

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

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И АВТОМАТИКИ

Широбокова О.Е.

# **Модели и методы в расчетах систем электроснабжения**

Методические рекомендации  
по организации самостоятельной работы  
по дисциплине  
«Модели и методы в расчетах систем электроснабжения»  
для студентов очной и заочной форм обучения  
направления подготовки  
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Брянская область, 2018

УДК 658.26 (076)  
ББК 31.19  
Ш 64

Широбокова, О. Е. Модели и методы в расчетах систем электроснабжения: методические рекомендации по организации самостоятельной работы по дисциплине «Модели и методы в расчетах систем электроснабжения» для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / О. Е. Широбокова. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018 – 20 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 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 г.*

© Брянский ГАУ, 2018 г.

© Широбокова О.Е., 2018 г.

## Введение

Дисциплина модели и методы в расчетах систем электроснабжения 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 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 содержание дисциплины

1. Общие сведения режимов электрических систем
  - 1.1 Классификация режимов
  - 1.2 Модели систем электроснабжения
  - 1.3 Модель электрической системы с узлом комплексной нагрузки
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.

## 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 «Модели и методы в расчетах систем электроснабжения» 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 электроснабжения 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 си-

стемы под воздействием различных причин (КЗ, включение и отключение электроприемника, переключение на резервное питание);

б. Режим, в котором находится электроэнергетическая система после локализации аварии до установления нормального режима;

с. 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;

д. *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 -?**

а. Изменение установившегося режима электроэнергетической системы под воздействием различных причин (КЗ, включение и отключение электроприемника, переключение на резервное питание);

б. *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;*

с. Режим, в котором находится электроэнергетическая система после локализации аварии до установления нормального режима;

#### **7. Установившийся режим – это?**

а. Режим, в котором находится электроэнергетическая система после локализации аварии до установления нормального режима;

б. 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.

с. *Режим электроэнергетической системы, который характеризуется неизменными параметрами;*

д. Режим, возникающий в результате аварий в электроэнергетической системе (короткое замыкание, аварийное отключение нагрузок и др.);

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

а. Нарушение синхронной работы генераторов электростанций и/или "опрокидывание" двигателей узлов нагрузки в течение незначительного промежутка времени;

б. 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?**

- a. Зависимость активной мощности от угла  $\delta$  между векторами напряжения на шинах приёмной системы и ЭДС синхронной машины;
- b. Зависимость реактивной мощности от угла  $\delta$  между векторами напряжения на шинах приёмной системы и ЭДС синхронной машины;
- c. 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?**

- a.  $\frac{dP}{d\delta} > 0 \dots$
- b.  $\frac{dP}{d\delta} = 0$ ;
- c.  $\frac{dP}{d\delta} < 0$ .

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

- a. При работе синхронного генератора на ёмкостную нагрузку;
- b. При перегрузке электропередачи;
- c. При работе синхронного генератора на полную нагрузку.

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

- a. При работе синхронного генератора на ёмкостную нагрузку.
- b. При перегрузке электропередачи;
- c. 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?**

- a. Значительно уменьшается;
- b. Значительно увеличивается;
- c. Увеличивается незначительно.

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

- a. Значительно уменьшается;
- b. Значительно увеличивается;
- c. 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 b.

**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 Контрольные задания и критерии оценки

#### 3.1 Пример построения модели системы электроснабжения (СЭС)

СЭС можно представить как сложную систему, состоящую из множества элементов – единиц электрооборудования, которые характеризуются набором эксплуатационных параметров  $\Theta$ , которые могут изменяться. Одной из причин разброса параметров является процесс старения, который имеет, как правило, монотонный характер и обычно возрастает с течением времени или повторением возмущающих воздействий. При задании допусков на разброс параметров оборудования имеется некоторая избыточность в оценке работоспособного состояния, которая в ряде случаев может быть нерациональной. Она тем больше, чем больше у него параметров [1,2]. Может возникнуть ситуация, когда параметры оборудования находятся вне допусковой области, но внутри границ работоспособного состояния. В этом случае часто имеется возможность продолжать использовать устройство, тем самым экономя материальные и временные ресурсы.

Выделим три области значений эксплуатационных параметров и введем состояния электрооборудования:

- ЭО, исправно, если значение его параметров находится в пределах контрольной области, т.е.  $h \in [h_0, h_k)$ , где  $h_0, h_k$  – номинальное и контрольное значения параметра  $\Theta$  соответственно,  $h$  – его величина.

– ЭО работает с дефектом по 1-му параметру (неисправно, но работоспособно), если его величина превысила контрольное значение, но находится в пределах поля допуска, установленного технической документацией, т.е.  $h \in [h_k, h_T)$ , где  $h_T$  – граница поля допуска.

– ЭО отказало по 1-му параметру (неработоспособно), если его значение превысило границу поля допуска.

Рассмотрение промежуточного состояния между нормой и отказом необходимо при решении задачи определения возможности внедрения диагностического контроля на постоянной основе, чтобы оценить степень его влияния на надежность СЭС. Одной из важнейших характеристик процесса диагностирования является период его проведения  $T_d$  [3].

Введя состояния, в которых могут находиться электрооборудование и система электроснабжения, перейдем к построению математической модели функционирования СЭС.

### **Разработка модели**

Реальный процесс функционирования СЭС характеризуется тем, что переход из одного состояния в другое в общем случае возможен в любой случайный момент времени. При этом выбор значения периода диагностирования  $T_d$  влияет на комплексные показатели надежности СЭС – коэффициент готовности и коэффициент технического использования. На начальном этапе определения зависимости показателей надежности от периода диагностирования необходимо построить графическую и математическую модели функционирования СЭС.

Введем понятия, отражающие степень воздействия персонала, эксплуатирующего электроустановки, на СЭС в зависимости от технического состояния электрооборудования. Процесс диагностирования ЭО состоит в том, что периодически через временной интервал  $T_d$  контролируется значение определяющего параметра, характеризующего приближение ЭО к отказу или появлению дефекта. Будем считать, что плановое диагностирование (Д) проводится при отсутствии отказа или дефекта. Если же ЭО отказало или в нем появился дефект, причем отказ и появление дефекта обнаруживаются обслуживающим персоналом, то проводится аварийный ремонт (АР) или текущий ремонт (ТР) соответственно. Следующее диагностирование назначается через период  $T_d$  после их устранения. Предполагается, что АР и ТР полностью восстанавливают ЭО.

Зададим характеристику, отражающую квалификацию обслуживающего персонала и технический уровень аппаратуры диагностирования. Обозначим через  $\alpha$  вероятность того, что по результатам технического диагностирования не будет назначен ремонт, причем в общем случае  $0 < \alpha \leq 1$ . Если дефект при проверке не обнаруживается, то ЭО в течение времени  $T_d$ , т.е. до следующего диагностирования, рассматривается персоналом как исправное.

Наиболее полно и целесообразно процесс функционирования СЭС описать с использованием аппарата полумарковских случайных процессов. Рассмотрим марковскую однородную стратегию обслуживания [4]. При длительной эксплуатации системы такая стратегия обслуживания вносит устойчивость, удобна при планировании работ при проведении диагностирования.

Перейдем к формальному построению модели. С учетом выделенных состояний оборудования и воздействия на нее обслуживающего персонала множество состояний  $S$  для СЭС включает следующие элементы:

- $S_1$  – СЭС находится в состоянии исправной работы;
- $S_2$  – ЭО диагностируется, находясь в неисправном состоянии. При обнаружении дефекта ЭО принимается решение о необходимости проведения текущего ремонта СЭС;
- $S_3$  – СЭС отказала, проводится аварийный ремонт;
- $S_4$  – ЭО диагностируется, находясь в исправном состоянии;
- $S_5$  – в СЭС проводится текущий ремонт;
- $S_6$  – СЭС работает при наличии дефекта.

Схема смены состояний СЭС приведена в виде графа, изображенного на рис. 1. На графе случайное время перехода из состояния в состояние обозначено греческой буквой  $t$ , а детерминированное – латинскими буквами  $t$  или  $T$ .

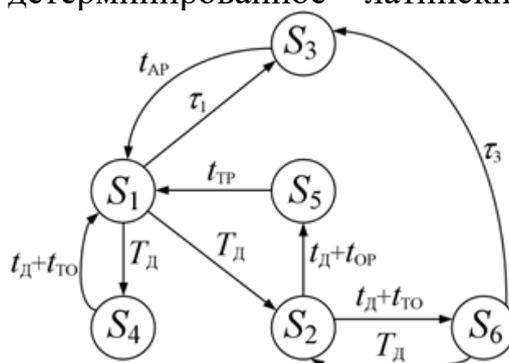


Рисунок 6.3 - Ориентированный граф смены состояний СЭС в процессе его эксплуатации

В соответствии с принятыми состояниями предполагается, что заданы:

$\bar{F} = \{F_1(t), F_2(t), F_3(t)\}$  – вектор функций, определяющих надежность СЭС, где  $F_1(t)$  – функция распределения времени безотказной работы,  $F_1(t) = 1 - P_1(t)$ , где  $P_1(t)$  – вероятность того, что за время  $\tau \geq t$  не возник отказ;  $F_2(t)$  – функция распределения времени, в течение которого не возник дефект,  $F_2(t) = 1 - P_2(t)$ , где  $P_2(t)$  – вероятность того, что дефект не появился за время  $\tau \geq t$ ;  $F_3(t)$  – функция распределения времени безотказной работы ЭО с дефектом (неисправного ЭО),  $F_3(t) = 1 - P_3(t)$ ,  $P_3(t)$  – вероятность того, что за время  $\tau \geq t$  не наступил отказ неисправного ЭО.

А также  $\bar{R} = \{\alpha, t_d, t_{то}, t_{ор}, t_{тр}, t_{зр}\}$  – вектор параметров системы эксплуатации, где  $\alpha$  – вероятность того, что по результатам технического диагностирования не будет назначен ремонт ЭО;

$t_{\text{д}}, t_{\text{ТО}}, t_{\text{оп}}, t_{\text{тр}}, t_{\text{ар}}$  – средние времена продолжительности диагностирования, технического обслуживания, ожидания ремонта, текущего и аварийного ремонтов соответственно.

Указанные предпосылки позволяют выбрать управляемый полумарковский дискретный случайный процесс  $\{\eta(t), t \geq 0\}$  [4, 5] в качестве модели функционирования СЭС, при диагностировании ЭО, где  $h(t) = S_i$  означает, что в момент времени  $t$  процесс находится в состоянии  $S_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ . На рис. 2 представлена часть одной из возможных реализаций процесса  $h(t)$ .

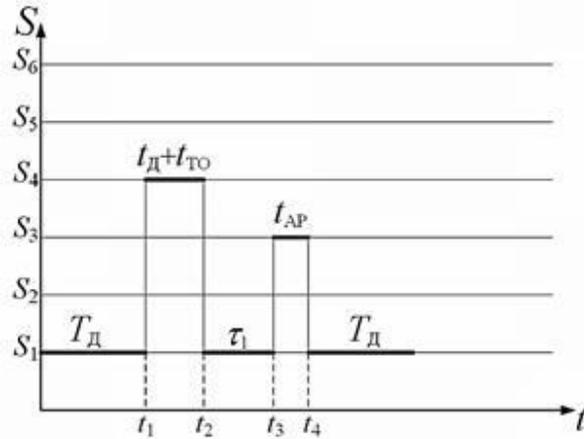


Рисунок 2 - Пример реализации полумарковского процесса

Задача определения показателей надежности с помощью разработанной модели может быть решена через определение средней доли времени пребывания процесса  $h(t)$  в каждом из состояний  $S_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ . Напрямую из процесса  $h(t)$  найти эти характеристики не представляется возможным, поэтому для их определения используем метод вложенных цепей Маркова [6].

Матрица переходов для цепи Маркова  $\{\eta(t)\}$ , соответствующая графу, изображенному на рис. 1, имеет вид:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & (1-F_1) \cdot F_2 & F_1 & (1-F_1) \cdot (1-F_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\alpha & \alpha \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-F_3 & F_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Отметим, что в (1) аргумент  $T_{\text{д}}$  в функциях распределений  $F_1, F_2, F_3$  опущен с целью упрощения записи матрицы.

Для цепи  $\{\eta(t)\}$  с матрицей переходных вероятностей (1) существует единственное стационарное предельное распределение вероятностей (финальные вероятности).

$$\bar{\pi} = \{ \pi_1(T_n), \pi_1(T_n), \dots, \pi_6(T_n) \},$$

не зависящее от распределения вероятностей начального состояния, являющееся решением системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} \bar{\pi} = \bar{\pi} P_j(t); \\ \sum_{i=1}^6 \pi_i(T_n) = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Финальные вероятности цепи Маркова для графа, описывающего функционирование СЭС, используя матрицу (1) и систему уравнений (2) в координатной форме, имеют следующий вид:

$$\pi_1 = \frac{C_1}{C_2} \quad (3)$$

$$\text{где } C_1 = 1 - \alpha(1 - F_3(T_n)); \quad C_2 = 2(1 - \alpha(1 - F_2(T_n))) + F_2(T_n)(1 - \alpha)(1 - F_1(T_n)).$$

$$\pi_2 = \frac{(1 - F_1(T_n))F_2(T_n)}{C_2}, \quad (4)$$

$$\pi_3 = \frac{F_1(T_n)C_1 + \alpha(1 - F_1(T_n))F_2(T_n)F_3(T_n)}{C_2} \quad (5)$$

$$\pi_4 = \frac{(1 - F_1(T_n))(1 - F_2(T_n))C_1}{C_2} \quad (6)$$

$$\pi_5 = \frac{(1 - \alpha)(1 - F_1(T_n))F_2(T_n)}{C_2} \quad (7)$$

$$\pi_6 = \frac{\alpha(1 - F_1(T_n))F_2(T_n)}{C_2} \quad (8)$$

**Вывод:** Построена полумарковская модель функционирования СЭС, которая в моменты времени, соответствующие смене состояний СЭС, является однородной цепью Маркова, вложенной в процесс  $h(t)$ .

Модель включает в себя: ориентированный граф состояний и переходов электрооборудования, изображенный на рис. 1, матрицу вероятностных переходов (1), а также формулы вероятности переходов из состояния  $S_i$  в состояние  $S_j$ , (3-8). Адекватность модели подтверждается использованием апробированного математического аппарата.

Внедрение современных методов и средств диагностирования электрооборудования в процесс эксплуатации СЭС с целью повышения их надежности требует обоснования эффективности их использования. Разработанная математическая модель функционирования СЭС и полученные с ее помощью выражения финальных вероятностей можно использовать для определения показателей надежности систем электроснабжения, обеспечивающих как выполнение задач по обеспечению обороноспособности страны, так и безопасности функционирования сложных технологических производств.

## 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. <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 <a href="http://www.studmed.ru/stroev-v-a-perehodnye-processy-elektricheskikh-sistem-v-primerah-i-illyustraciyah_14aab567714.html">http://www.studmed.ru/stroev-v-a-perehodnye-processy-elektricheskikh-sistem-v-primerah-i-illyustraciyah_14aab567714.html</a>	М.: Знак, 1996. -224с.	ЭБС
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. <a href="http://www.studmed.ru/tatur-ta-tatur-ve-ustanovivshiesya-i-perehodnye-processy-v-elektricheskikh-cepях-2001_fc58b6294de.html">http://www.studmed.ru/tatur-ta-tatur-ve-ustanovivshiesya-i-perehodnye-processy-v-elektricheskikh-cepях-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. Широбокова О.Е., Прыгов Н.М., Маркарянц Л.М. Практикум по теоретическим основам электротехники: методическое пособие. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2014.
2. Широбокова О.Е. Теоретические основы электротехники: учебно-методическое пособие к выполнению самостоятельной работы студентов. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2015.
3. 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: Брянская ГСХА, 2012.
4. 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.
5. 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.
6. 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. 61 с.

Широбокова Ольга Евгеньевна

## **Модели и методы в расчетах систем электроснабжения**

Методические рекомендации по организации самостоятельной  
работы по дисциплине «Модели и методы в расчетах  
систем электроснабжения»  
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. 1,16. Тираж 25 экз. Изд. 6523.

---

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