{\text{кз.сист}}$  - мощность КЗ энергосистемы, МВА;

$I_{\text{откл.ном.}}$  - номинальный ток отключения выключателя, кА;

$u_{\text{кз}}$  - напряжение КЗ трансформатора, %;

$x_p$  - сопротивление реактора, Ом;

$r_0, x_0$  - активное и индуктивное сопротивления линии на 1 км длины;

$l$  - длина линии, км;

$X_d$  - сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора;

$U_{\text{ср}}$  - среднее напряжение в месте установки данного элемента, кВ.

### Пример расчета

Для схемы электроснабжения цеховой подстанции (рис. 3.2) требуется составить схему замещения для расчета токов КЗ; определить сопротивления элементов схемы электроснабжения; наметить и обозначить на расчетной схеме и схеме замещения точки расчета токов КЗ; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

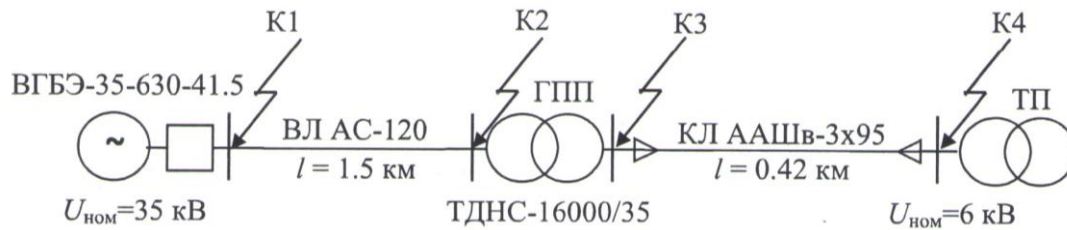


Рисунок 3.2 - Расчетная схема распределительной сети

### Определение сопротивлений

На подстанции энергосистемы установлен выключатель высокого напряжения ВГБЭ-35-630-41,5 с номинальным током отключения КЗ  $I_{\text{откл.ном}} = 41,5$  кА.

Принимаем  $U_{\text{ср.ном}} = 37$  кВ.

Определяем мощность КЗ системы;

$$S_{\text{кз.сист}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}} \cdot I_{\text{откл.ном}} = \sqrt{3} \cdot 37 \cdot 41,5 = 2660 \text{ МВА.}$$

Расчет ведем в относительных единицах. Производим расчёт сопротивлений сети, принимая базисную мощность  $S_{\text{б}} = 100$  МВА.

1. Сопротивление энергосистемы:

$$x_{\text{сист}} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{кз.сист}}} = \frac{100}{2660} = 0,038;$$

2. Сопротивление воздушной линии 35 кВ:

$$r_{\text{вл}} = \frac{r_0 \cdot l \cdot S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{0,27 \cdot 1,5 \cdot 100}{37^2} = 0,03;$$

$$x_{\text{вл}} = \frac{x_0 \cdot l \cdot S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{0,309 \cdot 1,5 \cdot 100}{37^2} = 0,034,$$

где:  $l = 1,5$  км - длина воздушной линии;

$U_{\text{ср.ном}}$  = базисное напряжение данной ступени трансформации, кВ;

$r_0 = 0,27$  Ом/км - активное сопротивление провода АС-120 (табл. 1.6, [9]);

$x_0 = 0,309$  Ом/км - индуктивное сопротивление провода АС-120 (табл. 1.11, [9]).

3. Сопротивление трансформатора ТДНС-16000/35 кВА:

$$x = \frac{u_{\text{кз}} \%}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном.тр}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,656.$$

Активным сопротивлением пренебрегаем, так как трансформатор большой мощности.

где  $S_{\text{ном.тр}} = 16$  МВА - номинальная мощность трансформатора;

$u_{\text{кз}} = 10,5\%$  - напряжение короткого замыкания трансформатора;

#### 4. Сопротивление кабельной линии:

$$r_{\text{кл}} = \frac{r_0 \cdot l \cdot S_{\delta}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{0,329 \cdot 0,42 \cdot 100}{6,3^2} = 0,348;$$

$$x_{\text{кл}} = \frac{x_0 \cdot l \cdot S_{\delta}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{0,0602 \cdot 0,42 \cdot 100}{6,3^2} = 0,064,$$

где:  $l = 0,42$  км - длина кабельной линии;

$U_{\text{ср.ном}} = 6,3$  кВ - базисное напряжение данной ступени трансформации;

$r_0 = 0,329$  Ом/км - активное сопротивление кабеля ААШв-(3х95) (табл. 1.6, [9]);

$x_0 = 0,0602$  Ом/км - индуктивное сопротивление кабеля ААШв-(3х95) (табл. 1.5, [9]).

Составляем схему замещения - рис. 3.3.

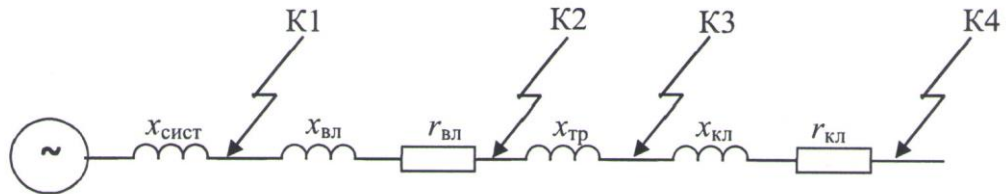


Рисунок 3.3 - Схема замещения участка распределительной сети

#### **Расчет токов КЗ**

В сетях среднего напряжения (6-35 кВ) в России применяют изолированную нейтраль. Ток однофазного замыкания на землю в таких сетях невелик, его величина определяется емкостью линии (зависит от напряжения, длины и типа линии), и этот режим не является аварийным. Соответственно, рассчитывать токи однофазного КЗ в сетях среднего напряжения нет необходимости.

Ток двухфазного КЗ легко определяется по рассчитанному току трехфазного:

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,87 I_{\text{кз}}^{(3)}.$$

Ток трехфазного КЗ определяется по формуле:

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} Z_{\text{рез}}}, \text{ кА},$$

где  $Z_{\text{рез}}$  - полное сопротивление до точки КЗ, Ом.

При расчете в системе относительных единиц сначала находят базисный ток КЗ на рассматриваемой ступени трансформации:



$$I_{\bar{6}} = \frac{S_{\bar{6}}}{\sqrt{3} U_{\text{ср.ном}}}, \text{кА},$$

а затем определяют реальное значение периодической составляющей тока КЗ:

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{I_{\bar{6}}}{Z_{\text{рез}}}, \text{кА}.$$

Будем определять токи трехфазного КЗ по намеченным точкам.

Точка К1:

$$I_{\bar{6}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА};$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,038} = 41,05 \text{ кА};$$

$$Z_{\text{рез}} = x_{\text{сист}} = 0,038.$$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 41,05 = 104,5 \text{ кА};$$

$k_{\text{уд}} = 1,8$  по таблице 1.1 [9].

Точка К2:

$$I_{\bar{6}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА};$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,078} = 20 \text{ кА};$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{вл}})^2 + (r_{\text{вл}})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034)^2 + (0,03)^2} = 0,078.$$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 20 = 50,91 \text{ кА};$$

$k_{\text{уд}} = 1,8$  по таблице 1.1 [9].

Точка К3:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА};$$

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{9,16}{0,729} = 12,57 \text{ кА};$$

$$Z_{рез} = \sqrt{(x_{сист} + x_{вл} + x_{тр})^2 + (r_{вл})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034 + 0,656)^2 + (0,03)^2} = 0,729.$$

Ударный ток КЗ

$$i_{уд} = \sqrt{2} k_{уд} \cdot I_{кз}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 12,57 = 31,99 \text{ кА};$$

$k_{уд} = 1,8$  по таблице 1.1 [9].

Точка К4:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА};$$

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{9,16}{0,876} = 10,46 \text{ кА};$$

$$Z_{рез} = \sqrt{(x_{сист} + x_{вл} + x_{тр} + x_{кл})^2 + (r_{вл} + r_{кл})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034 + 0,656 + 0,064)^2 + (0,03 + 0,348)^2} = 0,876.$$

Ударный ток КЗ

$$i_{уд} = \sqrt{2} k_{уд} \cdot I_{кз}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 10,46 = 26,83 \text{ кА};$$

$k_{уд} = 1,8$  по таблице 1.1 [9].

Сводная ведомость токов КЗ

| Расчетные точки |                | К1    | К2    | К3    | К4    |
|-----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| Токи КЗ, кА     | $I_{кз}^{(3)}$ | 41,05 | 20,0  | 12,57 | 10,46 |
|                 | $i_{уд}$       | 104,5 | 50,91 | 31,99 | 26,83 |

### 3.1.2 Схемы замещения и определение параметров исходного режима

#### Задача 1

Составить схему замещения и определить ее параметры, приведенные к одной ступени напряжения, для расчета динамической устойчивости в про-

стейшей электроэнергетической системе (ЭЭС), состоящей из конденсационной электростанции (КЭС), связанной двухцепной воздушной линией 500 кВ с мощной приемной системой. Принципиальная схема рассматриваемой ЭЭС приведена на *рис. 3.4*. На КЭС установлены шесть турбогенераторов типа ТГВ-300 ( $P_{Г.НОМ} = 300$  МВт;  $\cos\varphi_{Г.НОМ} = 0,85$ ;  $U_{Г.НОМ} = 20$  кВ), каждый из которых работает в блоке с трансформатором типа ТДЦ 400000/500 ( $S_{Т.НОМ} = 400$  МВ · А;  $k_T = 525/20$ ). Суммарная мощность собственных нужд КЭС  $S_{CH\Sigma} = 100 + j 102$  МВ · А ( $\cos\varphi_{CH} = 0,7$ ). Линия электропередачи имеет протяженность 700 км и выполнена проводом марки АС 500/64 (с расщеплением фазы на три провода). На подстанции приемной системы установлены три группы однофазных автотрансформаторов типа АОДЦТН 267000/500/220 ( $S_{ат.НОМ} = 267$  МВ · А;  $k_{ТВ-С} = 500/230$ ;  $k_{ТВ-Н} = 500/15,75$ ), к обмоткам низшего напряжения которых подключены четыре синхронных компенсатора типа КСВБ-160000-15 ( $S_{СК.НОМ} = 160$  МВ · А;  $U_{СК.НОМ} = 15,75$  кВ).

**Решение.** Составим схему замещения рассматриваемой ЭЭС в предположении, что расчеты динамической устойчивости будут проводиться при постоянстве ЭДС синхронных машин, приложенной к переходному сопротивлению  $x'_d$ , нагрузка собственных нужд станции представлена постоянным сопротивлением, трансформаторы и автотрансформаторы представлены чисто индуктивными сопротивлениями и проводимостями, потери на корону в линии электропередачи не учитываются.

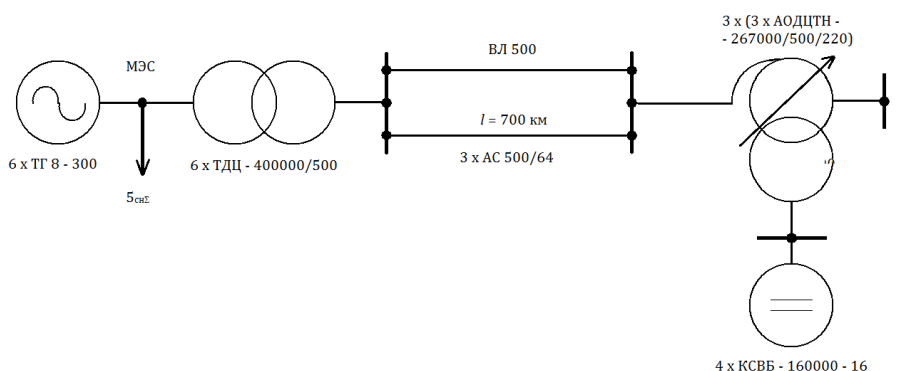


Рисунок 3.4 - Схема электро-энергетической системы (ЭЭС)

В соответствии с исходными данными, приведенными в [1, 2], имеем:

1) для вращающихся машин – параметры синхронного генератора КЭС

$$x'_{dГ} = 0,3; (GD^2)_{Г\Sigma} = 80 \text{ Т} \cdot \text{М}^2;$$

параметры синхронного компенсатора

$$x'_{dСК} = 0,43; (GD^2)_{СК} = 300 \text{ Т} \cdot \text{М}^2.$$

Здесь значения  $x'_d$  отнесены к номинальной мощности и номинальному напряжению соответствующей машины, а момент для турбогенераторов КЭС  $(GD^2)_{Г\Sigma}$  получен с учетом турбины:  $(GD^2)_{Г\Sigma} = (GD^2)_{Г} + (GD^2)_{Т} = 31 + 49 = 80 \text{ Т} \cdot \text{М}^2$ ;

2) для трансформаторного оборудования – параметры трансформатора КЭС

$$x_T = 89,5 \text{ Ом}; \Delta Q_x = 1,6 \text{ Мвар}; b_T = \Delta Q_x / U_{\text{ВН}}^2 = 1,6 / 525^2 = 5,82 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

параметры группы из трех однофазных автотрансформаторов

$$x_1 = 39,8 \text{ Ом}; x_2 = 0; x_3 = 75,6 \text{ Ом};$$

$$\Delta Q_x = 2,803 \text{ Мвар}; b_{\text{ат}} = \Delta Q_x / U_{\text{ВН}}^2 = 2,803 / 500^2 = 11,22 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

3) для линии электропередачи –

$$r_0 = 0,02 \text{ Ом/км (при } t = +20^\circ\text{C)}; x_0 = 0,304 \text{ Ом/км}; b_0 = 3,64 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

По полученным исходным данным рассчитаем параметры схемы замещения, изображенной на рис. 3.5:

переходное сопротивление эквивалентного генератора КЭС

$$x'_{dг\Sigma} = \frac{1}{n_T} x'_{dг} \frac{U_{\text{Г.НОМ}}^2}{P_{\text{Г.НОМ}} / \cos \varphi_{\text{Г.НОМ}}} = \frac{1}{6} 0,3 \frac{20^2}{300 / 0,85} = 0,0567 \text{ Ом};$$

сопротивление, замещающее нагрузку собственных нужд КЭС,

$$Z_{\text{Н}} = r_{\text{Н}} + jx_{\text{Н}} = U_{\text{Г}}^2 (\cos \varphi_{\text{сн}} + j \sin \varphi_{\text{сн}}) / S_{\text{сн}\Sigma} = 20^2 (0,7 + j0,714) / 143 = 1,96 + j2,0 \text{ Ом};$$

индуктивное сопротивление и проводимость эквивалентного трансформатора КЭС

$$x_{T\Sigma} = x_T / n_T = 89,5 / 6 = 14,91 \text{ Ом};$$

$$b_{T\Sigma} = n_T b_T = 6 \cdot 5,82 \cdot 10^{-6} = 34,9 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

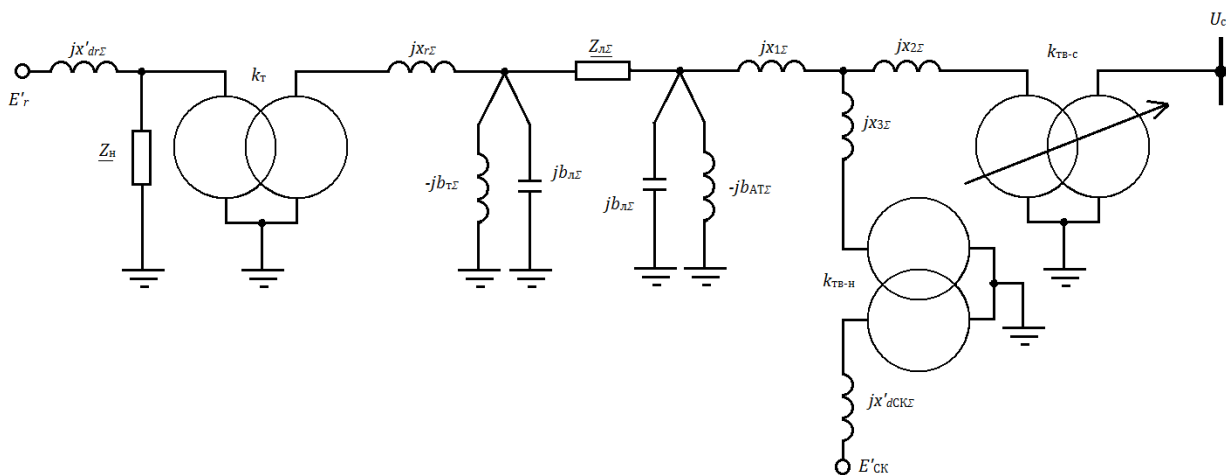


Рисунок 3.5 - Схема замещения ЭЭС

сопротивления и проводимости линии 500 кВ с учетом поправочных коэффициентов  $k_r, k_x, k_b$ , учитывающих распределенность параметров при длинах воздушных линий  $250 \leq l \leq 1000$  км,

$$k'_r = 1 - x_0 b_0 l^2 / 3 = 1 - 0,304 \cdot 3,64 \cdot 10^{-6} \frac{700^2}{3} = 0,8195 ;$$

$$k'_x = 1 - (x_0 b_0 l^2 / 6) [1 - (r_0 / x_0)^2] = 1 - (0,304 \cdot 3,64 \cdot 10^{-6} \cdot 700^2 / 6) \cdot [1 - (0,02 / 0,304)^2] = 0,91 ;$$

$$k'_b = 1 + x_0 b_0 l^2 / 12 = 1 + 0,304 \cdot 3,64 \cdot 10^{-6} \cdot 700^2 / 12 = 1,0452 ,$$

при этом

$$\underline{Z}_{л\Sigma} = (r_0 l k'_r + j x_0 l k'_x) / n_{\Sigma} = (0,02 \cdot 700 \cdot 0,8195 + j 0,304 \cdot 700 \cdot 0,91) / 2 = 5,74 + j 96,8 \text{ Ом};$$

$$b_{л\Sigma} = n_{\Sigma} b_0 l k'_b / 2 = 2 \cdot 3,64 \cdot 10^{-6} \cdot 700 \cdot 1,0452 / 2 = 25,9 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

индуктивные сопротивления и проводимость эквивалентного автотрансформатора подстанции приемной системы

$$x_{1\Sigma} = x_1 / n_{ат} = 39,8 / 3 = 13,27 \text{ Ом};$$

$$x_{2\Sigma} = 0$$

$$x_{3\Sigma} = x_3 / n_{ат} = 75,6 / 3 = 25,2 \text{ Ом};$$

$$b_{ат\Sigma} = n_{ат} b_{ат} = 3 \cdot 11,22 \cdot 10^{-6} = 33,66 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

переходное сопротивление эквивалентного синхронного компенсатора

$$x'_{дск\Sigma} = \frac{1}{n_{ск}} x'_{дск} \frac{U_{ск,ном}^2}{S_{ск,ном}} = \frac{1}{4} 0,43 \frac{15,75^2}{160} = 0,167 \text{ Ом}.$$

Приведем параметры схемы замещения, показанной на *рис. 3.5*, к ступени 220 кВ, т. е. к напряжению приемной системы. Для этого воспользуемся следующими формулами:

$$\underline{\dot{Z}} = \underline{Z} (k_{т1} k_{т2} \dots k_{тn})^2 ;$$

$$\underline{\dot{Y}} = \underline{Y} (k_{т1} k_{т2} \dots k_{тn})^2 ,$$

где  $K_{тi}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) – коэффициенты трансформации идеальных трансформаторов на пути между рассматриваемым элементом и сетью той ступени напряжения, приведение к которой выполняется.

Исходя из этого, получим:

$$\dot{x}'_{дг\Sigma} = x'_{дг\Sigma} = (k_{\tau} k_{\tau\text{Б-с}}^{-1})^2 = 0,0567 \left( \frac{525}{20} \frac{230}{500} \right)^2 = 8,27 \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}'_{\text{Н}} = Z_{\text{Н}} (k_{\tau} k_{\tau\text{Б-с}}^{-1})^2 = (1,96 + j 2,0) \left( \frac{525}{20} \frac{230}{500} \right)^2 = 286,0 + j 292,0 \text{ Ом};$$

$$\dot{x}'_{\tau\Sigma} = x_{\tau\Sigma} (k_{\tau\text{Б-с}}^{-1})^2 = 14,91 \left( \frac{230}{500} \right)^2 = 3,16 \text{ Ом};$$

$$\dot{b}'_{\tau\Sigma} = b_{\tau\Sigma} / (k_{\tau\text{Б-с}}^{-1})^2 = 34,9 \cdot 10^{-6} / (230/500)^2 = 1,647 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$\dot{Z}'_{\text{л}\Sigma} = Z_{\text{л}\Sigma} (k_{\tau\text{Б-с}}^{-1})^2 = (5,74 + j 96,8) (230/500)^2 = 1,217 + j 20,5 \text{ Ом};$$

$$\dot{b}'_{\text{л}\Sigma} = b_{\text{л}\Sigma} / (k_{\tau\text{Б-с}}^{-1})^2 = 25,9 \cdot 10^{-4} / (230/500)^2 = 122,2 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$\dot{x}'_{1\Sigma} = x_{1\Sigma} (k_{\tau\text{Б-с}}^{-1})^2 = 13,27 (230/500)^2 = 2,81 \text{ Ом};$$

$$\dot{x}'_{3\Sigma} = x_{3\Sigma} (k_{\tau\text{Б-с}}^{-1})^2 = 25,2 (230/500)^2 = 5,34 \text{ Ом};$$

$$\dot{b}'_{\text{ат}\Sigma} = b_{\text{ат}\Sigma} / (k_{\tau\text{Б-с}}^{-1})^2 = 33,66 \cdot 10^{-6} / (230/500)^2 = 158,9 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$\dot{x}'_{\text{дск}\Sigma} = x'_{\text{дск}\Sigma} = (k_{\tau\text{Б-н}} k_{\tau\text{Б-с}}^{-1})^2 = 0,167 \left( \frac{500}{15,75} \frac{230}{500} \right)^2 = 35,6 \text{ Ом}.$$

Для расчета динамической устойчивости рассматриваемой ЭЭС требуется знать постоянные инерции  $T_j$  эквивалентных синхронного компенсатора и турбоагрегата, т.е. генераторов и турбин КЭС. Значение постоянной инерции определяется по выражению

$$T_j = 2,14 \cdot 10^{-6} \frac{GD^2 n^2}{S_{\text{ном}}},$$

где  $GD^2$  – момент вращающихся масс,  $\text{т} \cdot \text{м}^2$ ;  $n_{\text{вр}}$  – номинальная частота вращения, об/мин;  $S_{\text{ном}}$  – номинальная мощность машины,  $\text{МВ} \cdot \text{А}$ .

Подставляя данные для турбоагрегата и синхронного компенсатора, получаем:

$$T_{j\tau} = 2,74 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot 3000^2 \cdot 0,85/300 = 5,59 \text{ с};$$

$$T_{j\text{ск}} = 2,74 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 750^2/160 = 2,89 \text{ с}.$$

Для эквивалентной машины, замещающей  $n$  одинаковых машин, постоянная инерции будет иметь то же значение, что и для одной машины, если ее отнести к сумме номинальных мощностей эквивалентруемых машин.

## Задача 2

Выполнить приведение к базовым условиям (пересчитать в относительные единицы) параметры схемы замещения элементов ЭЭС на *рис. 3.5*, которые приведены к напряжению приемной системы по заданным коэффициентам трансформации (см. задачу 1), принимая в качестве независимых базовых величин  $S_6 = 2000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  и  $U_6 = 220 \text{ кВ}$ .

**Решение.** Для пересчета в относительные единицы сопротивлений и проводимостей схемы замещения необходимо предварительно определить значение базового сопротивления:

$$Z_6 = U_6^2 / S_6 = 220^2 / 2000 = 24,2 \text{ Ом.}$$

При этом (см. задачу 1),

$$x'_{дг\Sigma} = \dot{x}'_{дг\Sigma} / Z_6 = 8,27 / 24,2 = 0,342;$$

$$\underline{Z}_н = \underline{\dot{Z}}_н / Z_6 = (286,0 + j 292,0) / 24,2 = 11,82 + j 12,06;$$

$$x'_{т\Sigma} = \dot{x}'_{т\Sigma} / Z_6 = 3,16 / 24,2 = 0,131;$$

$$b'_{т\Sigma} = \dot{b}'_{т\Sigma} Z_6 = 1,647 \cdot 10^{-4} \cdot 24,2 = 39,8 \cdot 10^{-4};$$

$$\underline{Z}_{л\Sigma} = \underline{\dot{Z}}_{л\Sigma} / Z_6 = (1,217 + j 20,5) / 24,2 = 0,0503 + j 0,847;$$

$$b_{л\Sigma} = \dot{b}_{л\Sigma} Z_6 = 122,2 \cdot 10^{-4} \cdot 24,2 = 0,296;$$

$$x_{1\Sigma} = \dot{x}_{1\Sigma} / Z_6 = 2,81 / 24,2 = 0,116;$$

$$x_{3\Sigma} = \dot{x}_{3\Sigma} / Z_6 = 5,34 / 24,2 = 0,221;$$

$$b_{ат\Sigma} = \dot{b}_{ат\Sigma} Z_6 = 158,9 \cdot 10^{-4} \cdot 24,2 = 0,384;$$

$$x'_{дск\Sigma} = \dot{x}'_{дск\Sigma} / Z_6 = 35,6 / 24,2 = 1,471.$$

Эквивалентные постоянные инерции турбоагрегатов КЭС и синхронных компенсаторов, установленных на подстанции приемной системы, также должны быть отнесены к базовой мощности в соответствии с выражениями

$$T_{jг\Sigma} = T_{jг} \frac{n_{г} P_{г.ном} / \cos \varphi_{г.ном}}{S_6} = T_{jг} \frac{S_{г.ном\Sigma}}{S_6};$$

$$T_{jск\Sigma} = T_{jск} \frac{n_{ск} S_{ск.ном}}{S_6} = T_{jск} \frac{S_{ск.ном\Sigma}}{S_6}.$$

Используя результаты определения постоянных инерции для турбоагрегата и синхронного компенсатора (см. задачу 1.1), получаем следующие значения эквивалентных постоянных инерции, отнесенных к базовой мощности:

$$T_{jг\sigma} = 5,59 \frac{6 \cdot 300/0,85}{2000} = 5,92 \text{ с};$$

$$T_{jск\sigma} = 2,89 \frac{4 \cdot 160}{2000} = 0,924 \text{ с}.$$

До начала расчета динамической устойчивости к базовым условиям должны быть приведены и параметры исходного режима (ЭДС синхронных машин, напряжение на шинах приемной системы, активная мощность, выдаваемая генераторами электростанции).

### Задача 3

Электроэнергетическая система показана в виде схемы замещения на *рис. 3.6,а*. Вычислить собственные и взаимные проводимости схемы. Расчеты выполнить: а) методом преобразований цепи; б) методом единичных токов.

**Решение.** Решая задачу методом преобразований, приводим цепь к Т-образной форме. Для этого треугольник  $ab_0$  схемы на *рис. 3,б, а* заменяем эквивалентной звездой:

$$\underline{Z}_{ac} = \frac{\underline{Z}_3 \underline{Z}_5}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_5} = \frac{10 \cdot j 2}{10 + 5 + j 2} = 0,175 + j 1,31;$$

По аналогии с  $\underline{Z}_{ac}$  находим  $\underline{Z}_{bc}$  и  $\underline{Z}_{c0}$ :

$$\underline{Z}_{bc} = 0,0874 + j 0,655;$$

$$\underline{Z}_{c0} = 3,28 - j 0,437.$$

Далее находим сопротивления ветвей Т-образной схемы (в соответствии с *рис. 1.3,б*):

$$\underline{Z}'_1 = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ac} = j 1 + 0,175 + j 1,31 = 0,175 + j 2,31 = 2,31 \angle 85,7^\circ;$$

$$\underline{Z}'_2 = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{bc} = j 2 + 0,0874 + j 0,655 = 0,0874 + j 2,655 = 2,655 \angle 88,1^\circ;$$

$$\underline{Z}'_3 = \underline{Z}_{c0} = 3,28 - j 0,437 = 3,305 \angle -7,6^\circ.$$



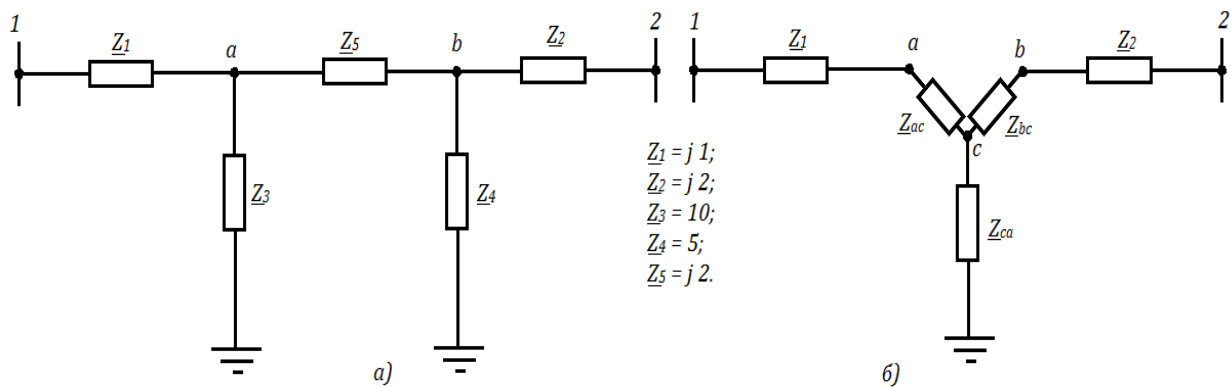


Рисунок 3.6 - Исходная (а) и преобразованная (б) схемы замещения ЭЭС

Определяем значения собственных и взаимных сопротивлений по формулам

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}'_1 + \frac{\underline{Z}'_2 \underline{Z}'_3}{\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3};$$

$$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}'_2 + \frac{\underline{Z}'_1 \underline{Z}'_3}{\underline{Z}'_1 + \underline{Z}'_3};$$

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}'_1 + \underline{Z}'_2 \frac{\underline{Z}'_1 \underline{Z}'_2}{\underline{Z}'_3}.$$

По условиям задачи

$$\underline{Z}_{11} = 0,175 + j 2,31 + \frac{2,655 \angle 88,1^\circ \cdot 3,305 \angle -7,6^\circ}{0,0874 + j 2,655 + 3,28 - j 0,437} = 4,25 \angle 66,99^\circ;$$

$$\underline{Z}_{22} = 0,0874 + j 2,655 + \frac{2,31 \angle 85,7^\circ \cdot 3,305 \angle -7,6^\circ}{0,175 + j 2,31 + 3,28 - j 0,437} = 4,35 \angle 72^\circ;$$

$$\underline{Z}_{12} = 0,175 + j 2,31 + 0,0874 + j 2,655 + \frac{2,31 \angle 85,7^\circ \cdot 2,655 \angle 88,1^\circ}{3,305 \angle -7,6^\circ} = 5,18 \angle 107,9^\circ.$$

Следовательно,

$$y_{11} = 1/4, 25 = 0,236; a_{11} = 90^\circ - 66,9^\circ = 23,1^\circ;$$

$$y_{22} = 1/4, 35 = 0,230; a_{22} = 90^\circ - 72^\circ = 18,0^\circ;$$

$$y_{12} = 1/5,18 = 0,193; a_{12} = 90^\circ - 107,9^\circ = -17,9^\circ.$$

Для вычисления проводимостей  $\underline{Y}_{11}$  и  $\underline{Y}_{12}$  методом единичных токов соединяем точку 2 с землей (или с обратным проводом, что одно и то же) и полагаем в этом режиме ток  $I_{20}=1,0\angle 0$  (см. рис. 3,6а).

В этом случае

$$\dot{U}_b = \dot{I}_{20} Z_2 = 1 \cdot j 2 = j 2;$$

$$\dot{I}_{b0} = \frac{\dot{U}_b}{Z_4} = \frac{j 2}{5} = j 0,4;$$

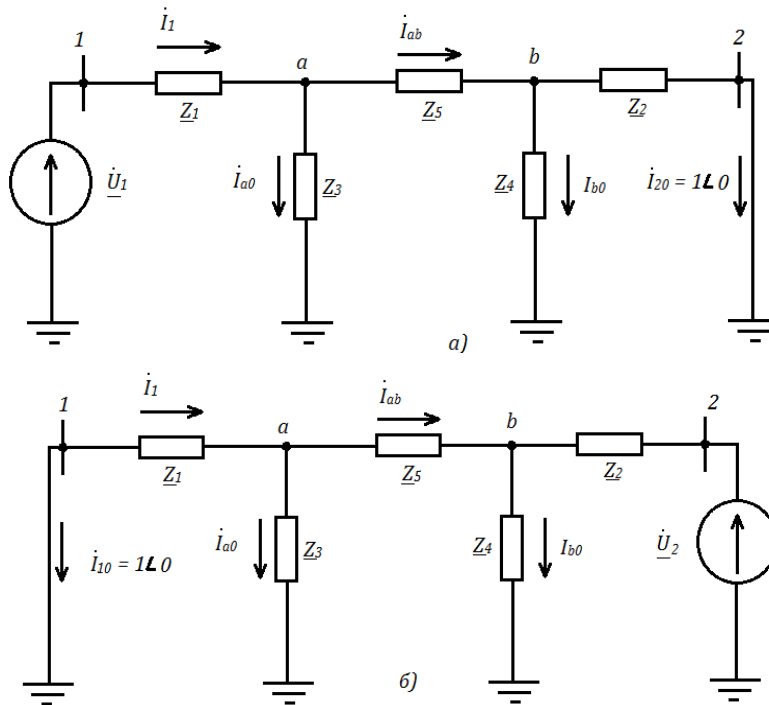


Рисунок 3.7 - Схемы замещения для определения проводимостей  $\underline{Y}_{11}$ ,  $\underline{Y}_{12}$  (а) и проводимостей  $\underline{Y}_{22}$ ,  $\underline{Y}_{21}$  (б)

$$\dot{I}_{ab} = \dot{I}_{20} + \dot{I}_{b0} = 1 + j 0,4;$$

$$\Delta \dot{U}_{ab} = \dot{I}_{ab} Z_5 = (1 + j 0,4) j 2 = -0,8 + j 2;$$

$$\dot{U}_a = \dot{U}_b + \Delta \dot{U}_{ab} = j 2 - 0,8 + j 2 = -0,8 + j 4;$$

$$\dot{I}_{a0} = \frac{\dot{U}_a}{Z_3} = \frac{-0,8 + j 4}{10} = -0,08 + j 0,4;$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{ab} + \dot{I}_{a0} = 1 + j 0,4 - 0,08 + j 0,4 = 0,92 + j 0,8 = 1,22\angle 41,0^\circ;$$

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{I}_1 + Z_1 = (0,92 + j 0,8) j 1 = -0,8 + j 0,92;$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_a + \Delta\dot{U}_1 = -0,8 + j 4 - 0,8 + j 0,92 = -1,6 + j 4,92 = 5,18 \angle 108^\circ.$$

Следовательно, согласно определению

$$\underline{Y}_{12} = \frac{\dot{i}_{20}}{\dot{U}_1} = \frac{1,0 \angle 0}{5,18 \angle 108^\circ} = 0,193 \angle -108^\circ;$$

$$\underline{Y}_{11} = \frac{\dot{i}_1}{\dot{U}_1} = \frac{1,22 \angle 41,0^\circ}{5,18 \angle 108^\circ} = 0,236 \angle -67,0^\circ$$

Для определения проводимости  $\underline{Y}_{22}$  необходимо соединить с землей точку  $I$  (рис. 5.7,б) и положить в сопротивлении  $\underline{Z}_1$  ток  $\dot{i}_{10} = 1 \angle 0$ . Выполняя расчет этого режима для схемы рис. 1.4,б, получаем:

$$\dot{U}_a = 1 \cdot j 1 = j 1;$$

$$\dot{i}'_{a0} = \frac{j 1}{10} = j 0,1;$$

$$\dot{i}_{ba} = 1 + j 0,1;$$

$$\Delta\dot{U}'_{ab} = (1 + j 0,1)j 2 = -0,2 + j 2;$$

$$\dot{U}_b = j 1 - 0,2 + j 2 = -0,2 + j 3;$$

$$\dot{i}'_{b0} = \frac{-0,2 + j 3}{5} = -0,04 + j 0,6;$$

$$\dot{i}_2 = 1 + j 0,1 - 0,04 + j 0,6 = 0,96 + j 0,7 = 1,19 \angle 36,1^\circ;$$

$$\Delta\dot{U}_2 = (0,96 + j 0,7)j 2 = -1,4 + j 1,92;$$

$$\dot{U}_2 = -0,2 + j 3 - 1,4 + j 1,92 = -1,6 + j 4,92 = 5,18 \angle 108^\circ;$$

$$\underline{Y}_{22} = \frac{1,19 \angle 36,1^\circ}{5,18 \angle 108^\circ} = 0,23 \angle -71,9^\circ.$$

С целью проверки правильности предыдущих расчетов определим взаимную проводимость:

$$\underline{Y}_{12} = \frac{\dot{i}_{10}}{\dot{U}_2} = 0,193 \angle -108^\circ.$$

Это значение совпадает со значением  $\underline{Y}_{12}$ , найденным из расчета по схеме рис. 3.7,а.

### Задача 1.5

На рис. 3.8 представлена эквивалентная схема простейшей ЭЭС.

Требуется найти зависимость угла сдвига векторов напряжения, приложенных в точках 1 и 2 схемы, от величины напряжения  $U_2$  при передаче от точки 1 к точке 2 схемы мощности  $P_0 = 0,8$ .

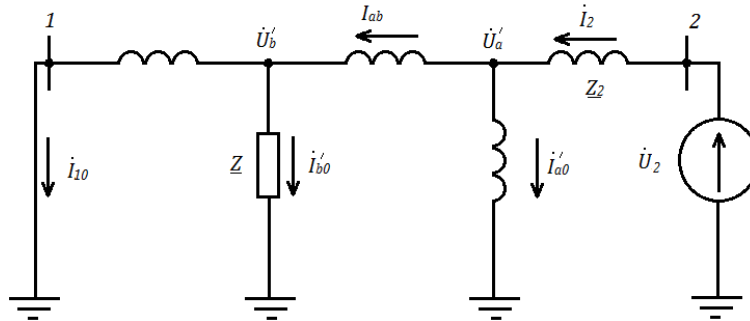


Рисунок 3.8 - Эквивалентная схема простейшей ЭЭС

*Решение.* Для рассматриваемой схемы, содержащей только реактивное сопротивление, справедливо выражение

$$P = \frac{U_1 U_2}{x} \sin \delta,$$

где  $\delta$  - искомый угол.

Поэтому для условий задачи

$$\sin \delta = \frac{P_x}{U_1 U_2} = \frac{0,8 \cdot 1,2}{U_2}.$$

Результаты расчетов, изображенные графически (рис. 3.9), показывают, что уменьшение напряжения  $U_2$  при принятых условиях, возможно, не более чем на 4% по отношению к напряжению  $U_1$ .

При более значительном снижении напряжения в точке 2 заданная мощность  $P_0$  не может быть передана.

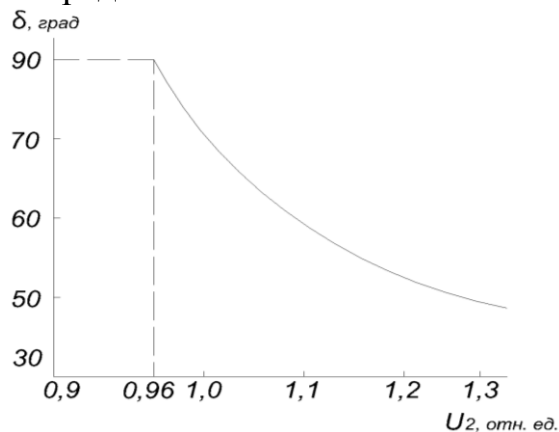


Рисунок 3.9 - Зависимость угла сдвига векторов напряжения от величины напряжения в точке 2.

### 3.1.2 Математическое моделирование элементов электрических систем при изучении переходных процессов

При исследовании переходных процессов в электрических системах, описываемых дифференциальными уравнениями, начинают с составления уравнений, описывающих отдельные элементы системы: генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, регулирующие устройства (регуляторы возбуждения генераторов и регуляторы скорости турбин), асинхронные двигатели и др.

Как правило, все расчеты переходных процессов и предшествующих им установившихся режимов проводятся в системе относительных единиц. Однако возможны случаи, когда запись уравнений переходных процессов может осуществляться частично в относительных, а частично в именованных единицах, что оказывается более удобным для проведения дальнейших исследований.

#### Задача 1

Для электрической цепи, приведенной на рис. 3.10, составить дифференциальное уравнение и выражение передаточной функции.

**Решение.** Для случая, когда индуктивность не зависит от тока (катушка без сердечника) и является постоянной величиной, дифференциальное уравнение имеет вид

$$u_{\text{вх}}(t) = (R_1 + R_2)i + L \frac{di}{dt}.$$

В операторной форме данное уравнение записывается как

$$u_{\text{вх}}(p) = (R_1 + R_2)i(p) + L p i(p).$$

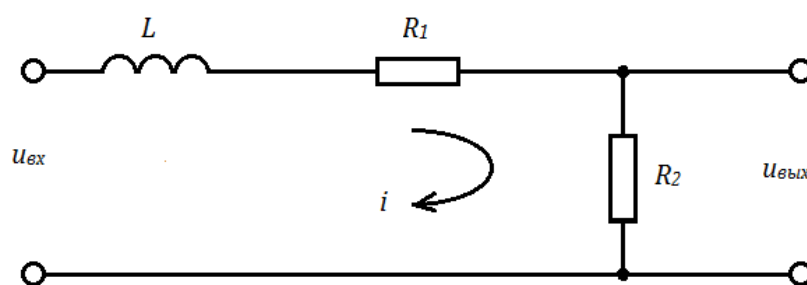


Рисунок 3.10 - Схема четырехполюсника

Напряжение на выходе равно падению напряжения на сопротивлении:

$$u_{\text{вых}}(p) = R_2 i(p).$$

Передаточная функция данной цепи записывается как

$$W(p) = \frac{u_{\text{ВЫХ}}(p)}{u_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{R_2 j(p)}{(R_1 + R_2) i(p) + L p i(p)} = \frac{R_2 / (R_1 + R_2)}{1 + L p / (R_1 + R_2)} = \frac{k}{1 + p T}$$

где  $k = R_2 / (R_1 + R_2)$  – коэффициент усиления звена цепи;  $T = L / (R_1 + R_2)$  – постоянная времени звена.

### Задача 2

Для электрической цепи, приведенной на рис. 3.11, составить дифференциальное уравнение и выражение передаточной функции.

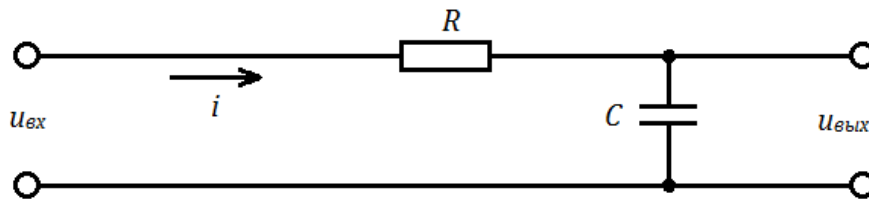


Рисунок 3.11 - Схема четырехполюсника с емкостью

*Решение.* Дифференциальное уравнение для данной цепи имеет вид

$$u_{\text{ВХ}}(t) = R i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt.$$

В операторной форме имеем

$$u_{\text{ВХ}}(p) = R i(p) + i(p) / C p.$$

Напряжение на выходе

$$u_{\text{ВЫХ}}(p) = i(p) / C p.$$

Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{u_{\text{ВЫХ}}(p)}{u_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{i(p) / C p}{R i(p) + i(p) / C p} = \frac{1}{1 + R C p} = \frac{1}{1 + p T}.$$

### Задача 3

Для электрической цепи, приведенной на рис. 3.12, составить дифференциальное уравнение переходного процесса и выражение передаточной функции.

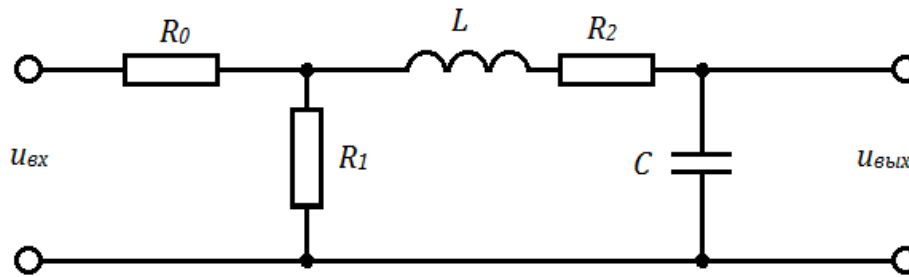


Рисунок 3.12 - Схема четырехполюсника с индуктивностью и емкостью

**Решение.** Дифференциальное уравнение имеет вид

$$T_L T_C \frac{d^2 u_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} = T_C \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt} + u_{\text{ВЫХ}} = k u_{\text{ВХ}},$$

$$\text{где } T_L = L/R_3; R_3 = R_2 + \frac{R_0 R_1}{R_0 + R_1}; T_C = R_3 C; k = \frac{R_1}{R_1 + R_0}.$$

В операторной форме дифференциальное уравнение запишется как

$$T_L T_C p^2 u_{\text{ВЫХ}}(p) + T_C p u_{\text{ВЫХ}}(p) + u_{\text{ВЫХ}}(p) = k u_{\text{ВХ}}(p).$$

Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{u_{\text{ВЫХ}}(p)}{u_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{k}{1 + p T_C + p^2 T_L T_C}.$$

#### Задача 4

Составить дифференциальное уравнение трансформатора (рис. 3.13) на холостом ходу при допущении отсутствия рассеяния, а также передаточную функцию данного звена.

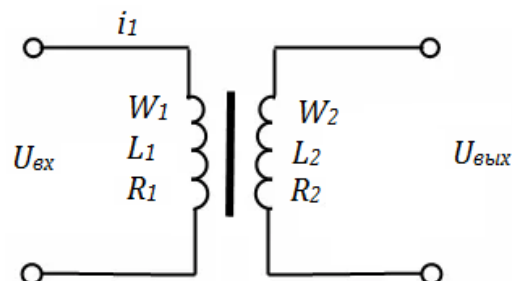


Рисунок 3.13 - Схема двухобмоточного трансформатора

**Решение.** Составляем дифференциальное уравнение для первичной цепи

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 = u_{\text{ВХ}}.$$

Выходное напряжение пропорционально ЭДС первичной обмотки

$$u_{\text{ВЫХ}} = L_2 \frac{di_1}{dt} = \frac{w_2}{w_1} L_1 \frac{di_1}{dt}.$$

Решая совместно оба уравнения относительно входного и выходного напряжения, получаем

$$T \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt} + u_{\text{ВЫХ}} = kT \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt}$$

или в операторной форме

$$Tpu_{\text{ВЫХ}}(p) + u_{\text{ВЫХ}}(p) = kTpu_{\text{ВХ}}(p),$$

$$\text{где } k = w_2/w_1, T = L_1/R_1.$$

Передачная функция звена

$$W(p) = \frac{u_{\text{ВЫХ}}(p)}{u_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{pkT}{1 + pT}.$$

### 3.2 Темы рефератов

1. Уравнение элементов электроэнергетической системы. Пример составления системы переходных процессов в явнополюсном синхронном генераторе.
2. Уравнение элементов электроэнергетической системы. Пример составления системы переходных процессов в асинхронном двигателе.
3. Классификация электрических режимов. Составить уравнения, характеризующие электромагнитные переходные процессы в двух обмоточном трансформаторе.
4. Порядок расчетов при определении параметров элементов электроэнергетической системы. Привести пример одноцепной воздушной линии 6 кВ.
5. Порядок расчетов при определении параметров элементов электроэнергетической системы.
6. Модель расчетной схемы электроэнергетической системы. Привести пример: составить схему замещения и определить ее параметры.
7. Порядок расчета режимов простейших замкнутых сетей. Привести пример.
8. Выбор средств регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности. Привести пример модели.
9. Решение линейных уравнений установившегося режима прямыми методами. Привести пример модели.
10. Порядок составления линейных уравнений установившегося режима электрической системы.



11. Расчет электроэнергетических режимов. Методы расчета установившихся режимов. Уравнения режимов.
12. Частные случаи расчета режимов электрических сетей. Численные методы решения уравнений электрического режима.
13. Оптимизация режимов электрических систем. Задачи оптимизации. Методы оптимизации.
14. Оптимизация распределения активных мощностей между электростанциями. Оптимизация режима электрической сети по напряжению, реактивной мощности и коэффициентам трансформации.
15. Основы управления режимами электрических систем.
16. Составление (модель) расчетной схемы электрической системы.
17. Расчеты параметров симметричных установившихся режимов. Общие положения. Расчет режимов простейших замкнутых сетей.
18. Выбор средств регулирования и компенсации реактивной мощности. Привести пример.
19. Расчёты установившихся режимов сложных электрических систем. Составление линейных уравнений установившегося режима электрической системы.
20. Решение линейных уравнений установившегося режима электрической системы прямыми методами.
21. Экономические интервалы. Экономические интервалы мощности.
22. Экономические интервалы. Экономические интервалы времени и выбор сечения проводов с учетом роста нагрузки.
23. Динамические свойства регулируемой электрической системы. Качественные особенности динамических свойств электрической системы.

## 4 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### 4.1 Рекомендуемая литература

|                                  | Авторы, составители  | Заглавие  | Издательство, год       | Количество |
|----------------------------------|--|---|-------------------------|------------|
| <b>Основная литература</b>       |  |   |                         |            |
| 1                                | Хрущев Ю.В.  | Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие.<br><a href="https://e.lanbook.com/book/10327">https://e.lanbook.com/book/10327</a>   | Томск: ТПУ, 2012. 154 с | ЭБС        |
| <b>Дополнительная литература</b> |  |   |                         |            |
|                                  | Авторы, составители  | Заглавие  | Издательство, год       | Количество |
| 1                                | Ежков В.В., Зеленохат Н.И., Литкенс И.В., Поляков М.В., Пуятин В.А., Строев В.А. и др. | Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях<br><a href="http://www.studmed.ru/stroev-va-perehodnye-processy-elektricheskikh-sistem-v-primerah-i-illyustraciyah_14aab567714.html">http://www.studmed.ru/stroev-va-perehodnye-processy-elektricheskikh-sistem-v-primerah-i-illyustraciyah_14aab567714.html</a> | М.: Знак, 1996. -224с.  | ЭБС        |

Продолжение таблицы

|                                |                         |   |                                    |            |
|--------------------------------|-------------------------|---|------------------------------------|------------|
| 2                              | Гольдберга О. Д.        | Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: учеб. пособие для вузов.   | М.: Высш. Шк., 2001. – 512 с.      | 10         |
| 3                              | Татур Т. А., Татур В. Е | Установившиеся и переходные процессы в электрических цепях: учеб. пособие для вузов.<br><a href="http://www.studmed.ru/tatur-ta-tatur-ve-ustanovivshiesya-i-perehodnye-processy-v-elektricheskikh-cepuyah-2001_fc58b6294de.html">http://www.studmed.ru/tatur-ta-tatur-ve-ustanovivshiesya-i-perehodnye-processy-v-elektricheskikh-cepuyah-2001_fc58b6294de.html</a> | М.: Высш. шк., 2001. - 407 с., ил. | ЭБС        |
| <b>Методические разработки</b> |                         |   |                                    |            |
|                                | Авторы, составители     | Заглавие  | Издательство, год                  | Количество |
| 1                              | Широбокова О.Е.         | Расчеты установившихся и переходных электрических режимов. Методическое пособие   | БГАУ, 2017                         | ЭБС        |
| 2                              | Широбокова О.Е.         | Модели и методы в расчетах систем электроснабжения. Методическое пособие  | БГАУ, 2017                         | ЭБС        |

#### 4.2 Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. Компьютерная информационно-правовая система «КонсультантПлюс»
2. Профессиональная справочная система «Техэксперт»
3. Официальный интернет-портал базы данных правовой информации <http://pravo.gov.ru/>
4. Портал Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования <http://fgosvo.ru/>
5. Портал "Информационно-коммуникационные технологии в образовании" <http://www.ict.edu.ru/>
6. Web of Science Core Collection политематическая реферативно-библиографическая и наукометрическая (библиометрическая) база данных <http://www.webofscience.com>
7. Полнотекстовый архив «Национальный Электронно-Информационный Консорциум» (НЭИКОН) <https://neicon.ru/>
8. Базы данных издательства Springer <https://link.springer.com/>
9. <http://www.go-radio.ru/master.html> (сайт содержит программы и методы устранения неисправностей)
10. <http://madelectronics.ru/>
11. <http://de.ifmo.ru/~lav/cs/EWorkBench/index.html> (моделирование логических схем в "Electronics Workbench")
12. <http://radio-hobby.org/>
13. «Техэксперт» Профессиональная справочная система

### **4.3 Перечень программного обеспечения**

Операционная система Microsoft Windows XP Professional Russian  
Операционная система Microsoft Windows 7 Professional Russian  
Операционная система Microsoft Windows 10 Professional Russian  
Офисное программное обеспечение Microsoft Office 2010 Standart  
Офисное программное обеспечение Microsoft Office 2013 Standart  
Офисное программное обеспечение Microsoft Office 2016 Standart  
Офисное программное обеспечение OpenOffice  
Офисное программное обеспечение LibreOffice  
Программа для распознавания текста ABBYY Fine Reader 11  
Программа для просмотра PDF Foxit Reader  
Autodesk AutoCAD 2010  
NI Multisim v.10.1

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гиршин С.С., Шукин О.С., Киргизов А.А. Электропитающие системы и электрические сети: конспект лекций. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. 88 с.
2. Маркушевич Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1984. 104 с.
3. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях: учебное пособие для вузов / В.В. Ежков, Н.И. Зеленохат, И.В. Литкенс и др.; под ред. В.А. Строева. М.: Знак, 1996. 224 с.
4. Широбокова О.Е., Прыгов Н.М., Маркарянц Л.М. Практикум по теоретическим основам электротехники: методическое пособие. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2014.
5. Широбокова О.Е. Теоретические основы электротехники: учебно-методическое пособие к выполнению самостоятельной работы студентов. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2015.
6. Широбокова О.Е., Прыгов Н.М., Маркарянц Л.М. Учебно-методическое пособие для выполнения контрольной работы студентами инженерно-технологического факультета очной и заочной формы обучения. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2012.
7. Широбокова О.Е., Прыгов Н.М., Прыгова В.В. О единице измерения реактивной мощности (квар) // Проблемы энергообеспечения, информатизации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК: VIII Международная научно-техническая конференция / под общ. ред. Л.М. Маркарянц. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2014. С. 196-198.
8. Широбокова О.Е. Методическое пособие по курсу расчеты установившихся и переходных электрических режимов для магистрантов, обучающихся по направлению 130402 - «Электроэнергетика и электротехника». Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018.
9. Широбокова О.Е. Методическое пособие по курсу модели и методы в расчетах систем электроснабжения для магистров, обучающихся по направлению 130402 - «Электроэнергетика и электротехника». Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018.

Учебное издание

Широбокова Ольга Евгеньевна

## **Расчёты установившихся и переходных электрических режимов**

Методические рекомендации по организации самостоятельной  
работы по дисциплине «Расчёты установившихся и  
переходных электрических режимов»  
для студентов очной и заочной форм обучения,  
направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Редактор Осипова Е.Н.

---

Подписано к печати 06.11.2019 г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Усл. п. л. 2,15. Тираж 25 экз. Изд. 6521

---

Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии.  
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ