

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

---

Кафедра электротехники  
и авиационного электрооборудования

А.А. Савелов

# СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

**Учебно-методическое пособие**  
по изучению дисциплины и контрольные задания

*для студентов  
направления 25.03.02  
заочной формы обучения*

Москва  
ИД Академии Жуковского  
2025

УДК 629.7.064.5  
ББК 0562  
С12

Рецензент:

*Решетов С.А.* – д-р техн. наук, профессор

**Савелов А.А.**

С12

Системы электроснабжения воздушных судов [Текст] : учебно-методическое пособие по изучению дисциплины и контрольные задания / А.А. Савелов. – М.: ИД Академии Жуковского, 2025. – 32 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Системы электроснабжения воздушных судов» по учебному плану направления подготовки 25.03.02 заочной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 27.12.2024 г. и методического совета 28.01.2025 г.

**УДК 629.7.064.5**  
**ББК 0562**

*В авторской редакции*

Подписано в печать 22.05.2025 г.

Формат 60х84/16 Печ. л. 2 Усл. печ. л. 1,86  
Заказ № 1071/0325-УМП09 Тираж 25 экз.

Московский государственный технический университет ГА  
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского  
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А  
Тел.: (499) 755-55-43  
E-mail: zakaz@itsbook.ru

© Московский государственный технический  
университет гражданской авиации, 2025

## 1. Учебный план дисциплины

Дисциплина “Системы электроснабжения воздушных судов” изучается на V курсе.

Всего часов по учебному плану –180,

из них:

лекции - 8 ч., лабораторные занятия – 16 ч.,

самостоятельная работа – 156 ч.

Форма контроля – экзамен.

Кроме этого, студенты выполняют контрольную работу на четвертом курсе.

## 2. Основные сведения о дисциплине

### 2.1. Предмет и цели дисциплины

*Цель освоения дисциплины.*

Дисциплина Системы электроснабжения воздушных судов имеет цель дать студентам направления 25.03.02 Техническая эксплуатация авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов знания по теории электроснабжения летательных аппаратов, принципам построения систем генерирования и распределения электрической энергии, анализу режимов их работы, особенностям конструктивного исполнения, а также практические навыки эксплуатации систем электроснабжения воздушных судов (ВС), необходимые для дальнейшего изучения и эксплуатации авиационной техники

*Задачи изучения дисциплины.*

Конечными задачами изучения дисциплины Системы электроснабжения воздушных судов является формирование у учащихся компетенций соответствующих требованиям направления 25.03.02 Техническая эксплуатация авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины:

- Способность к исследованию объектов и процессов эксплуатации АЭС и ПНК, в том числе с помощью пакетов прикладных программ и элементов математического моделирования, на основе профессиональных базовых знаний (ПК-1);
- Способность к участию в проведении комплекса планово-предупредительных работ по обеспечению исправности, работоспособности и готовности объектов АЭС и ПНК к испытаниям и эффективному использованию по назначению (ПК-12).

В результате изучения дисциплины Б1.В.ОД.20 Системы электроснабжения воздушных судов обучающийся должен:

- по компетенции ПК-1:

*знать:*

- теоретические положения, лежащие в основе принципов действия систем электроснабжения ВС как объектов процессов эксплуатации, ПК-1.1.7;

- состав и назначение пакетов прикладных программ и элементов математического моделирования систем электроснабжения ВС, ПК-1.1.13;

*уметь:*

- исследовать объекты и процессы эксплуатации систем электроснабжения ВС, ПК-1.2.5;
- использовать пакеты прикладных программ и элементы математического моделирования систем электроснабжения ВС, ПК-1.2.14;

*владеть:*

- навыками исследования объектов и процессов эксплуатации систем электроснабжения ВС, ПК-1.3.3;
- навыками использования пакетов прикладных программ и элементы математического моделирования систем электроснабжения ВС, ПК-1.3.12

- по компетенции ПК-12:

*знать:*

- признаки различных видов технических состояний, включая внешние признаки неисправностей и отказов систем электроснабжения ВС, ПК-12.1.3.

Дисциплина является базовой в системе подготовки инженеров электриков.

Дисциплина основывается на знании студентами дисциплин: "Теоретические основы электротехники", "Авиационные электрические машины", "Электроника", «Автоматика», «Моделирование систем и процессов». Знания в области «Систем электроснабжения воздушных судов» предопределяют уровень подготовки для изучения дисциплины «Электрифицированное оборудование воздушных судов».

### **3. Рекомендуемая литература**

#### **а) основная литература:**

1. Системы электроснабжения воздушных судов / под ред. С.П. Халютин. - М.: ИД Академия Жуковского, 2022.
2. Системы электроснабжения воздушных судов/ под ред. Халютин С.П.-М.: ВУНЦ ВВС, 2010.
3. Синдеев И.М. Савелов А.А. Системы электроснабжения воздушных судов. - М.: Транспорт, 1990.
4. Савелов А. А. Системы электроснабжения воздушных судов. Пособие по выполнению лабораторных работ. Часть I - М: МГТУ ГА, 2020.-44с.
5. Савелов А. А. Системы электроснабжения воздушных судов. Пособие по выполнению лабораторных работ. Часть II - М: МГТУ ГА, 2020.-44с.

6. Савелов А.А. Пособие к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Системы электроснабжения воздушных судов», ч. 3. М.: МГТУ ГА, 2022

7. Савелов А.А. Пособие к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Системы электроснабжения воздушных судов», ч. 4. М.: МГТУ ГА, 2023

**б) дополнительная литература:**

8. Электрооборудование летательных аппаратов в 2-х т. Т.1 Системы электроснабжения летательных аппаратов / под ред. С. А. Грузкова. - Москва: Изд-во МЭИ, 2005.

9. Савелов А.А. Устройства систем электроснабжения воздушных судов. Пособие по изучению дисциплины.- М.:МГТУГА, 2011

10. ГОСТ Р54073-2017. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергетики.

## **4. Электронные средства информации.**

### **4.1. Ресурсы Интернета**

Интернет-ресурсы:

<http://www.favt.ru/> - официальный сайт ФА ВТ

<http://www.mstuca.ru/> - официальный сайт МГТУ ГА;

Сайты производителей элементов систем электроснабжения:

Главным производителем систем электроснабжения и различного электрооборудования для отечественных воздушных судов является Аэроэлектромаш (<http://aeroem.ru/>);

Сайты зарубежных производителей Фирма Hamilton Sundstrand (США) (<http://www.hamiltonsundstrand.com>) производит: генераторы, интегральные привод генераторы, стартер генераторы, статические преобразователи, системы управления распределением нагрузок, аварийные самолетные ветрогенераторы, аппаратуру управления и защиты. Фирма ECE концерна Zodiac ([www.ece.zodiac.com](http://www.ece.zodiac.com)) размещается в Париже и производит: коммутационную аппаратуру, системы распределения энергии, светосигнальное оборудование.

## **5. Электронный адрес кафедры для консультаций**

[etiaeo@mstuca.ru](mailto:etiaeo@mstuca.ru)

## **6. Структура дисциплины**

Дисциплина разбита на два раздела:

- системы генерирования и преобразования электроэнергии;
- системы распределения электрической энергии; автоматизация управления каналами генерирования.

В первом разделе рассматриваются источники (преобразователи) электрической энергии и аппаратура управления ими. Во втором разделе изучается оборудование для передачи и распределения электрической энергии от источников к приемникам, а также аппаратура защиты и управления каналами генерирования. Такое деление дисциплины обусловлено тем, что систему электроснабжения на самолете принято подразделять на систему генерирования и систему распределения электрической энергии.

Первый раздел включает следующие темы:

Тема 1. Химические источники тока;

Тема 2. Регулирование частоты тока синхронных генераторов;

Тема 3. Регулирование напряжения авиационных генераторов постоянного и переменного тока;

Тема 4. Автоматизация распределения нагрузок при параллельной работе генераторов;

Тема 5. Преобразователи рода тока.

Второй раздел состоит из тем:

Тема 6. Системы распределения электрической энергии;

Тема 7. Автоматизация управления каналами генерирования;

Тема 8. Защиты систем электроснабжения;

Тема 9. Надежность систем электроснабжения.

## **7. Учебная программа и методические указания к изучению тем программы**

В дисциплине “Системы электроснабжения воздушных судов” рассматриваются принципы действия и теория рабочих процессов отдельных элементов, входящих в системы электроснабжения, взаимодействие между ними в процессе функционирования и системы электроснабжения летательных аппаратов в целом.

Особое внимание уделяется вопросам технической эксплуатации. При этом подчеркивается, что основу технической эксплуатации составляют хорошие знания электроэнергетического оборудования и рабочих процессов, протекающих в нем. Уделяется также внимание перспективам развития систем электроснабжения летательных аппаратов гражданской авиации.

Изучение курса рекомендуется проводить в такой последовательности.

Сначала нужно подробно ознакомиться с программой курса и обеспечить себя рекомендуемой литературой. После этого можно приступить к проработке материала в соответствии с программой, причем необходимо вести подробный конспект проработанного материала.

Наибольшее внимание следует уделить уяснению физической сущности изучаемых явлений и процессов, описанию их на базе проработанных ранее дисциплин математическими уравнениями и соотношениями. Не следует стремиться к запоминанию конечных соотношений и выражений, необходимо

лишь четко представлять логическую последовательность, на основании которой они получены, и знать основные выводы, вытекающие из конечных соотношений.

После изучения соответствующего раздела курса следует ответить на вопросы для самопроверки.

Программой предусмотрено, что некоторые, наиболее трудно усваиваемые вопросы будут изложены на лекциях и разъяснены на консультациях.

Учебником, соответствующим программе курса, является [1-3] .

Дополнительным учебным пособием является [7-9] .

При изучении курса необходимо пользоваться не только рекомендуемыми учебными пособиями, но и техническими описаниями отдельных агрегатов электрооборудования, а также описаниями самолетов и вертолетов.

### Тема 0. Введение к курсу

Основные понятия и определения курса. Гост Р54073-2017, типы систем электроснабжения самолетов (СЭС), структуры СЭС. Типы СЭС современных самолетов. Полностью электрический самолет (ПЭС), концепция, преимущества, проблемы. СЭС самолета В787. Перспективы развития СЭС. Взлетная масса СЭС. Литература [1,3]

### Методические указания.

При изучении вводной части курса студент должен четко представлять, как сильно увеличилась значимость электрооборудования летательных аппаратов в течение последних десятилетий и насколько тесно связано электрооборудование с теми функциями, которые возлагаются на летательный аппарат в целом.

Необходимо четко усвоить, что понятие полетной массы учитывает свойства планера и силовой установки летательного аппарата.

следует обратить на специальные условия работы и требования, которые характерны для электрооборудования, предназначенного работать на борту летательного аппарата. Особенно большое внимание следует обратить на перспективы развития СЭС, на развитие понятия «Полностью электрический самолет».

### Вопросы для самоконтроля.

- 1.Опишите краткая историю развития электрооборудования воздушных судов.
- 2.Укажите роль отечественных ученых в развитии авиационного электрооборудования.
3. Перечислите требования к СЭС: ГОСТ 53074-2017, АП.
4. Как определяется полетная масса систем электроснабжения?
5. Какие типы могут применяться в ПЭС?

## 7.1. Системы генерирования электроэнергии

### Тема1. Химические источники тока.

Назначение, электрохимические системы, электрические характеристики: ЭДС, напряжение, внутреннее сопротивление, емкость, саморазряд, удельные характеристики.

Свинцовые аккумуляторные батареи (АБ): конструкция, характеристики. Особенности эксплуатации. Никель-кадмиевые аккумуляторные батареи. Устройство, электрические характеристики. Особенности эксплуатации. Тепловой разгон АБ. Серебряно-цинковые АБ.

Бортовые устройства для заряда АБ. Литий-ионные аккумуляторы, характеристики, особенности заряда, балансировка. Сравнение ХИТ различных систем. Литература [1,3] . Топливные элементы.

### Методические указания.

Основные вопросы темы: электрохимические системы, ЭДС, емкость, саморазряд аккумуляторов. Характеристики свинцовых, никель-кадмиевых аккумуляторов. Особенности литиевых аккумуляторов. Правила эксплуатации.

При изучении химических источников электрической энергии необходимо уяснить особенности физических и химических процессов, протекающих в аккумуляторах. Обратит особое внимание на зависимость емкости от величины разрядного тока, сравнительные характеристики кислотных и щелочных аккумуляторов и особенности их эксплуатации, методы контроля степени заряженности.

Свинцовые, никель-кадмиевые, серебряно-цинковые аккумуляторы при последовательном их соединении обычно заряжают общим током АБ, но данный способ неприемлем для заряда литиевых аккумуляторных батарей.

Литиевые аккумуляторы имеют отличия по внутреннему сопротивлению, емкости, саморазряду, и при заряде АБ общим током отдельные аккумуляторы будут перезаряжаться, что крайне негативно сказывается на сроке их службы, и перезаряд может привести к возгоранию аккумулятора.

С течением времени различия параметров аккумуляторов увеличиваются. Поэтому в процессе заряда необходимо контролировать состояние каждого аккумулятора в батарее индивидуально. Управление индивидуальной зарядкой аккумуляторов в АБ называют балансировкой. При изучении литиевых батарей обратите внимание на балансировку аккумуляторов.

В настоящее время активно развиваются химические источники-топливные элементы. Топливный элемент – гальваническая ячейка, вырабатывающая электроэнергию за счет окислительно-восстановительных превращений реагентов, поступающих извне. При работе топливного элемента электролит и электроды не расходуются, не претерпевают каких-либо изменений. В нем химическая энергия топлива непосредственно превращается в электроэнергию.



В процессе производства, переработки, хранения и использования водорода в качестве источника энергии отправной точкой является то, что продукты реакции и сами реагенты нетоксичны.

Топливные элементы осуществляют превращение химической энергии топлива непосредственно в электричество, минуя малоэффективные, идущие с большими потерями, процессы горения.

Изучить классификацию топливных элементов, конструкцию, электрохимические процессы в различных топливных элементах.

#### Вопросы для самоконтроля.

1. Перечислите основные характеристики аккумуляторных батарей. Укажите, как влияет на них температура окружающей среды?
2. Какие существуют виды саморазряда и каковы причины его возникновения?
3. Что такое сульфатация пластин кислотных аккумуляторов, каковы причины ее возникновения и способы устранения?
4. Каковы преимущества и недостатки щелочных аккумуляторов по сравнению с кислотными?
5. Почему емкость кислотных аккумуляторов в большей степени зависит от разрядного тока, чем у щелочных?
6. Что такое «тепловой разгон» аккумуляторов?
7. Перечислите преимущества и недостатки литиевых аккумуляторов.

#### Тема 2. Регулирование частоты тока синхронных генераторов.

Регулирование частоты синхронных генераторов. Привод авиационных генераторов. Классификация приводов, непосредственный привод генераторов от авиадвигателей

Принцип действия и характеристики пневмомеханических приводов. Принцип действия и уравнение механической характеристики гидромеханического привода, особенности интегральных приводов. Регулирование угловой скорости и частоты тока синхронных генераторов. Требования к точности стабилизации частоты. Уравнение регулятора угловой скорости. Уравнение корректора частоты. Статика и динамика процессов регулирования частоты. Уравнение привода как объекта регулирования частоты. Структурная схема регулирования частоты. Устойчивость и качество процессов регулирования частоты. Литература [1-3].

#### Методические указания.

Основные вопросы темы: Назначение привода синхронного генератора. Принципы регулирования частоты в приводах. Механические характеристики приводов. Принцип действия регуляторов грубого и точного каналов. Уравнение грубого канала регулирования частоты. Уравнение корректора частоты.

Материалы данной темы являются основой для выполнения контрольной работы.

Необходимо усвоить, что для стабилизации частоты тока синхронных генераторов необходимо стабилизировать частоту вращения вала генератора независимо от режимов работы авиадвигателя. Это требование достигается путем вращения вала генератора от привода постоянной частоты вращения. Следует обратить внимание на преимущества дифференциальных приводов постоянной частоты вращения (ППО) перед приводами прямого потока энергии.

Надо уяснить понятие “жесткость механической характеристики” и выявить факторы, влияющие на жесткость. Ознакомиться с конструкцией пневмомеханических и гидромеханических приводов, уравнениями их механических характеристик. Ознакомиться с устройством интегральных приводов. Необходимо уделить внимание роли жесткой обратной связи в регуляторах частоты гидравлических и пневматических приводов и четко представлять назначение корректоров частоты. Следует подробно разобраться в принципе действия и устройстве корректора частоты.

При проработке этой темы следует уделить внимание понятиям статической устойчивости агрегата переменного тока стабильной частоты и коэффициенту самовыравнивания агрегата.

Понятие коэффициента самовыравнивания привода является очень важным. Необходимо четко представлять его физический смысл.

Следует уяснить, с помощью каких средств повышается точность регулирования частоты и расширяется область устойчивой работы. Особенно большое внимание следует уделить взаимодействию грубого и точного каналов регулирования частоты и отчетливо представлять два этапа регулирования частоты: быстропротекающий процесс регулирования с помощью центробежно-гидравлического регулятора частоты вращения и сравнительно медленный процесс коррекции частоты тока.

#### Вопросы для самоконтроля.

1. Чем вызвана неравномерность вращения генератора при непосредственном приводе его от авиационного двигателя и к каким последствиям она приводит?
2. Чем отличается дифференциальный привод от привода с полным преобразованием энергии?
3. Какие факторы определяют жесткость механической характеристики гидравлического и пневматического приводов?
4. В чем преимущества приводов интегрального исполнения.
5. Чем определяется статизм регулятора угловой скорости?
6. Чем вызвана необходимость в применении корректора частоты и от чего зависит погрешность в его работе?
7. Что такое коэффициент самовыравнивания агрегата переменного тока и от чего он зависит?
8. Какой элемент центробежно-гидравлического регулятора частоты вращения делает этот регулятор статическим?
9. Почему точный канал регулирования частоты тока является астатическим регулятором?

10. От каких факторов и как зависит устойчивость и статическая ошибка системы регулирования частоты?

Тема 3. Регулирование напряжения авиационных генераторов постоянного и переменного тока.

ГОСТ Р54073-2017, требования к точности поддержания напряжения. Типы регуляторов напряжения. Измерительные органы регуляторов напряжения и схемы их включения.

Регулятор напряжения на магнитных усилителях (БРН-208), схема подключения к генератору серии ГТ, принцип действия, передаточная функция. Тиристорный регулятор напряжения (БРН-120): принцип действия, передаточная функция. Транзисторные регуляторы напряжения. Структурная схема. Регулятор РНТ-115. Принцип действия и основные соотношения угольного регулятора напряжения.

Генератор постоянного тока как объект регулирования напряжения. Анализ статики и динамики процессов регулирования напряжения генератора постоянного тока. Методы повышения точности и устойчивости системы регулирования. Исследование электромашинных преобразователей постоянного тока в переменный. Изучение регулирования напряжения и частоты электромашинных преобразователей.

Цифровые регуляторы напряжения. Структурная схема. Анализ основных характеристик: частота квантования АЦП, допустимое запаздывание цифрового регулятора, оценка разрядности АЦП. Литература [1].

Методические указания.

Основные вопросы темы: Измерительные органы с одним, двумя стабилизаторами. Работа принципиальных схем угольного, тиристорного, транзисторного регуляторов, а также регулятора на магнитных усилителях. Астатическая, статическая настройка регуляторов. Уравнение генератора постоянного тока, уравнение регулятора напряжения. Составление структурной схемы системы стабилизации напряжения. Анализ устойчивости системы, определение статической ошибки.

Методика анализа динамики и статики процессов регулирования напряжения аналогична методам, которые применялись при изучении системы стабилизации частоты.

При изучении регуляторов напряжения особенно большое внимание следует уделить тому, как обеспечивается в регуляторах напряжения управление значительной мощностью в цепи возбуждения.

Наиболее перспективными в настоящее время являются транзисторные регуляторы, поэтому им следует уделить наибольшее внимание.

Весьма ответственным элементом регуляторов напряжения является измерительный орган. Точность работы регулятора напряжения определяется точностью эталона напряжения, на котором построен измерительный орган регулятора.

При изучении регуляторов напряжения большое внимание следует уделить понятиям “статического” и “астатического” регуляторов и умению находить интегрирующее звено в астатических регуляторах напряжения. Большое внимание следует уделить дискретному и фазоимпульсному принципам регулирования напряжения, на которых построены тиристорные и транзисторные регуляторы.

Необходимо четко себе представлять, что статика и динамика процессов регулирования напряжения тесно взаимосвязаны, причем чаще всего улучшение статических свойств системы регулирования напряжения влечет за собой ухудшение динамических характеристик. Поэтому улучшение свойств системы регулирования напряжения должно производиться с учетом статических и динамических характеристик. Большое внимание следует уделять понятию статическая устойчивость работы генератора постоянного тока. Необходимо также знать, от каких факторов зависит статическая ошибка регулирования напряжения.

При изучении динамики процессов регулирования напряжения следует обратить внимание на причины, которые вызывают неустойчивость процессов регулирования напряжения и методы расширения областей устойчивости.

Необходимо усвоить назначение диода в цепи стабилизирующего сопротивления, а также стабилизирующих трансформаторов в цепях регуляторов напряжения постоянного и переменного токов.

Следует обратить внимание на наличие у регуляторов напряжения уравнильных обмоток, с помощью которых можно осуществлять управление возбуждением генераторов при параллельной работе.

Необходимо усвоить, как влияет частота вращения генератора и его нагрузка на устойчивость системы регулирования напряжения.

#### Вопросы для самоконтроля.

1. Почему наличие двух стабилизаторов вместо одного позволяет увеличить чувствительность измерительного органа регулятора напряжения?
2. Как изменится скважность управляющих импульсов в транзисторном регуляторе при отключении нагрузки генератора?
3. Зависит ли частота переключений исполнительного органа релейного регулятора напряжения от частоты вращения генератора?
4. Как изменится напряжение генератора при обрыве фазного провода питающего измерительный орган регулятора.
5. Как изменится напряжение генератора при пробое выходного транзистора регулятора напряжения.
6. Как зависит коэффициент статической устойчивости генератора постоянного тока от нагрузки и частоты вращения?
7. Зависит ли статическая ошибка регулирования напряжения генератора постоянного тока от величины стабилизирующего сопротивления угольного регулятора напряжения?

8. В каком случае требуется больший диапазон изменения тока возбуждения, когда регулируется напряжение генератора переменного тока стабильной частоты или генератора переменного тока нестабильной частоты?
9. Каково назначение диода, шунтирующего обмотку возбуждения, при импульсном регулировании напряжения генераторов с помощью полупроводниковых приборов?
10. Как зависит коэффициент статической устойчивости генератора постоянного тока от нагрузки и частоты вращения?

#### Тема 4 Автоматизация распределения нагрузок при параллельной работе генераторов

Требования по точности распределения нагрузок между генераторами при параллельной работе. Методы распределения нагрузок: метод мнимого статизма, статических характеристик. Включение уравнильных обмоток генераторов постоянного тока.

Влияние не идентичности агрегатов и параметров сети на равномерность распределения нагрузок при параллельной работе генераторов.

Параллельная работа синхронных генераторов (СГ). Активная и реактивная мощности генератора, угловые характеристики. Перевод активной и реактивной мощностей, U-образные характеристики синхронной машины. Структурная схема параллельной работы двух СГ.

Автоматизация включения генераторов на параллельную работу. Пассивные и активные синхронизаторы. Датчики активных и реактивных токов генераторов. Схемы включения уравнильных цепей регуляторов напряжения и частоты. Литература [1-3].

#### Методические указания.

Основные вопросы темы: Условия включения генераторов постоянного и переменного токов на параллельную работу. Методы мнимостатических и статических характеристик. Способы включения уравнильных цепей генераторов постоянного тока.

Параллельная работа двух генераторов постоянного тока. Поперечный ток. Распределение токов между генераторами при неравенстве: настройки регуляторов напряжения, балластных сопротивлений, сопротивлений плюсовых цепей.

Перевод активной и реактивной мощности синхронного генератора, угловая характеристика генератора. Датчики активного и реактивного токов и способы их включения для реализации метода мнимостатических характеристик. Работа активного и пассивного синхронизаторов.

Перед проработкой материала этой темы целесообразно повторить основные положения курса “Электрические машины” в части условий включения генераторов на параллельную работу.

Следует иметь в виду, что методы автоматического распределения нагрузок между генераторами являются общими как для генераторов постоянного, так и для генераторов переменного тока.

Необходимо уяснить роль уравнильных обмоток при распределении нагрузок между генераторами по методу мнимого статизма.

Необходимо обратить внимание, что один и тот же датчик может измерять как активный так и реактивный токи в зависимости от способа его подключения к генератору.

Также необходимо понять, что выводы по влиянию неидентичности параметров генераторов на равномерность их нагрузки при параллельной работе, полученные для генераторов постоянного тока, в равной мере справедливы и для случаев распределения активных и реактивных нагрузок между работающими параллельно синхронными генераторами.

#### Вопросы для самоконтроля.

1. По какому методу будет распределяться нагрузка между параллельно работающими генераторами постоянного тока, если произойдет обрыв уравнильной цепи?
2. Каковы условия включения синхронного генератора на параллельную работу?
3. Почему при параллельной работе генераторов постоянного тока особенно тщательно должно быть обеспечено равенство сопротивлений в минусовых цепях генераторов?
4. Каковы условия включения синхронного генератора на параллельную работу?
5. Укажите достоинства и недостатки параллельной работы синхронных генераторов.
6. В чем особенности параллельной работы синхронных генераторов соизмеримой мощности?
7. Что необходимо сделать, чтобы увеличить активную (реактивную) мощность синхронного генератора?
8. Нарушится ли равномерность распределения активной (реактивной) мощностей между генераторами при несимметричной по фазам нагрузке генератора?
9. Что такое синхронизирующая мощность генератора?
10. В чем недостаток режима самосинхронизации для авиационных генераторов?
11. В чем недостаток пассивных синхронизаторов?
12. Для чего вводится «угол опережения» в активных синхронизаторах?

#### Тема 5 Преобразователи рода тока

Статическими преобразователями принято называть вторичные источники электроэнергии, в которых преобразование электрической энергии осуществляется путем коммутации электрических цепей с помощью полупроводниковых приборов без промежуточного преобразования ее в механическую энергию. По сравнению с электромашинными статические преобразователи имеют ряд преимуществ: более высокий КПД, меньшие

удельная масса и трудозатраты на обслуживание, отсутствие подвижных контактов, долговечность, низкий уровень шума.

По функциональному назначению все статические преобразователи подразделяются на преобразователи рода тока, преобразователи частоты и преобразователи уровня напряжения.

По виду электрической энергии на входе и выходе авиационные статические преобразователи подразделяют на:

- преобразователи переменного тока в постоянный (выпрямители или выпрямительные устройства);
- преобразователи постоянного тока в переменный (инверторы);
- преобразователи переменного тока переменной частоты в переменный ток постоянной частоты (циклоконверторы или статические преобразователи частоты);
- преобразователи постоянного тока одного уровня напряжения в постоянный ток другого уровня напряжения (конверторы постоянного тока).

Статические преобразователи переменного тока в постоянный. Схемы однофазных и трехфазных выпрямителей, их основные показатели. Параллельное включение выпрямителей, схемы авиационных выпрямительных устройств (ВУ). Работа трансформаторно-выпрямительных блоков под нагрузкой. Способы стабилизации напряжения выпрямителей.

В тех случаях, когда не требуется гальваническая развязка между цепью питания и цепями нагрузки выпрямителя, вместо трансформатора могут применяться автотрансформаторы [1]. Автотрансформаторы по сравнению с обычными трансформаторами имеют меньший вес, габариты, больший КПД.

При преобразовании переменного напряжения уровней 115, 230 В в постоянное напряжение 270, 540 В масса автотрансформатора получается намного меньше, чем у трансформатора, поэтому на самолетах нового поколения типа В787, где используются высоковольтные системы постоянного тока, применяются автотрансформаторы в ВУ.

С помощью автотрансформатора можно увеличивать число фаз выпрямляемого напряжения, что повышает пульсность выпрямительного устройства, снижает пульсации выпрямленного напряжения и уменьшает коэффициент нелинейных искажений в первичной сети

Статические преобразователи постоянного тока в переменный, типы, структурная схема. Инвертор: работа, улучшение формы кривой выходного напряжения, ШИМ модуляция. Двухтактный конвертор, принцип действия, основные соотношения. Регулирование напряжения в статических преобразователях. Трехфазные преобразователи постоянного тока. Трехфазный преобразователь на трех инверторах. Схема Скотта. Трехфазный мостовой инвертор: схема, работа с длительностью управляющих импульсов 180 и 120 градусов Многоуровневые инверторы. Изучение однофазных и трехфазных мостовых инверторов.

Стабилизаторы вторичных источников электропитания. Непрерывные стабилизаторы постоянного тока. Импульсные стабилизаторы без

гальванической развязки: стабилизаторы понижающего (повышающего) типов, принцип действия, основные соотношения. Многофазные стабилизаторы. Обратноходовой преобразователь. Исследование импульсного преобразователя напряжения понижающего типа.

Статические преобразователи переменного тока нестабильной частоты в переменный ток стабильной частоты. Типы преобразователей. Способы искусственной коммутации тиристоров. Преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Преобразователи частоты циклоконверторного типа. Схемы, временные диаграммы, законы регулирования. Литература [1,3, 9].

#### Методические указания.

Основные вопросы темы: Инвертор, конвертор, способы улучшения формы кривой, способы стабилизации напряжения статических преобразователей. Устройство трехфазных преобразователей. Системы ПСПЧ. Характеристики выпрямительных схем, внешняя характеристика выпрямителя. Стабилизаторы вторичных источников электропитания, линейные, импульсные с гальванической и без гальванической развязки.

Данная тема является одной из основных при изучении систем электроснабжения современных и перспективных воздушных судов и потому при изучении дисциплины ей необходимо уделить большое внимание.

При изучении выпрямительных устройств необходимо ознакомиться с характеристиками типовых схем выпрямления: однофазных, трехфазных, одно и двухполупериодных. Усвоить причины снижения напряжения выпрямителей под нагрузкой. В разделе стабилизаторы вторичных источников наибольшее внимание уделите принципам работы импульсных стабилизаторов, как наиболее быстро развивающимся в последние годы.

Элементная база электронных преобразовательных устройств существенно изменилась, что привело к новым конструктивным решениям самих статических преобразователей.

#### Вопросы для самоконтроля.

1. Чем характеризуется значение пульсаций выпрямленного тока?
2. Каковы причины уменьшения напряжения на выходе трансформаторно-выпрямительного блока (ТВБ) при росте нагрузки?
3. Каково назначение уравнивающих реакторов в ТВБ?
4. Как можно стабилизировать напряжение в ТВБ?
5. Чем определяются потери в линейных стабилизаторах напряжения?
6. Чем определяются потери в импульсных стабилизаторах напряжения?
7. Для чего вводится «пауза на нуле» в силовых инверторах?
8. Каким образом можно управлять выходным напряжением конвертора?
9. Перечислите способы улучшения формы кривой инвертора.
10. В чем особенности трехфазных инверторов?
11. Назовите достоинства и недостатки преобразователей с промежуточным звеном постоянного тока.



12. Для чего вводится пауза между включением и выключением анодной и катодной групп тиристоров в преобразователях с непосредственной связью?
13. Как стабилизируют напряжение в системах ПСПЧ?
14. В каком случае статический преобразователь переходит в инверторный режим работы?

## **7.2. Системы распределения электрической энергии. Автоматизация управления каналами генерирования**

### Тема 6. Системы распределения электрической энергии.

Состав системы распределения. Классификация электрических сетей. Самолетные провода. Падение и потеря напряжения в сети.

Коммутационная и защитная аппаратура электрических сетей. Аппаратура максимально-токовых защит, ампер-секундные характеристики плавких предохранителей и тепловых автоматов защиты.

Расчет электрической сети по критерию минимальной массы проводникового материала.

Бесконтактные аппараты защиты и коммутации (БАЗК): функции, устройство, характеристики. Смарт контакторы (ELCU). Локальные центры управления нагрузками (ЛЦУН). Системы управления нагрузками самолетов Boeing 777, Сухой Super Jet100. Литература [1].

### Методические указания.

Основные вопросы темы: Классификация систем распределения. Типы самолетных проводов. Потеря, падение напряжения в проводах. Выбор сечения проводов.

Ампер-секундные характеристики предохранителей и тепловых автоматов защиты. Различия между предохранителями, а также между тепловыми автоматами. Обеспечение селективности в цепях с предохранителями и автоматами

При изучении электрических сетей необходимо обращать внимание на признаки, по которым производится их классификация. При изучении авиационных проводов следует особое внимание обратить на их конструктивные особенности, позволяющие использовать эти провода при широком диапазоне изменения параметров окружающей Среды, механических нагрузок и агрессивных сред. Большое внимание необходимо уделить методологии расчета электрических сетей. Следует четко представлять, что расчет электрической сети должен выполняться с учетом требований, диктуемых стремлением получить наилучшие характеристики летательного аппарата в целом, и ограничений, накладываемых требованиями термостойкости, механической прочности и высокого качества электрической энергии. В связи с этим необходимо иметь четкое представление о полной массе электрической сети.

При изучении максимально токовой аппаратуры защиты следует обратить внимание на особенности конструкции инерционно-плавких

предохранителей и отличие автоматов защиты со свободным и без свободного расцепления.

Следует разобраться в работе дифференциальных защит трехфазного тока при различных видах короткого замыкания. Необходимо изучить схемы построения транзисторных ключей и функциональные возможности бесконтактных аппаратов защиты и коммутации (БАЗК).

Системы распределения современных самолетов строятся на основе БАЗК, которые группируются в локальные центры распределения нагрузок (ЛЦУН). ЛЦУН располагаются в локальных зонах ВС, где устанавливается большое число электрических приемников, фактически они выполняют роль промежуточных распределительных устройств. Их количество может достигать несколько десятков.

На новых воздушных судах устанавливается несколько распределительных центров, в которых размещается аппаратура коммутации электрических цепей, преобразователи энергии, аппаратура управления и регулирования.

Обратите внимание на новые элементы систем распределения: БАЗК, ЛЦУН, распределительные центры, которые применяются на всех типах ВС [1]. Для изучения этих устройств целесообразно использовать интернет ресурсы.

#### Вопросы для самоконтроля.

1. В чем заключается разница между магистральными и централизованными питательными сетями?
2. Почему провода меньшего сечения допускают большую плотность тока?
3. В чем заключается разница между потерей и падением напряжения?
4. Перечислите основные стадии технологического процесса ремонта элементов систем распределения.
5. Каково назначение буферных пружин в электромагнитных реле и контакторах?
6. Перечислите возможные виды ампер-секундных характеристик максимально токовых защит.
7. С помощью какого устройства осуществляется токовая отсечка в тепловых автоматах защиты?
8. Как влияет высота полета на ампер-секундные характеристики аппаратов максимально токовой защиты?
9. Какую структуру имеют ЛЦУН?
10. Опишите систему управления нагрузками для самолета SSJ100.

#### Тема 7. Автоматизация управления каналами генерирования.

Автоматизация управления каналами генерирования. Управление источниками электроэнергии постоянного тока: ДМР АЗУ. Управление вторичной системой электроснабжения (блок БЗУВУ).

Управление каналом генерирования переменного тока, логические уравнения включения возбуждения и контактора нагрузки. Изучение и исследование блока БРЗУ 115.

Подключение наземных источников к борсети. Блок БКНА: функции, логические уравнения. Литература [1-3, 9].

#### Методические указания.

Основные вопросы темы: ДМР, АЗУ. Подключение РАП (ШРАП). Функции БКНА, БЗУВУ, БЗУ, БРЗУ.

При изучении дифференциально-минимальных реле необходимо уяснить их функции и обратить внимание на отличия в различных модификациях этих электрических аппаратов. Распознавание направления протекания тока в этих устройствах осуществляется с помощью поляризованного реле, поэтому нужно отличия этих реле от обычных.

Необходимо разобраться с логическими уравнениями, описывающими работу блоков БЗУ, БРЗУ, БКНА. Следует составить четкое представление о всех функциях, которые выполняют данные блоки. При изучении этих устройств желательно использовать их технические описания. Литература [1-3, 9].

#### Вопросы для самоконтроля.

1. Перечислите функции ДМР.
2. Защищает ли дифференциально-минимальное реле типа ДМР генератора при перепутанной полярности аккумуляторной батареи?
3. Как маркируются авиационные реле?
4. Чем отличается поляризованное реле от обычного?
5. В чем заключаются преимущества импульсных контакторов?
6. Для чего вспомогательный разъем РАП имеет укороченную длину?
7. В чем отличие обратимых и необратимых защит блоков БКНА, БЗУВУ, БЗУ, БРЗУ?
8. Опишите этапы подключения генератора к ЦРУ.
9. Опишите алгоритм подключения контактора нагрузки БРЗУ.
10. Перечислите функции, которые выполняет блок БРЗУ.

#### Тема 8. Защиты систем электроснабжения.

Виды ненормальных режимов в системах электроснабжения. Ударные и установившиеся токи короткого замыкания в системах постоянного тока и их расчет. Короткие замыкания синхронных генераторов. Метод постоянства потокосцеплений Основные соотношения при расчетах токов короткого замыкания в сетях переменного тока.

Требования, предъявляемые к защите. Виды защит. Защита от повышения и понижения напряжения. Структурная схема защит от повышения (понижения) напряжения, схемотехника защит от повышения и понижения напряжения. Логические уравнения защит и их дискриминаторов. Автоматы защиты от перенапряжения в системах электроснабжения постоянного тока.

Защита от обрыва фаз и несимметрии фазных напряжений. Защита от повышения и понижения частоты. Структурная схема защиты от повышения (понижения) частоты. Логические уравнения защит и их дискриминаторов. Формирователи сигналов  $f\uparrow$ ,  $f\downarrow$ .

Защита по небалансу полного тока. Дифференциальные токовые защиты энергоузлов. Литература [1-3].

#### Методические указания.

Основные вопросы темы: виды ненормальных режимов, виды защит, защиты от коротких замыканий, защиты от повышения (понижения) напряжения (частоты), дифференциальные защиты. Расчет токов коротких замыканий и выбор аппаратов защиты.

При проработке материалов относящихся к расчетам токов короткого замыкания следует уяснить физическую природу ударных и установившихся токов коротких замыканий и влияние режимов работы генератора на величины этих токов. Обратите внимание как обеспечивается селективность действия защит на предохранителях и тепловых автоматах.

При изучении дифференциальных защит обратите внимание как достигается высокая селективность их действия.

Большинство защит имеет задержку срабатывания, чтобы исключить ложные отключения оборудования при переходных режимах работы системы электроснабжения. Следует также уяснить, что срабатывание большинства защит носит необратимый характер, так как защиты не устраняют причину аварийного режима, а только защищают оборудование от его последствий.

Защита это управление системой в ненормальных режимах, поэтому функции защиты и управления в нормальных режимах возлагают на единое устройство блок регулирования защиты и управления (БРЗУ).

#### Вопросы для самоконтроля.

1. Дайте классификацию возможных отказов в системах электроснабжения самолетов (СЭС)?
2. Приведите зависимость изменение тока генератора в процессе короткого замыкания.
3. Почему при расчетах установившихся токов короткого замыкания в системах постоянного тока расчетная ЭДС и внутреннее сопротивление генератора отрицательные?
4. Каковы причины перевозбуждения генераторов?
5. Зачем нужна выдержка времени в защитах от перенапряжений?
6. Каково назначение дискриминаторов в защитах от изменения частоты?
7. Нарисуйте схему дифференциальной защиты.
8. Как достигается селективность действия в дифференциальных защитах?
9. Нарисуйте структурную схему защиты от повышения (понижения) напряжения блока БРЗУ115.
10. Нарисуйте структурную схему защиты от повышения (понижения) частоты блока БРЗУ115.
11. Каково назначение дискриминаторов в защитах от изменения частоты?
12. В чем достоинство дифференциальных защит?

### Тема 9 Надежность систем электроснабжения.

Методы расчета надежности систем электроснабжения. Расчет показателей функциональной эффективности. Влияние надежности систем электроснабжения на безопасность полетов. Литература [3].

#### Методические указания.

Основные вопросы темы: расчет показателей функциональной эффективности, влияние надежности систем электроснабжения на безопасность полетов.

При расчете надежности в качестве математической модели системы электроснабжения применяется марковский случайный процесс. Система электроснабжения может находиться в одном из дискретных состояний. Для нахождения вероятностей состояний используется каноническое уравнение надежности. Обратите внимание как рассчитывается функциональная эффективность от состояния СЭС,

#### Вопросы для самоконтроля.

1. Что такое скрытые отказы в системах электроснабжения ?
2. Почему при анализе надежности обычно не учитывают возможность возникновения более двух отказов?
3. В чем суть расчета надежности СЭС на основе канонического уравнения?
4. Как оценить влияние СЭС на безопасность полетов?

## **8. Терминология дисциплины**

Основные понятия и термины, используемые в дисциплине, приведены в [1-3].

## **9. Перечень лабораторных работ**

ЛР1. Исследование процессов автоматического регулирования напряжения генераторов постоянного тока. (4 часа). Литература [4]. Теоретические сведения к работе изложены в теме 3.

Цель и содержание работы – практическое изучение систем регулирования напряжения. Анализ влияния режимов работы генератора на устойчивость регулирования напряжения. Изучение жесткой и гибкой обратных связей на устойчивость системы.

ЛР2. Исследование коммутационных процессов в трансформаторно-выпрямительных устройствах. (4 часа). Литература [7]. Теоретические сведения к работе изложены в теме 6.

Цель и содержание работы. Изучение процессов коммутации диодов в выпрямительных устройствах. Снятие внешних характеристик выпрямительных устройств.

ЛР3. Изучение коммутационной и защитной аппаратуры. (4 часа). Литература [4]. Теоретические сведения к работе изложены в теме 7.

Цель и содержание работы – снятие ампер-секундных характеристик тепловых аппаратов защиты и коммутации. Снятие вольт-секундных характеристик АЗП и характеристик ДМР.

ЛР4. Изучение первичной системы электроснабжения самолета ТУ-154 . (4 часа) Литература [5] . Теоретические сведения к работе изложены в темах 2,3,5,6,7,8.

Цель и содержание работы – изучение аппаратуры системы электроснабжения и режимов её работы для самолета ТУ-154.

### **10. Контрольная работа.**

Учебный план включает одну контрольную работу, которая состоит из двух задач. Контрольная работа (КР) по дисциплине имеет целью закрепление знаний студентов по соответствующим разделам учебной дисциплины. В ходе самостоятельного выполнения КР студенты более глубоко осваивают принципы работы оборудования и приобретают практические навыки анализа и расчета элементов систем электроснабжения.

Затраты времени на выполнение КР – 8 часов самостоятельной работы, без учета времени изучения и повторения теоретического материала.

Первая задача предполагает нахождение области устойчивости системы регулирования частоты и построение переходного процесса при единичном ступенчатом воздействии.

Теоретическая часть первой задачи рассматривается в теме 2 программы курса, поэтому перед выполнением работы необходимо изучить тему «Регулирование частоты тока синхронных генераторов».

Во второй задаче необходимо выбрать сечения проводов для заданной структуры системы распределения по критерию минимальной массы и заданной допустимой потери напряжения. Выполнение этой задачи рекомендуется после освоения темы 7. Необходимо также повторить раздел «расчеты электрических сетей» дисциплины «Системы электроснабжения воздушных судов». Теоретические сведения по второй задаче изложены в [1,3].

Контрольную работу следует выполнять в специальной тетради. В ней необходимо привести условия задачи для заданного варианта и подробные пояснения к ходу решения задачи. Если используются готовые формулы, необходимо указать литературу, из которой они взяты, пояснить, какие величины подставляются в формулу, в каких единицах берется величина и получается конечный результат. Все схемы должны быть выполнены в соответствии с правилами и условными обозначениями, рекомендуемыми ГОСТами и ЕСКД. На графиках необходимо указывать величину масштабов по осям координат, причем масштаб должен быть выбран таким, чтобы легко можно было найти значения промежуточных точек. Все вычисления должны производиться в системе СИ с необходимой степенью точности в каждом конкретном случае.

#### *Выбор варианта*

Номера вариантов студент устанавливает по шифру зачетной книжки. Последняя цифра указывает номер варианта всех задач, причем цифре 0 соответствует вариант №10

### Задания контрольной работы

#### Задача 1.

Система стабилизации частоты канала генерирования самолета Ту154 включает в свой состав: привод постоянной частоты ППО40 с встроенным регулятором частоты, корректор частоты, синхронный генератор ГТ40ПЧ6.

Параметры системы стабилизации частоты в зависимости от варианта приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры системы стабилизации частоты в зависимости от варианта

Параметры системы	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Коэффициент самовыравнивания агрегата, <b>Sm</b> .	1,0	0,5	1,5	1,2	2,5	2,0	3,0	2,7	3,8	3,5
2. Постоянная времени привода, <b>Tм,с.</b>	1,5	1,5	1	1	1	2	2	2	2	2
3. Постоянная времени регулятора по грубому каналу, <b>Tσ,с.</b>	0,3	0,5	0,8	0,3	0,5	0,9	0,3	0,5	0,8	0,5
4. Коэффициент усиления по параметру управления, <b>N</b> .	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	0,9	1,1	1,0	0,9	0,9
5. Коэффициент передачи сигнала от корректора, <b>Kε</b> .	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,1
6. Коэффициент, характеризующий эффективность влияния корректора на перемещение золотника, <b>Kω</b> .	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
7. Коэффициент, характеризующий влияние возмущающего воздействия, <b>λ</b> .	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

По заданным параметрам выполнить:

а) построить границу области устойчивости системы регулирования частоты одиночно работающего агрегата ППО40 в координатах: Y - коэффициент усиления центробежно-гидравлического регулятора частоты ( $K_v$ ), X - постоянная времени корректора частоты ( $T_\varepsilon$ );

б) в области устойчивости выбрать произвольную точку и построить переходный процесс при единичном ступенчатом воздействии;

в) построить структурную схему системы регулирования частоты.

## Задача 2.

Рассчитать электрическую сеть постоянного тока напряжением 28,5В, схема которой изображена на рис.1.

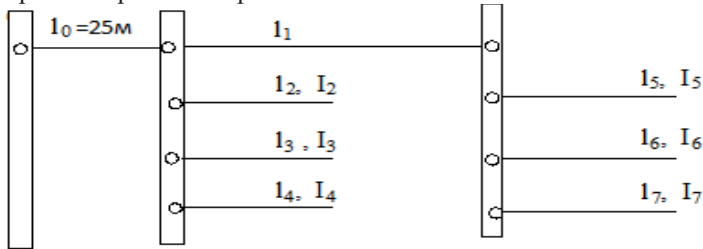


Рис.1. Схема распределительной сети.

Данные для расчета приведены в табл.2. Допустимая потеря напряжения для концов всех участков сети равна 2В.

Расчет выполнить по критерию минимальной массы проводникового материала. Материал проводов медь.

Таблица 2.

Конфигурация сети в зависимости от варианта

Номер варианта	Длины участков (м)							Токи нагрузки (А)						
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	I2	I3	I4	I5	I6	I7	
1	18	14	10	8	5	0	0	25	25	10	10	0	0	
2	10	14	18	0	22	5	0	15	20	0	20	25	0	
3	16	12	0	0	16	20	18	15	0	0	20	20	5	
4	14	0	10	20	0	5	25	0	5	30	0	30	40	
5	22	0	0	20	16	20	25	0	0	5	40	15	25	
6	10	0	20	0	18	14	30	0	40	0	10	30	25	
7	18	14	20	25	0	10	0	10	5	25	0	40	0	
8	20	14	10	10	0	0	15	10	15	20	0	0	25	
9	10	0	20	20	16	0	18	0	15	10	10	0	25	
10	14	18	0	8	5	5	0	15	0	10	25	25	0	

## 10.1. Методические указания к контрольным заданиям

При решении задачи №1 следует воспользоваться уравнениями привода, центробежно-гидравлического регулятора частоты вращения и корректора частоты, приведенными в [3] с.40-42. Обозначения параметров табл.1 соответствуют этим уравнениям.



Для построения границы области устойчивости в координатах  $K_v$ ,  $T_\xi$  необходимо неравенство 2.33 [3] заменить на равенство и, задаваясь значениями  $T_\xi$ , построить зависимость  $K_v=f(T_\xi)$ . Построенная кривая разбивает плоскость на две области: устойчивую и неустойчивую. Для того чтобы определить устойчивую область нужно выбрать любую точку на плоскости и по её координатам проверить выполнение неравенства 2.33.

Для построения переходного процесса можно воспользоваться любым из известных вам методов из теории автоматического управления, в частности, частотным методом построения переходных процессов с помощью трапецидальных характеристик.

Для построения переходного процесса необходимо, исходя из структурной схемы системы регулирования, записать передаточную функцию замкнутой системы  $W(P)$ , затем произвести замену оператора  $p$  на  $j\omega$ . Полученное выражение преобразовать к виду  $W(j\omega)=P(\omega)+jQ(\omega)$ .

Задаваясь  $\omega$ , построить вещественную частотную характеристику  $P(\omega)$ . Полученную характеристику аппроксимировать набором трапеций таким образом, чтобы площадь трапеций с учетом их знака была равна площади ограниченной кривой  $P(\omega)$ .

По полученным характеристикам трапеций построить значения  $h$  функций и результирующий переходный процесс.

Можно также для построения переходного процесса воспользоваться моделирующими программами MathCAD или MatLab .

### Задача №2

При расчетах электрических сетей различают понятия *падение напряжения в сети* и *потеря напряжения*. Падение напряжения – это геометрическая разность напряжений в начале и конце участка электрической сети. Потеря напряжения это алгебраическая разность напряжений в начале и конце участка электрической сети. При расчетах электрических сетей важно знать не полное падение напряжения, а потерю напряжения, т. е. разность абсолютных значений напряжений в начале и в конце провода, поэтому расчет сетей ведут на заданную потерю напряжения.

необходимо провести расчет электрической сети из условия минимальной массы проводникового материала в соответствии с рекомендациями, приведенными в [3] с 244-249 .

При расчете электрической сети необходимо вначале составить уравнение для объема проводникового материала всех участников сети ( $V$ ). Объем проводникового для участка длиной  $L$  равен  $IL^2/\gamma\Delta U$  , где  $I$  - ток, протекающий через проводник;  $\gamma=57\text{м/Оммм}^2$  - удельная проводимость меди;  $\Delta U$  - падение напряжения на данном участке. Падение напряжения  $\Delta U$  связано с сечением проводника  $S$  соотношением  $S=IL/\gamma\Delta U$ .

Условие минимума массы сети можно найти, решив совместно систему уравнений:

$$\begin{cases} dV/d\Delta U_0=0; \\ \dots\dots\dots \\ dV/d\Delta U_i=0, \end{cases}$$

$\Delta U_i$ - падение напряжения на  $i$ -м участке ( $i=0,1,\dots,n$ ).

## 10.2. Примеры решения задач

### Задача № 1

Исходные уравнения системы регулирования частоты согласно [3], с. 40 имеют вид:

$$\begin{cases} (T_M \cdot p + S_M) \cdot v = N \cdot \sigma + \rho + \lambda \cdot v_{A.Д} \\ (T_\sigma \cdot p + 1) \cdot \sigma = -k_v \cdot v - k_\xi \cdot \xi \\ T_\xi \cdot p \cdot \xi = k_\omega \cdot v \end{cases} \quad (1)$$

Данные уравнения записаны с учетом того, что процессы регулирования частоты протекают намного медленнее процессов регулирования напряжения (т.е. можно считать, что относительное изменение напряжения в системе отсутствует ( $u=0$ )).

По уравнениям (1) строится структурная схема системы регулирования (Рис.2).

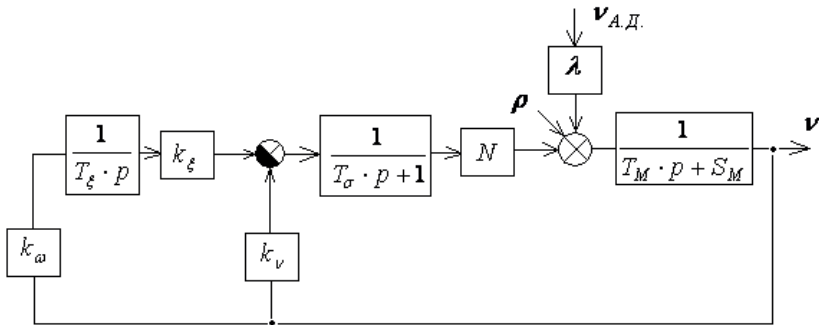


Рис.2. Структурная схема стабилизации частоты

В структурной схеме обозначено:

$k_\omega$  - коэффициент усиления, характеризующий эффективность влияния точного канала регулирования на перемещение золотника;

$\frac{1}{T_\xi \cdot p}$  - передаточная функция корректора частоты;

$k_\xi$  - коэффициент передачи сигнала от корректора;

$k_v$  - коэффициент усиления грубого канала регулирования частоты;

$\frac{1}{T_\sigma \cdot p + 1}$  - передаточная функция грубого канала регулирования;

$N$  - коэффициент усиления привода по параметру управления;

$\rho$  - относительное изменение активного сопротивления нагрузки генератора;

$\lambda$  - коэффициент, характеризующий влияние возмущающего воздействия (скорости авиадвигателя);

$\frac{1}{T_M \cdot p + S_M}$  - передаточная функция привода постоянной частоты вращения;

$v$  - относительное изменение угловой скорости выходного вала привода;

$v_{A.D.}$  - относительное изменение возмущающего воздействия – угловой скорости авиационного двигателя.

Исключив из системы уравнений (1)  $\sigma$  и  $\xi$ , получим уравнение стабилизации угловой скорости:

$$\begin{aligned} & [T_M \cdot T_\sigma \cdot T_\xi \cdot \rho^3 + T_\xi \cdot (T_\sigma \cdot S_M + T_M) \cdot \rho^2 + T_\xi \cdot (N \cdot k_v + S_M) \cdot \rho + N \cdot k_\xi \cdot k_\omega] \cdot v = \\ & = T_\xi \cdot \rho \cdot (T_\sigma \cdot \rho + 1) \cdot (\rho + \lambda \cdot v_{\omega}) \end{aligned} \quad (2)$$

Характеристическое уравнение системы имеет вид:

$$T_M \cdot T_\sigma \cdot T_\xi \cdot \rho^3 + T_\xi \cdot (T_\sigma \cdot S_M + T_M) \cdot \rho^2 + T_\xi \cdot (N \cdot k_v + S_M) \cdot \rho + N \cdot k_\xi \cdot k_\omega = 0 \quad (3)$$

Представим это уравнение в виде:

$$\lambda_3 \cdot \rho^3 + \lambda_2 \cdot \rho^2 + \lambda_1 \cdot \rho + \lambda_0 = 0$$

Для системы третьего порядка необходимыми условиями устойчивости являются:

а) требования положительности всех коэффициентов характеристического уравнения, т. е.  $\lambda_3 > 0, \lambda_2 > 0, \lambda_1 > 0, \lambda_0 > 0$ , для уравнения 3, все параметры, кроме  $T_\xi$  и  $k_v$  заданы и положительны, значит условие «а» выполняется при положительности  $T_\xi$  и  $k_v$

б) выполнения неравенства  $\lambda_2 \cdot \lambda_1 > \lambda_3 \cdot \lambda_0$ ;

$$T_\xi^2 \cdot (S_M \cdot T_\sigma + T_M) \cdot (S_M + N \cdot k_v) > T_M \cdot T_\sigma \cdot T_\xi \cdot N \cdot k_\omega \cdot k_\xi \quad (4)$$

Построим область устойчивости в координатах  $K_v$  и  $T_\xi$ . Из неравенства (4) можно найти зависимость  $k_v = f(T_\xi)$  и определить область устойчивости

$$S_M + N \cdot k_v > \frac{T_M \cdot T_\sigma \cdot N \cdot k_\omega \cdot k_\xi}{T_\xi \cdot (S_M \cdot T_\sigma + T_M)}; \quad k_v > \frac{T_M \cdot T_\sigma \cdot k_\omega \cdot k_\xi}{T_\xi \cdot (S_M \cdot T_\sigma + T_M)} - \frac{S_M}{N} \quad (5)$$

Уравнение границы устойчивости

$$k_v = \frac{T_M \cdot T_\sigma \cdot k_\omega \cdot k_\xi}{T_\xi \cdot (S_M \cdot T_\sigma + T_M)} - \frac{S_M}{N} \quad (6)$$

Подставим численные значения параметров ( $S_M=2$ ,  $T_M=2$ ,  $T_\sigma=0.8$ ,  $N=0.9$ ,  $K_\xi=1$ ,  $K_\omega=1$ ) в (6) и, задаваясь  $T_\xi$ , определим  $K_v$ . Построим зависимость  $k_v=f(T_\xi)$ , примерный вид зависимости показан на рис.3.

$$k_v(T_\xi) := \frac{0.444}{T_\xi} - 2.222$$

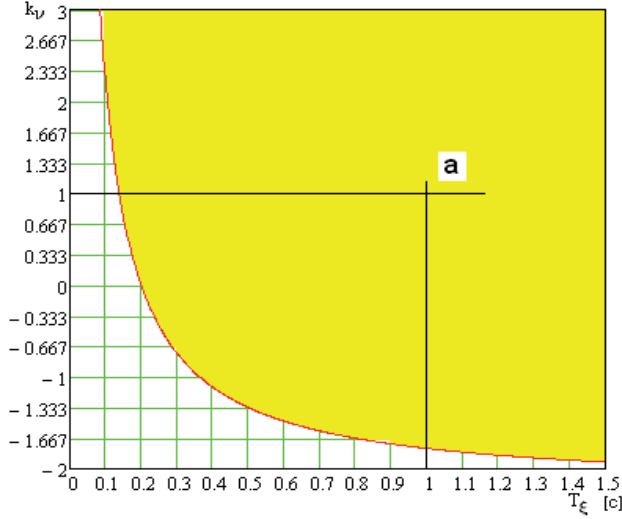


Рис.3. Граница области устойчивости.

Зависимость  $k_v=f(T_\xi)$  разбивает плоскость на две области: устойчивую и неустойчивую. Для того, чтобы определить область устойчивости выбираем произвольно точку «а» в одной из областей и, если для этой точки выполняется неравенство (5), то эта область является устойчивой. Пусть выбранная точка «а» с параметрами  $k_v$ ,  $T_\xi$  принадлежит к области устойчивости (на рис.3 эта область закрашена сплошным фоном). Построим переходный процесс для выбранной точки «а» для единичного возмущающего воздействия.

Из структурной схемы (рис.2) находим передаточную функцию замкнутой системы по возмущению:

$$\Phi(p) = \frac{v(p)}{(\rho + \lambda \cdot v_{ad})} = \frac{T_\xi \cdot p \cdot (T_\sigma \cdot p + 1)}{T_M \cdot T_\sigma \cdot T_\xi \cdot p^3 + T_\xi \cdot (T_\sigma \cdot S_M + T_M) \cdot p^2 + T_\xi \cdot (N \cdot k_v + S_M) \cdot p + N \cdot k_\xi \cdot k_\omega}$$

Для построения переходного процесса допустим, что в системе отсутствует возмущение по «р» (т.е.  $\rho=0$ ). Найдем переходный процесс по возмущению скорости АД. Для этого случая

$$\Phi(p) = \frac{v(p)}{(v_{ad})} = \frac{\lambda \cdot T_\xi \cdot p \cdot (T_\sigma \cdot p + 1)}{T_M \cdot T_\sigma \cdot T_\xi \cdot p^3 + T_\xi \cdot (T_\sigma \cdot S_M + T_M) \cdot p^2 + T_\xi \cdot (N \cdot k_v + S_M) \cdot p + N \cdot k_\xi \cdot k_\omega} \quad (7)$$

Подставив численные значения параметров (числа даны для примера) получим:

$$\Phi(p) = \frac{0.8p^2 + p}{1.6p^3 + 3.6p^2 + 2.9p + 0.9}. \quad (8)$$

Для построения переходного процесса воспользуемся пакетом расширения Control System Toolbox MatLab.

При построения переходного процесса в MatLab необходимо взять передаточную замкнутую функцию по возмущению и использовать стандартный оператор следующего вида:

`>> W=tf([0.8 1 0],[1.6 3.6 2.9 0.9])` , где  $0.8 \ 1 \ 0$ ;  $1.6 \ 3.6 \ 2.9 \ 0.9$  коэффициенты полиномов соответственно числителя и знаменателя передаточной функции замкнутой системы (8). В результате MatLab преобразует исходный полином (8) в переходную функцию  
*Transfer function:*

$$0.8 s^2 + s$$

---


$$1.6 s^3 + 3.6 s^2 + 2.9 s + 0.9$$

Для построения графика переходного процесса при единичном возмущении служит команда *step*.

`>> ltiview ('step',W).`

Вид графика переходного процесса для полинома (8) показан на рис.4

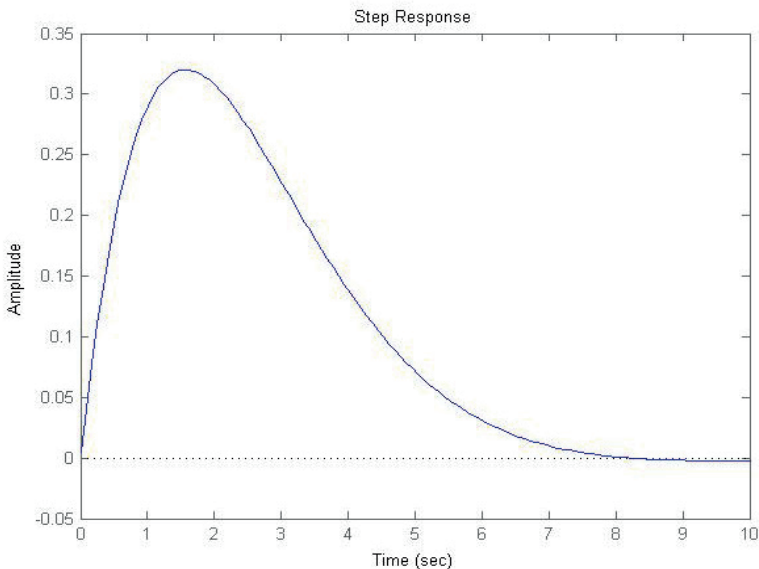


Рис.4. Переходный процесс при единичном возмущении угловой скорости авиадвигателя.

## Задача № 2.

Объем проводящего материала всех участков сети равен

$$V = S_0 l_0 + S_1 l_1 + S_2 l_2 + S_3 l_3 + S_4 l_4 + S_5 l_5 + S_6 l_6 + S_7 l_7,$$

где  $S_i$  – сечения участков линий.

Заданная потеря напряжения разделяется на две части:

$$\Delta U_{\text{дон}} = \Delta U_0 + \Delta U_{\text{отв}},$$

где  $\Delta U_0$  – потеря напряжения на участке  $l_0$ ;

$\Delta U_{\text{отв}}$  – потеря напряжения в ответвлениях на участках  $l_2$ ;  $l_3$ ;  $l_4$  и  $(l_1 + l_5)$ ;  $(l_1 + l_6)$ ;  $(l_1 + l_7)$ .

При этом предполагается, что потери напряжения для всех потребителей одинаковы:

$$\Delta U_{\text{отв}} = \Delta U_2 = \Delta U_3 = \Delta U_4 = (\Delta U_1 + \Delta U_5) = (\Delta U_1 + \Delta U_6) = (\Delta U_1 + \Delta U_7).$$

Сечение провода на участке  $l_0$  равно

$$S_0 = \frac{(I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7) \cdot l_0}{\gamma \cdot \Delta U_0},$$

где  $\gamma = 57 \text{ [м/Ом} \cdot \text{мм}^2\text{]}$  – удельная проводимость меди.

Сечения проводов на других участках сети будут равны:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{I_1 l_1}{\gamma (\Delta U_{\text{отв}} - \Delta U_5)} = \frac{I_1 l_1}{\gamma \Delta U_1} = \frac{(I_5 + I_6 + I_7) l_1}{\gamma \Delta U_1}, \\ S_2 &= \frac{I_2 l_2}{\gamma \Delta U_2} = \frac{I_2 l_2}{\gamma \Delta U_{\text{отв}}} = \frac{I_2 l_2}{\gamma (\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0)}; \\ S_3 &= \frac{I_3 l_3}{\gamma \Delta U_3} = \frac{I_3 l_3}{\gamma \Delta U_{\text{отв}}} = \frac{I_3 l_3}{\gamma (\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0)}; \\ S_4 &= \frac{I_4 l_4}{\gamma \Delta U_4} = \frac{I_4 l_4}{\gamma \Delta U_{\text{отв}}} = \frac{I_4 l_4}{\gamma (\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0)}; \\ S_5 &= \frac{I_5 l_5}{\gamma \Delta U_5} = \frac{I_5 l_5}{\gamma (\Delta U_{\text{отв}} - \Delta U_1)} = \frac{I_5 l_5}{\gamma (\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)}; \\ S_6 &= \frac{I_6 l_6}{\gamma \Delta U_6} = \frac{I_6 l_6}{\gamma (\Delta U_{\text{отв}} - \Delta U_1)} = \frac{I_6 l_6}{\gamma (\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)}; \\ S_7 &= \frac{I_7 l_7}{\gamma \Delta U_7} = \frac{I_7 l_7}{\gamma (\Delta U_{\text{отв}} - \Delta U_1)} = \frac{I_7 l_7}{\gamma (\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)}. \end{aligned} \tag{9}$$

Объем проводящего материала всех проводов будет составлять

$$V = \frac{1}{\gamma} \left( \frac{(I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7) \cdot l_0^2}{\Delta U_0} + \frac{(I_5 + I_6 + I_7) l_1^2}{\Delta U_1} + \frac{I_2 l_2^2 + I_3 l_3^2 + I_4 l_4^2}{(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0)} + \frac{I_5 l_5^2 + I_6 l_6^2 + I_7 l_7^2}{(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)} \right).$$

Условие минимума массы сети запишется в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial U_0} = -\frac{(I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7) \cdot l_0^2}{\Delta U_0^2} + \frac{I_2 l_2^2 + I_3 l_3^2 + I_4 l_4^2}{(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0)^2} + \frac{I_5 l_5^2 + I_6 l_6^2 + I_7 l_7^2}{(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)^2} = 0; \\ \frac{\partial V}{\partial U_1} = -\frac{(I_5 + I_6 + I_7) \cdot l_1^2}{\Delta U_1^2} + \frac{I_5 l_5^2 + I_6 l_6^2 + I_7 l_7^2}{(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)^2} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Решая совместно систему уравнений (10), находим  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_0$ .

Подставим полученные значения  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_0$  в уравнения (9) и определим расчетные значения сечений  $S_0$ - $S_7$ .

Полученное сечение следует заменить на ближайшее большее стандартное сечение. Стандартные сечения авиационных проводов даны в таблице 3.

Таблица 3  
Стандартные сечения авиационных проводов.

Стандартные сечения, мм <sup>2</sup>
0.5
0.75
1.0
1.5
2
2.5
4
6
10
16
25
35
50

В качестве примера, для исходных значений, указанных в таблице 4, расчетные и выбранные значения сечений приведены в таблице 5.

Таблица 4

## Исходные данные электрической сети

Длины участков (м)							Токи нагрузки (А)					
$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$	$l_7$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$
22	14	10	10	0	0	15	10	15	20	0	0	25

Таблица 5

## Результаты расчета электрической сети

Расчетные сечения		Стандартные
$S_0(мм^2)$	29.97	35
$S_1(мм^2)$	16.6	25
$S_2(мм^2)$	2.54	4
$S_3(мм^2)$	2.68	4
$S_4(мм^2)$	3.61	4
$S_5(мм^2)$	0	0
$S_6(мм^2)$	0	0
$S_7(мм^2)$	33.1	35

## Содержание

1. Учебный план дисциплины.....	3
2. Основные сведения о дисциплине.....	3
3. Рекомендуемая литература.....	4
4. Электронные средства информации.....	5
5. Электронный адрес кафедры для консультаций.....	5
6. Структура дисциплины.....	5
7. Учебная программа дисциплины и методические указания к изучению тем программы.....	6
7.1. Системы генерирования электроэнергии.....	8
7.2. Системы распределения электрической энергии. Автоматизация управления каналами генерирования.....	17
8. Терминология дисциплины.....	21
9. Лабораторные занятия.....	21
10. Контрольная работа.....	22
10.1. Методические указания к контрольным заданиям .....	24
10.2. Примеры решения задач.....	26