	Система менеджменту якості НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС навчальної дисципліни <u>«Електричні системи та мережі»</u> назва дисципліни	Шифр документа	СМЯ НАУ НМК 07.01.05 – 01 – 2016
	Стор. ___ з ___		

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Навчально-науковий Аерокосмічний інститут

(назва інституту (факультету))

**КАФЕДРА Автоматизації та енергоменеджменту**

(повна назва кафедри)

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни «Електропостачання повітряних суден»

за напрямом (спеціальністю) підготовки 6.051103 "Авіоніка", спеціальності 6.05110301 "Комплекси пілотажно-навігаційного обладнання"

(шифр та повна назва напрямку (спеціальності))

Укладач: к.т.н., доцент Захарченко Віктор

Панасович

(науковий ступінь, вчене звання, П.І.Б. викладача)

Конспект лекцій розглянутий та схвалений  
на засіданні кафедри автоматизації та

енергоменеджменту

(повна назва кафедри)

Протокол № \_\_\_ від «\_\_\_» \_\_\_ 20\_\_ р.

Завідувач кафедри Захарченко В.П.

## Лекція № 1

### Тема лекції: Загальні характеристики та типові структури електропостачання повітряних суден.

#### План лекції

1. Вступ. Назначение и состав электрооборудования воздушного судна (ВС).
2. Особенности условий работы электрооборудования ВС .
3. Основные тактико-технические требования, предъявляемые к электрооборудованию ВС.
4. Требования к качеству электроэнергии и точности поддержания напряжения на борту ВС.
5. Критерии оценки массо-энергетических характеристик систем электроснабжения ВС.
6. Типовые структуры систем электроснабжения (СЭС) ВС.

#### Література

1. Синдеев И.М., Савелов А.А. Системы электроснабжения воздушных судов. – М.: Транспорт, 1990. – 296 с.
2. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии : ГОСТ 19705-89. – [Введ. 1990.01.01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1989. -45 с.
3. Захарченко В.А., Панов В.И. Оценка динамических свойств авиационных энергоузлов с применением вычислительной техники. – К.: КИИГА, 1994.– 36 с.
4. Зонтов В.М., Куприн Б.В. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1988. – 390 с.

## **Зміст лекції**

### **ВСТУП**

Развитие авиационной техники характеризуется увеличением числа и мощности потребителей электрической энергии на воздушных судах (ВС), ростом протяженности электрической сети. Электрооборудование современного ВС можно рассматривать как сложный электротехнический комплекс, состоящий из системы электроснабжения (совокупности устройств, предназначенных для производства, преобразования и распределения электрической энергии с регулирующей, управляющей и защитной аппаратурой) и системы потребителей электрической энергии.

Система электроснабжения (СЭС) в свою очередь состоит из систем генерирования электрической энергии и ее распределения. Система генерирования электрической энергии, как правило, разделена на несколько независимых или параллельно работающих каналов, каждый из которых включает привод генератора, регулирующую защитную и управляющую аппаратуру и участок сети от генератора до центрального распределительного устройства (ЦРУ). Системой распределения электрической энергии называется совокупность устройств, используемых при передаче электрической энергии от ЦРУ к распределительным устройствам (РУ) и от них к потребителям.

#### **1. Назначение и состав электрооборудования ВС**

Электрооборудование ВС в зависимости от назначения его элементов можно разделить на три основных группы:

1. Источники электрической энергии и преобразователи, их защитные и регулировочные устройства.

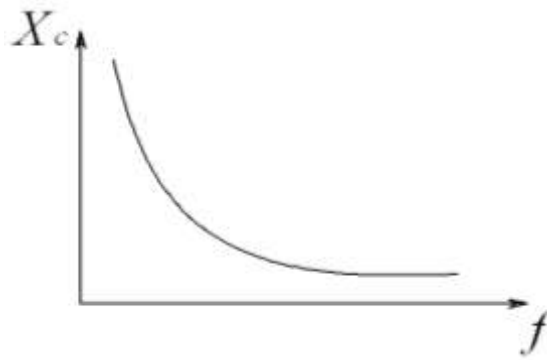
2. Системы передачи и распределения электроэнергии (электрическая сеть).

3. Потребители электроэнергии.

В первую группу входят:

- электрогенераторы постоянного и переменного тока;
- химические источники тока;
- преобразователи электрической энергии, включая электромашинные;
- выпрямители, трансформаторы и другие устройства;
- регулирующая и защитная аппаратура, включающая регуляторы напряжения и частоты.

#### **2. Особенности условий работы электрооборудования ВС .**



Особенности условий работы электрооборудования ВС связаны с высотой и скоростью полета.

Свойства атмосферы различны на разных высотах, поэтому и условия работы электрооборудования летательного аппарата на разных высотах резко изменяются. С увеличением высоты понижается давление воздуха, охлаждение электрических машин затрудняется, а длительность горения между расходящимися контактами коммутационной аппаратуры резко увеличивается.

### 3. Основные тактико-технические требования, предъявляемые к электрооборудованию ВС.

1. Надежность и безотказность работы.

Простой ВС приносит большие убытки (простой В-747 стоит 24 млн. долл.)

2. Минимальные масса и габариты.

Экономия 1 кг массы оборудования за срок службы воздушного судна (50000 часов) приносит экономию ~10000 долларов.

В США считают, что экономия 1 кг массы оборудования оправдана, если приносит доход за срок службы воздушного судна в 445 долларов.

3. Электрическая прочность.

Критерием электрической прочности является обеспечение следующих величин напряжений:

- для проводов – 300 В;
- для генераторов – 1000 В;

Рис.1. Зависимость частоты тока от индуктивного сопротивления.

- для радиоумформеров  $U=2U_{ном}+1000$  В;
- для электродвигателей, реле и т.п. – 500 В.

Сопротивление изоляции проводов (28,5 В) – 1 Мом, для проводов (115 В и 208 В) – 5 Мом.

4. Отсутствие помех для работы радиоаппаратуры.

#### 4. Требования к качеству электроэнергии и точности поддержания напряжения на борту ВС.

##### Требования к качеству электроэнергии

В системах электроснабжения ВС приняты следующие величины номинальных напряжений:

- у генераторов постоянного тока – 28,5 В;
- у аккумуляторных батарей – 24 В;
- у преобразователей постоянного тока в однофазный переменный ток частотой 400 Гц – 115 В;
- у преобразователей постоянного тока в трехфазный переменный ток частотой 400 Гц – 36 В;
- у преобразователей постоянного тока низкого напряжения 27 В в постоянный ток высокого напряжения 220, 450, 750 и 1500 В;
- у трехфазных генераторов переменного тока частотой 400 Гц – 120/208 В (120 В – фазное, 208 В – линейное напряжение).

Таблица 1

Точка измерения	Напряжение фазы, В			Среднее значение напряжения трех фаз, В		
	Режимы работы системы					
	Норм.	Ненорм.	Авар.	Норм.	Ненорм.	Авар.
На приемнике	108-119	97-134	102-124	–	–	–
В точке регулирования	–	–	–	115-119	101-132	110-122

Для систем постоянного тока установившиеся значения напряжений в нормальных режимах на клеммах приемника составляют 24-29,4 В, в точке регулирования в системе с регулируемым источником – 27-29 В, в точке подключения нерегулируемого выпрямительного устройства – 25,4-29,4 В.

При нормальных коммутационных режимах кривая переходного процесса, представленная в виде приведенных переходных напряжений, при изменениях нагрузки от 10 до 160% номинальной мощности должна укладываться в диапазон значений, указанных для систем переменного тока на рис. 3.

#### 5. Критерии оценки массо-энергетических характеристик систем электроснабжения ВС.

Требование минимального веса и габаритов (без ущерба для надежности технико-экономических показателей) имеет для летательного аппарата особенно большое значение, так как самолетное электрооборудование вместе с дополнительными конструкциями и крепежом перевозится на самом дорогом виде транспорта. Стоимость перевозки электрооборудования в течение его срока службы превышает стоимость самого оборудования.

Так как на перевозку каждого килограмма собственного веса самолета на полную дальность тратится 4-5 кг топлива, то практически каждый лишний килограмм веса электрооборудования приводит к четырех-, пятикратному увеличению его полетного или аэродинамического веса.

## **6. ТИПОВЫЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВС**

Выбор структуры СЭС для конкретного ВС представляет собой сложную и неоднозначную задачу, которая решается на стадии проектирования ВС. Неоднозначность принятия рационального решения привела к использованию на ВС различных классов большого многообразия СЭС с индивидуальными наборами первичных, вторичных и аварийных источников электроэнергии, множеством конфигураций распределительных сетей, разными принципами построения защит каналов генерирования и электрических сетей.

На формирование требований к структуре СЭС определяющим образом влияют такие факторы как:

- назначение ВС и его конструктивная схема;
- мощность электроэнергетической системы;
- качественный состав бортового комплекса оборудования;
- показатели эффективности функционирования СЭС и самолетного комплекса оборудования в штатных и нештатных ситуациях.

### **Питання для самоперевірки**

1. Пояснити вимоги ГОСТ-19705-89 до якості електроенергії на борту повітряного судна (ПС).
2. Навести основні вимоги до систем електропостачання ПС.
3. Чим визвані вимоги мінімізації маси та габаритів СЕП та її елементів та яким чином це здійснюється?
4. Надайте визначення критеріям конструктивної та польотної маси.
5. Наведіть типові структури електропостачання ПС.
6. Які основні тактико-технічні вимоги пред'являються до електрообладнання ПС та чим вони визвані ?

1. Привести основные тактико-технические требования, предъявляемые к электрооборудованию воздушных судов
2. Привести классификацию систем электроснабжения
3. Показать упрощенные схемы СЭС ВС
4. Требования к качеству электроэнергии
5. Обозначить пределы допустимых значений частоты в переходных режимах
6. Каковы критерии оценки массо-энергетических характеристик систем электроснабжения

## **Лекція № 2**

**Тема лекції: ПРИВОД АВИАЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ.**

### **План лекції**

1. Непосредственный привод генераторов от авиационного двигателя (АД).
2. Классификация приводов постоянной частоты вращения (ППЧВ) авиационных генераторов (СГ).
3. Механический ППЧВ.
4. Гидромеханический ППЧВ.
5. Пневмомеханический ППЧВ.
6. Электромеханические (электромашинные) ППЧВ.
7. Сравнительные характеристики приводов.

### **Література**

1. Синдеев И.М., Савелов А.А. Системы электроснабжения воздушных судов. – М.: Транспорт, 1990. – 296 с.
2. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии : ГОСТ 19705-89. – [Введ. 1990.01.01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1989. -45 с.
3. Захарченко В.А., Панов В.И. Оценка динамических свойств авиационных энергоузлов с применением вычислительной техники. – К.: КИИГА, 1994.– 36 с.
4. Зонтов В.М., Куприн Б.В. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1988. – 390 с.

## Зміст лекції

### 1. Непосредственный привод генераторов от авиационного двигателя (АД).

Основной энергетической установкой ВС является АД. Часть его энергии используется на вращения генераторов. На привод генераторов отбирается не более  $0,5 \div 1$  % мощности, развиваемой АД (мощность АД может достигать несколько десятков киловатт).

Генераторы постоянного тока или генераторы переменного тока нестабильной частоты приводятся во вращение непосредственно от вала АД через редуктор (Рис.1).

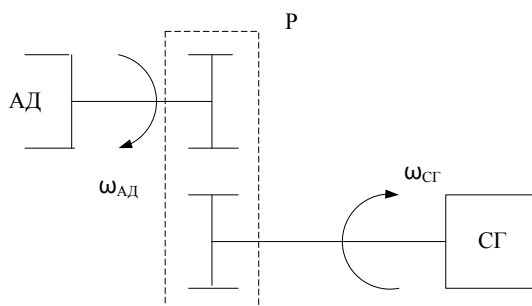


Рис. 1. Привод генератора непосредственно от вала АД через редуктор (Р).

Коэффициент передачи редуктора  $i$  определяется предельно допустимой угловой скоростью генератора и  $max$  угловой скоростью вала АД.

Предельная частота вращения  $n$  или угловая скорость  $\omega=0,1047n$  генераторов ограничивается характеристиками подшипников и для совершенных генераторов лежит в пределах 9000-12000 об/мин. Угловая скорость коленчатого вала поршневого АД может достигать 3000 об/мин, а ротора турбины реактивного АД – 12000 об/мин. Поэтому на поршневых АД устанавливают повышающие редукторы с коэффициентом передачи (передаточным отношением)  $i=1,4 \div 3$ , а на турбореактивных – понижающие с  $i=0,65 \div 0,95$ , которые встроены непосредственно в АД.

## 2. Классификация ППЧВ

### Рассмотрим регулируемые приводы (ППЧВ)

Типы ППЧВ:

- механические;
- гидравлические;
- пневматические;
- электромеханические (электромашинные) ;

По способу подвода энергии к выходному валу ППЧВ делятся на:

- приводы прямого действия с полным преобразованием энергии – когда преобразуется вся мощность, забираемая с вала АД.
- приводы дифференциальные – когда преобразуется только часть мощности, пропорциональная разности частот вращения валов приводного двигателя и генератора.



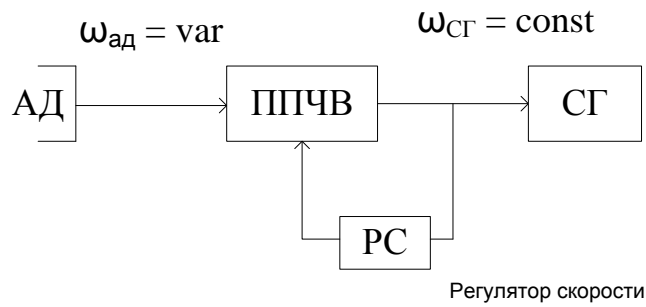


Рис. 6 . Привод прямого действия с полным преобразованием энергии

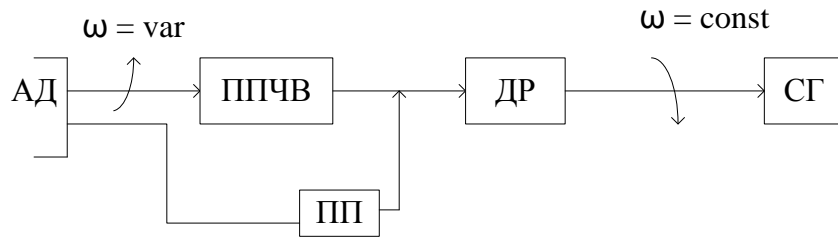


Рис. 7 . Привод дифференциального типа с преобразованием часть мощности.

Редуктор обладает высоким, 95% и более к.п.д., поэтому к.п.д. дифференциального привода

### 3. Механический ППЧВ.

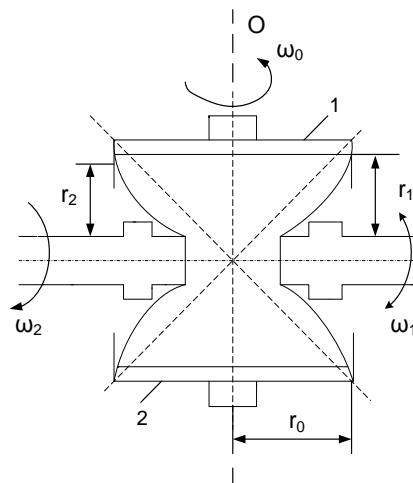


Рис. 8 . Механическая передача Хейса (Светозарова).

Передачи такого типа представляют собой фрикционные редукторы с плавно изменяющимся передаточным числом (механические вариаторы)

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{r_0}{r_1}, \quad \frac{\omega_2}{\omega_0} = \frac{r_0}{r_2},$$

отсюда  $\omega_1 r_1 = \omega_0 r_0$ ,  $\omega_2 r_2 = \omega_0 r_0$ , т.е.  $\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2$ , или  $\omega_2 = \omega_1 \frac{r_1}{r_2}$

## 4. Гидромеханический ППЧВ.

Получили наибольшее распространение на отечественных и зарубежных ВС.

Применяются гидравлические передачи двух типов:

-прямого действия и дифференциальные.

Принцип действия ППЧВ рассмотрим на примере гидравлического привода с полным преобразованием энергии (прямого действия).

Привод состоит из двух одноступенчатых гидромашин ГМ1 и ГМ2. Ротор ГМ1 жестко связан с редуктором АД, а ротор ГМ2 – с валом синхронного генератора (СГ).

ГМ1 – выполняет роль гидронасоса. Преобразует механическую энергию в гидравлическую.

ГМ2- роль гидродвигателя. Преобразует гидравлическую энергию в механическую при постоянной частоте вращения его вала.

РВ и РН - гидромагистрами – соответственно высокого и низкого давления.

Изменяя производительность гидронасоса ГМ1 регулируют частоту вращения вала гидродвигателя ГМ2 стабилизируя частоту вращения СГ.

ГМ1 и ГМ2 могут работать как в режимах насоса, так и в режиме двигателя в зависимости от режима работы привода.

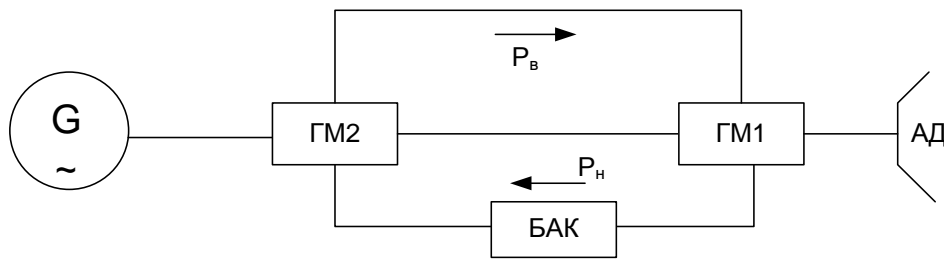


Рис. 10 Схема гидромеханического ППЧВ

### Гидравлические ППЧВ дифференциального типа.

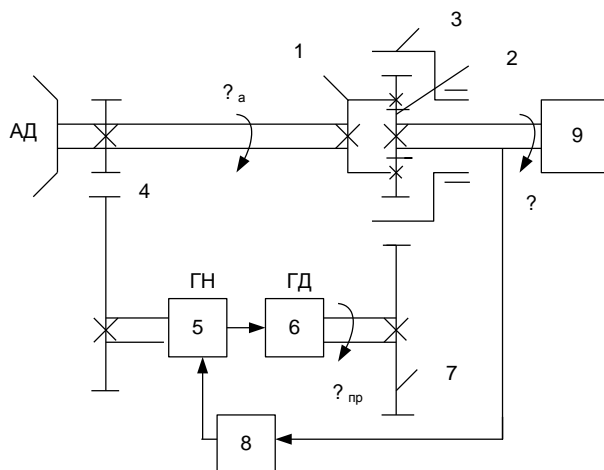


Рис. 12. Гидравлические ППЧВ дифференциального типа.

Вал АД приводит во вращение водило 1 планетарного редуктора и через понижающий редуктор 4 ротор гидромашинного насоса 5.

Планетарный редуктор выполняет роль дифференциального механизма. Синхронный генератор 9 жестко связан с солнечной шестерней 2 планетарного редуктора, а вал гидромашины 6 – с шестерней 7, которая приводит во вращение коронную шестерню 3. При крейсерской скорости полета устройство управления 8 перемещает регулируемую наклонную шайбу гидромашины 5 в вертикальное положение то есть  $\gamma_{ГН} = 0$ .

### Гидравлические ППЧВ интегрального исполнения.

Вал АД связан с входным валом ППЧВ через механизм отключения (МО) (рис. 14.) Входной вал ППЧВ вращает через зубчатую передачу ротор гидромашины ГМ1 и водило дифференциального редуктора ДР.

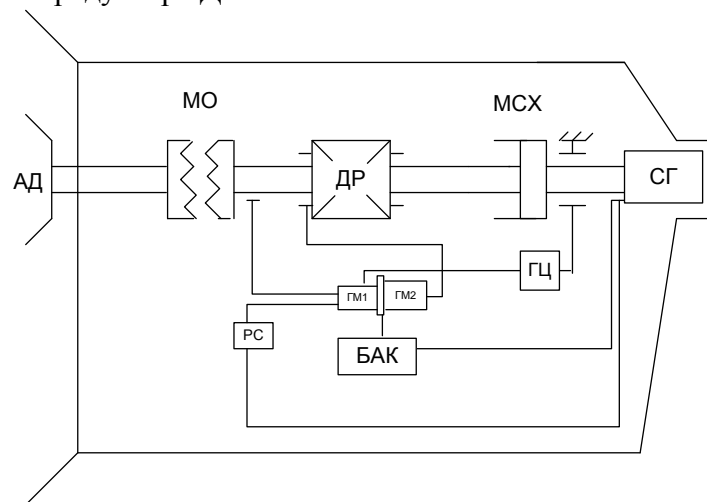


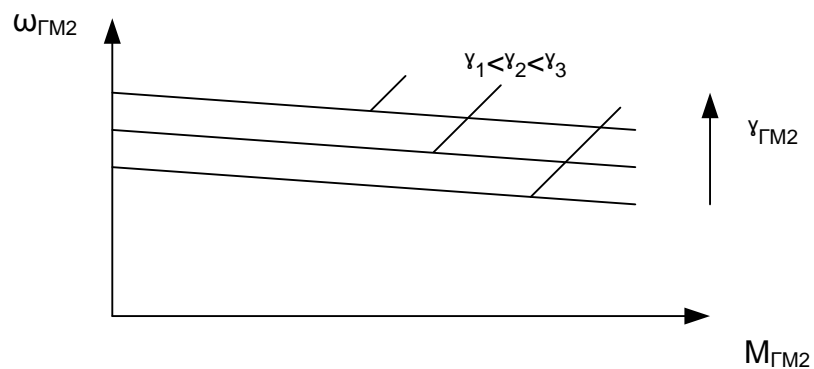
Рис. 14. Гидравлический дифференциальный ППЧВ в интегральном исполнении.

### Механические характеристики гидропривода

Малый наклон к оси абсцисс, то есть скорость гидропривода мало зависит от момента на валу двигателя. Кроме того жесткость механических характеристик не зависит от угла наклона шайбы  $\gamma$ , что является важным свойством гидропривода.

$$F2' = F1' \operatorname{tg} \gamma_{ГМ2} = \frac{\pi d^2}{4} \operatorname{tg} \gamma_{ГМ2} P_B$$

$$F2'' = F2' \operatorname{tg} \gamma_{ГМ2} = \frac{\pi d^2}{4} \operatorname{tg} \gamma_{ГМ2} P_H$$



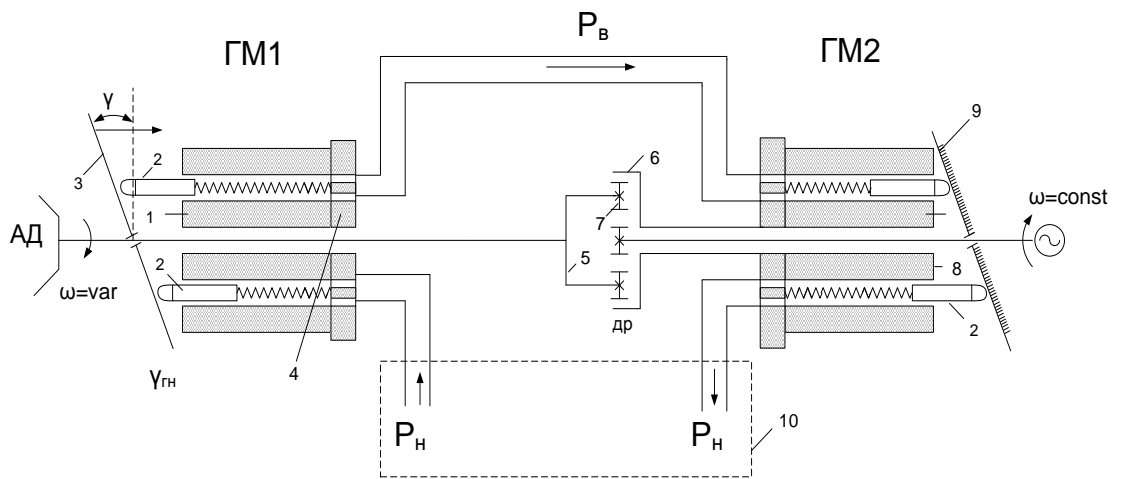


Рис. 15. Схема гидромеханической дифференциальной передачи  
 1 – Ротор гидронасоса; 2- плунжер; 3- наклонная шайба; 4- распределительный диск; 5- водило; 6- коронная шестерня; 7- солнечная шестерня; 8- ротор гидродвигателя; 9- наклонная шайба; АД – авиационный двигатель; Г-генератор;  $P_H$ - магистраль низкого давления,  $P_B$ - магистраль высокого давления; ДР- дифференциальный редуктор; 10- бак.

## 5. Пневмомеханический ППЧВ.

В турбоприводе прямого действия привод генератора осуществляется от воздушной турбины, забирающей воздух от компрессора АД.

В турбомеханической дифференциальной передаче для воздушно-турбинного привода дифференциала часть мощности (нерегулируемой) забирается с вала двигателя, а часть мощности (регулируемой) забирается в виде сжатого воздуха от компрессора авиадвигателя.

Рассмотрим работу привода прямого действия.

Воздух, отбираемый от компрессора АД с параметрами  $P_1$ ,  $T_1$  поступает через дроссель 3 на вход соплового аппарата турбины 2. В сопловом аппарате он расширяется, в результате чего его теплосодержание падает, а скорость движения растет. С выхода соплового аппарата, воздух, обладающий кинетической энергией, подается на лопатки рабочего колеса турбины 1, где кинетическая энергия преобразуется в механическую. Воздух, выходящий из турбины, имеющий низкое давление  $P_2$  и низкую температуру  $T_2$ , может использоваться для охлаждения генератора 4 или другого оборудования.

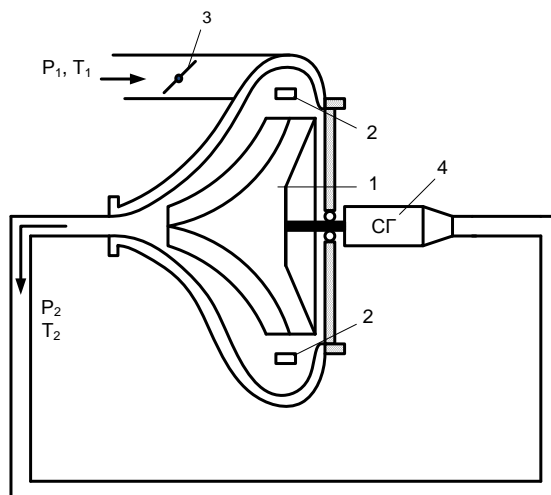


Рис. 16. Привод СГ от воздушной турбины

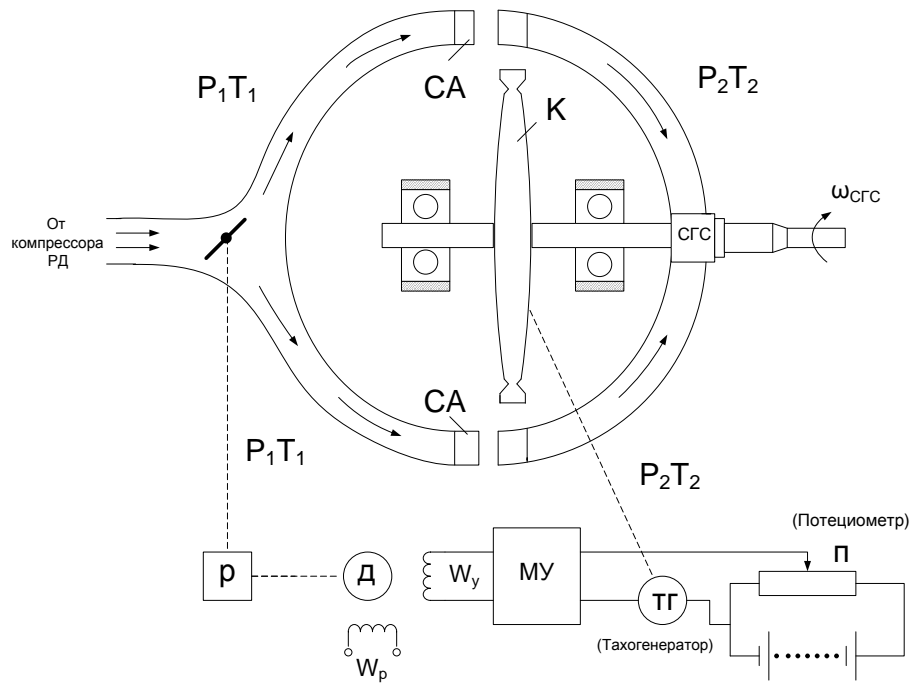


Рис. 17. Схема работы привода СГ от воздушной турбины

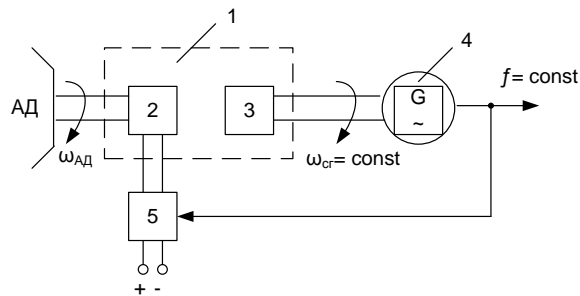
### Турбомеханические дифференциальные ППЧВ.

На современных реактивных самолетах преимущественно применяются дифференциальные воздушно- турбинные приводы, обладающие лучшими весовыми и энергетическими показателями.

## 6. Электромеханические (электромашинные) ППЧВ.

### Электромеханические ППЧВ

В качестве примера рассмотрим схему привода с электромагнитной муфтой скольжения.



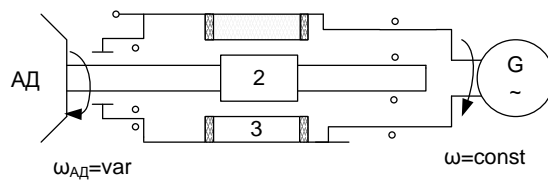


Рис. 20. Электромеханический ППЧВ с электромагнитной муфтой скольжения.

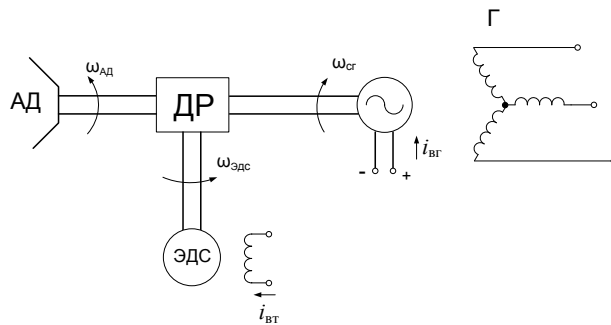


Рис. 22. Электрический динамический тормоз- электрическая машина

При увеличении частоты вращения АД растет частота вращения СГ  $\omega_G$ , регулятор частоты уменьшает ток возбуждения тормоза, противодействующий момент тормоза снижается, частота вращения тормоза  $\omega_{Э.Д.Т.}$  растет, что и приводит к восстановлению частоты вращения генератора  $\omega_{СГ}$ .

## 7. Сравнительные характеристики приводов.

Выбор типа привода зависит от многих факторов, главными являются:

- диапазон скорости вращения;
- мощность;
- место установки;
- система запуска АД;

Относительный вес привода или удельная масса без учета системы охлаждения не должен превышать  $m_{УД} = 0,7 \div 1,2 \text{ кг/кВ} \cdot \text{А}$ .

*Механические приводы* имеют к.п.д.  $\eta = 0,9 \div 0,96$ , но сложны в изготовлении, требуют большой мощности сервоприводов для регулирования положения роликов.

Широкого применения не нашли. (Применяются на некоторых французских и английских самолетах.

Масса ППЧВ механического типа = 40 кг. (Хейса)

Масса генератора с ППЧВ 75 кг.

Удельная масса  $m_{уд} = \frac{75}{30} = 2,5 \frac{\text{кг}}{\text{кВ} \cdot \text{А}}$ ;  $P = \text{до } 40 \text{ кВт}$ .

*Турбомеханические ППЧВ* применяются на ТУ- 154, ИЛ-62, 86, 76.

$\eta = 0,8 \div 0,85$ ,  $m_{уд} = 1,6 - 1,8 \frac{\text{кг}}{\text{кВ} \cdot \text{А}}$   $P = \text{до } 60 \text{ кВт}$ .

## **Питання для самоперевірки**

1. Чем вызвана и к каким последствиям приводит неравномерность вращения ротора генератора при непосредственном приводе от авиационного двигателя ?
2. Чем отличается дифференциальный привод от привода с полным преобразованием энергии?
3. Поясните образование вращающего момента в гидродвигателе?
4. Назовите факторы определяющие жесткость механической характеристики гидравлического, механического и воздушного приводов.
5. В чем заключаются преимущества приводов в интегральном исполнении ?

## **Лекція № 3**

**Тема лекції: Регулювання кутової швидкості та частоти струму СГ.**

### **План лекції**

1. Вимоги до точності підтримки частоти в статичних і перехідних режимах
2. Структурні схеми регулювання. Грубий і точний канали регулювання частоти.
3. Центробіжно-гідравлічні регулятори швидкості.
4. Рівняння грубого каналу
5. Рівняння коректора частоти
6. Схема коректора інтегрального гидромеханічного ППЧВ

### **Література**

1. Синдеев И.М., Савелов А.А. Системы электроснабжения воздушных судов. – М.: Транспорт, 1990. – 296 с.
2. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии : ГОСТ 19705-89. – [Введ. 1990.01.01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1989. -45 с.
3. Захарченко В.А., Панов В.И. Оценка динамических свойств авиационных энергоузлов с применением вычислительной техники. – К.: КИИГА, 1994.– 36 с.
4. Зонтов В.М., Куприн Б.В. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1988. – 390 с.

## Зміст лекції

### 1. Вимоги до точності підтримки частоти в статичних і перехідних режимах.

Точність стабілізації частоти струму СГ СЕП визначається характеристиками приймачів електричної енергії ПС. Електрообігрівальне, протиобліднівальне обладнання не критично до коливань частоти, а пілотажно-навігаційні прилади, системи автоматичного управління, не допускають відхилення частоти більш ніж на кілька відсотків.

Підвищення точності стабілізації частоти підвищує надійність приймачів, полегшує процес синхронізації при СГ при паралельній роботі, але ускладнює СЕП, підвищує її вартість.

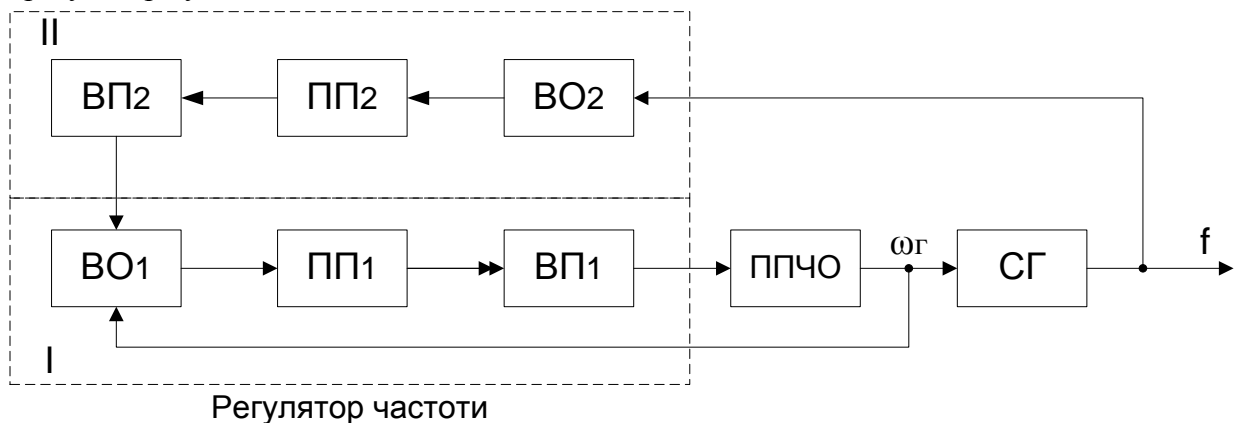
Більшість приймачів задовільно працює при відхиленні частоти в межах  $\pm 5\%$  її номінального значення 400 Гц, тому цей діапазон зміни частоти прийнятий за стандартний.

### 2. Структурні схеми регулювання. Грубий і точний канали регулювання частоти.

Частота струму СГ  $f$  залежить від кутової швидкості його ротора  $\omega$  і числа пар полюсів  $p$ :

$$f = \frac{p\omega}{2\pi}.$$

Ротор СГ обертається від вихідного валу ППЧО, тому для стабілізації частоти струму стабілізують кутову швидкість вихідного валу ППЧО. Для цього привід ППЧО має регулятор кутової швидкості.



В регулятор входить вимірювальний орган ВО, підсилювальний ПП і виконавчий пристрій ВП.

ВП впливає на регулюючий орган ППЧО - похилу шайбу в гідромеханічному приводі або на заслонку в пневмомеханічному приводі.

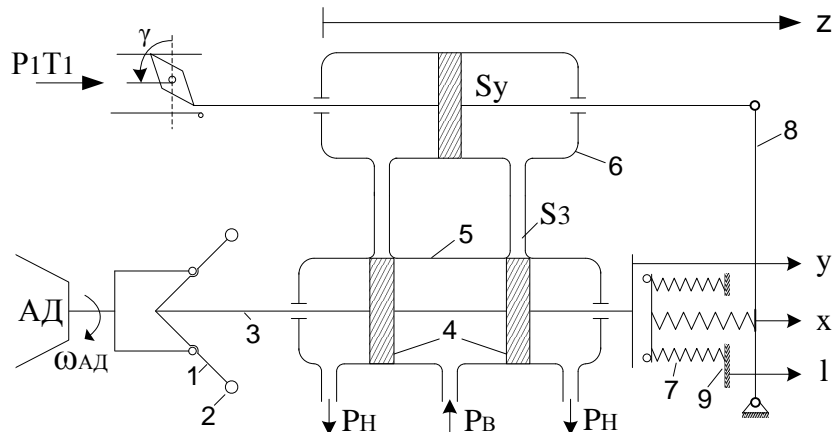
Вимірювальний орган ВО формує сигнал, пропорційний відхиленню поточної кутової швидкості вихідного валу ППЧО від заданого значення. Сигнал підсилюється ПП і подається на ВП, кут нахилу шайби або заслінки змінюється, змінюючи частоту обертання валу вихідного ППЧО.

### 3. Центробіжно-гідралічні регулятори швидкості



Для пневмомеханічних і гидромеханічних приводів в грубому каналі найчастіше використовують відцентрово-гидравлічні регулювальники швидкості.

Вимірювальний орган регулювальника – центробіжний тахометр 1 – приводиться в обертання від вихідного валу ППЧО з кутовою швидкістю  $\omega$ . Із збільшенням  $\omega$  важки 2 тахометра розходяться. Витік 3 тахометра переміщується вправо. З штоком 3 зв'язані поршні 4 золотника 5.



Для пневмомеханічних і гидромеханічних приводів в грубому каналі найчастіше використовують відцентрово-гидравлічні регулювальники швидкості.

#### 4. Рівняння грубого каналу

Введемо позначення:  $y$  – переміщення штоку тахометра;  $z$  – переміщення поршня сервомотора;  $x$  – переміщення поворотного важеля жорсткого зворотного зв'язку;  $l$  – переміщення платформи коректором.

Відцентровий тахометр за динамічними характеристиками відноситься до коливальної ланки.

При дослідженні динаміки процесів в системах регулювання частот, враховуючи малі значення постійних часу тахометра або можна знехтувати, вважаючи при цьому, що величина переміщення штоку  $\Delta y$  у відцентрового тахометра залежить від величини відхилення кутової швидкості вхідного валу  $\Delta \omega$ , переміщення  $\Delta l$  платформи коректором і зміни натяжки  $\Delta x$  пружини, викликаного дією негативного зворотного зв'язку.

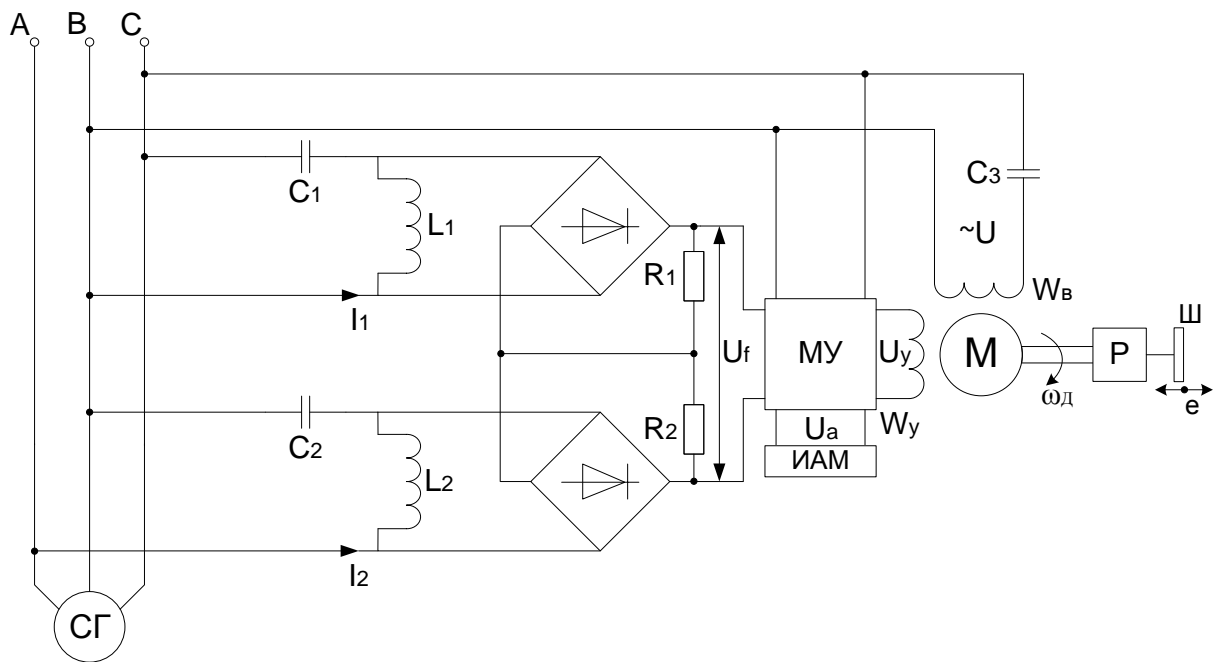
Тоді рівняння руху відцентрового тахометра з золотником в малих прирости можна представити у вигляді:

$$\Delta y = k_{\omega} \Delta \omega + k_l \Delta l + k_x \Delta x, \quad (1)$$

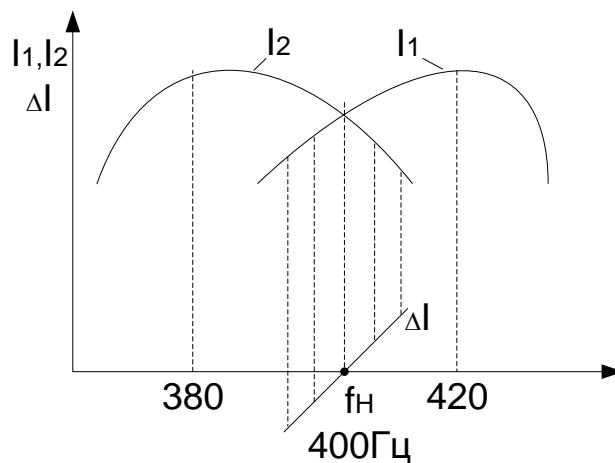
де  $k_{\omega}$  – коефіцієнт, що характеризує ефективність впливу рухливих частин тахометра на переміщення його штоку;

$k_{l1}, k_{l2}$  – коефіцієнти, що характеризують жорсткість пружин.

#### 5. Рівняння коректора частоти



Розглянемо на прикладі принципової схеми коректуючого пристрою вимірювальний орган (ВО) – два резонансні контури  $L_1C_1$ ,  $L_2C_2$ . Резонансна частота налаштування I-го контура дещо вища за номінальне значення частоти  $f_H$ , що стабілізується, а другого – нижче.



Напруги на  $L_1$  і  $L_2$  пропорційні струмам  $I_1$  та  $I_2$ , що протікає по резонансних контурах, отже, напруга  $U_f$ , яка знімається з резисторів  $R_1$  і  $R_2$  (вони однакові) буде пропорційна різниці струмів контурів  $I_1$  та  $I_2$ . При невеликих відхиленнях від частоти  $f_H$  різниця струмів лінійно залежить від частоти, тому і напруга на виході ВО буде пропорційно відхиленню частоти генератора від  $f_H$ :

$$\Delta U_f = k_f \Delta f, \quad (1)$$

Де  $k_f$  – коефіцієнт пропорційності.

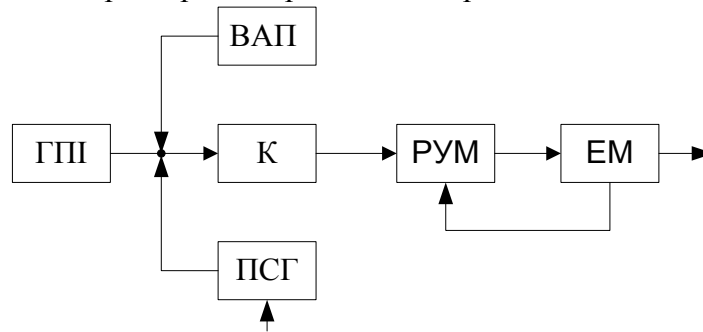
$\Delta f$  – відхилення частоти струму від номінального значення.

Сигнал  $U_f$  надходить на МУ, де посилюється.

### 6. Схема коректора інтегрального гидромеханічного ПЧО.

У сучасних інтегральних гидромеханічних приводах регулятор кутової швидкості (грубий канал) дозволяє стабілізувати частоту СГ з похибкою не більше  $\pm 1\%$ , тому коректор частоти (точний канал) для таких приводів використовується лише для синхронізації генераторів перед їх включенням на паралельну роботу і для вирівнювання активних навантажень між паралельно працюючими СГ.

Схема коректора інтегрального гидромеханічного ППЧО.



ГПШ – генератор пилоподібних імпульсів

ВАП – вимірювач активної потужності

ПСГ – пристрій синхронізації генераторів

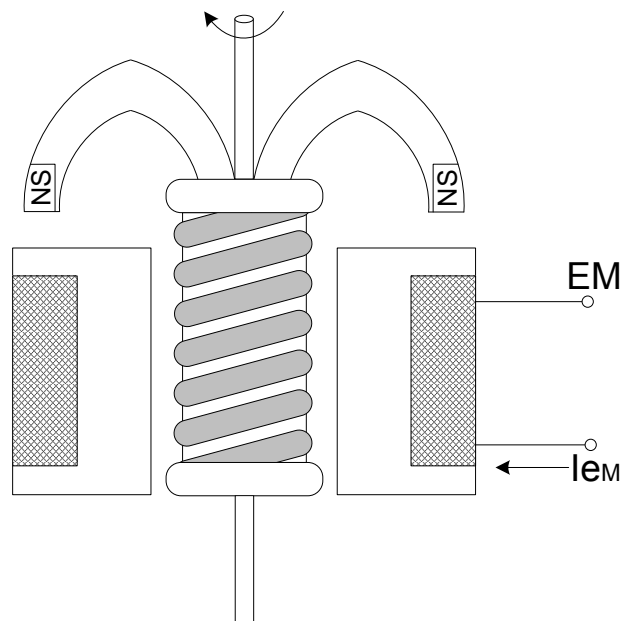
К – компаратор

РУМ – реверсний підсилювач потужності (5 транзисторів)

ЕМ – електромагніт

Вихідними сигналами коректора є: сигнал з пристрою синхронізації генераторів (ПСГ) і сигнал з вимірювача активної потужності (ВАП), а виконавчим елементом коректора служить котушка електромагніту (ЕМ).

Електромагнітний коректор частоти



### Питання для самоперевірки

1. В чем заключается принципиальная разница между регулятором угловой скорости и регулятором частоты тока?
2. Чем вызвана необходимость применения корректора частоты и от чего зависит его погрешность?
3. Как осуществляется коррекция частоты в приводе интегрального исполнения?
4. Каково устройство центробежного тахометра в приводе интегрального исполнения?

## Лекція № 4

### Тема лекції: Регулятори напруги авіаційних генераторів постійного і змінного струму.

-

#### План лекції

1. Вимоги ГОСТ 19705-89 до точності підтримки напруги і якості перехідних процесів.
2. Принципи побудови систем регулювання напруги. Класифікація регуляторів напруги (РН).
3. Вимірюючі пристрої РН і способи їх включення.
4. РН на магнітних підсилювачах.
5. Транзисторні РН.
6. Тиристорні РН.

#### Література

1. Синдеев И.М., Савелов А.А. Системы электроснабжения воздушных судов. – М.: Транспорт, 1990. – 296 с.
2. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии : ГОСТ 19705-89. – [Введ. 1990.01.01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1989. -45 с.
3. Захарченко В.А., Панов В.И. Оценка динамических свойств авиационных энергоузлов с применением вычислительной техники. – К.: КИИГА, 1994.– 36 с.
4. Зонтов В.М., Куприн Б.В. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1988. – 390 с.

#### Зміст лекції

**1. Вимоги ГОСТ 19705-89 до точності підтримки напруги і якості перехідних процесів. (Див. лекцію №1).**

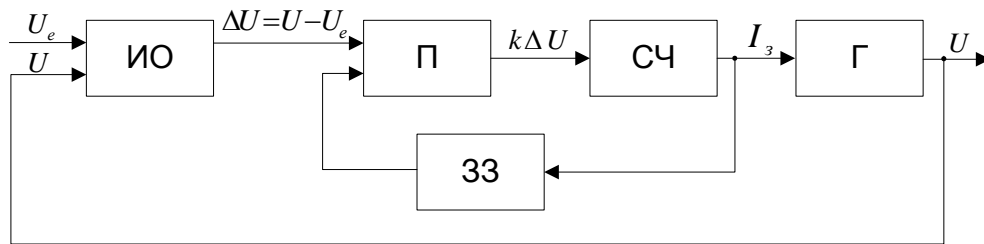
**2. Принципи побудови систем регулювання напруги. Класифікація регуляторів напруги (РН).**

Напруга на затискачах  $\Gamma$  залежить від його частоти обертання, магнітного потоку, величини і характеру навантаження. Для його підтримки на необхідному рівні складно використовувати ряд способів регулювання. В СЕП ПС регулювання  $U$   $\Gamma$  здійснюється змінюю його магнітного потоку шляхом зміни величини струму в обмотці збудження або опору магнітного ланцюга машини.

Зміна регульованого параметра (струму збудження або струму в обмотці підмагнічування

генератора) може здійснюватися: за відхиленням, по збуренню і за принципом комбінованого регулювання.

Системи регулювання  $U$  ПС в основному побудовані за принципом регулювання за відхиленням.



Вимірювальний орган (ВО) регулятора формує сигнал  $\Delta U$ , пропорційний відхиленню регульованого  $U$  від заданого (еталонного) значення напруги  $U_e$ . Сигнал підсилюється підсилювачем (П) і впливає на виконавчий орган (силову частину) СЧ регулятора. Для поліпшення динамічних характеристик системи в схему включено елемент від'ємного зворотного зв'язку (ЗЗ).

### 3. Вимірюючі пристрої РН і способи їх включення.

В РН, побудованих за принципом регулювання по відхиленню на виході вимірювального органу (ВО) формується сигнал розузгодження, пропорційний відхиленню регульованого  $U$  від заданого (еталонного) значення

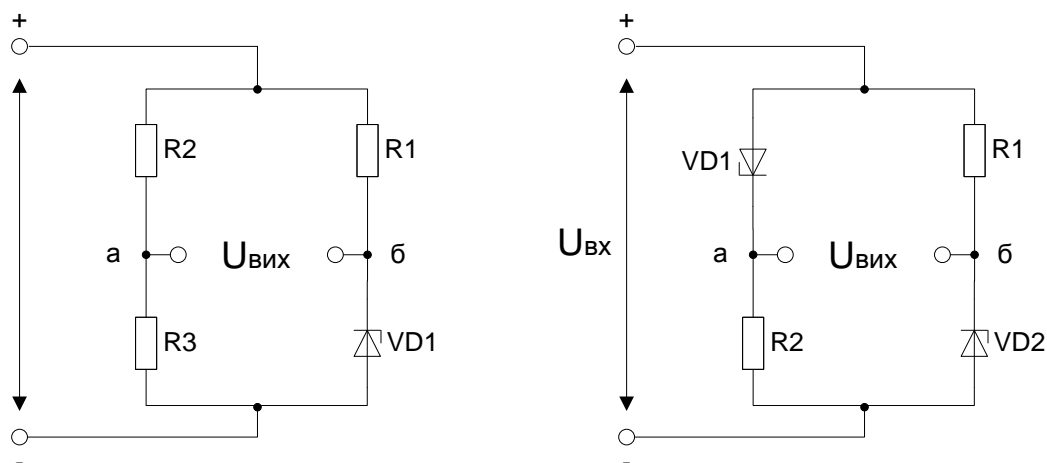
За способом утворення еталонної напруги  $U_e$  вимірювальні пристрої розділяють на пристрої з механічним і електричним еталонами напруги.

Механічний еталон використовують у вугільному регулювальнику напруга (ВРН). Еталоном є сила пружини, що діє на якір електромагніту і стискає вугільний стовп.

Сила пружини врівноважується силою реакції вугільного стовпа і силою, створюваною обмоткою електромагніту, до якої підводиться напруга  $U$  пропорційне регульованій напрузі. Вихідний сигнал вимірювального пристрою – різниця сил, що діють на якір, яка залежить від відхилення напруги від заданого значення.

Недолік еталону, заснованого на використанні пружних властивостей пружини полягає в тому, що з часом і при дії температури  $t_0$  ці властивості, а отже і  $U_e$  змінюються.

Найбільш поширені схеми вимірювальних пристроїв з електричним еталонном, в якості якого використовується напруга стабілітрона, що працює в режимі пробую. Вони можуть бути виконані за мостовою схемою із стабілітроном в одному плечі, і з стабілітронами в протилежних плечах.



Робоча точка вибирається на вертикальній частині вольт-амперної характеристики стабілітрона.

#### 4. РН на магнітних підсилювачах.

##### Однокаскадний МП.

Схеми таких РН розрізняють залежно від числа використовуваних МП: одно або двохкаскадний; від виду зворотного зв'язку; від типу чутливого елемента.

Застосовуються для регулювання збудження безконтактних СГ або їх збудників.

Чутливим елементом або вимірювальним органом (ВО) є вимірювальний міст, в одне з плечей якого включено стабілітрон. Міст збалансований так, що при номінальній напрузі генератора напруга на його виході дорівнює нулю. Вихід ВО включений на обмотку управління  $W_y$  магнітного підсилювача МП. Напрямок струму в  $W_y$  визначається знаком неузгодженості по напрузі. Обмотка зміщення  $W_{зм}$  підмагнічує МП, забезпечуючи самозбудження СГ і роботу МП на заданій ділянці його характеристики.

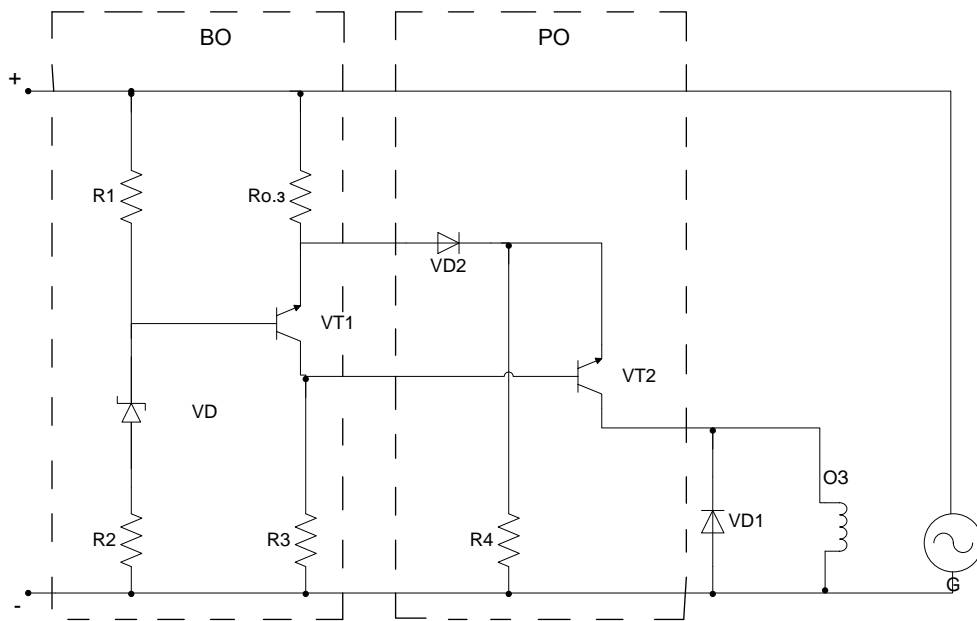
Обмотка зміщення  $W_{зм}$  і робоча обмотка  $W_p$  МП живляться від обмотки якоря підзбуджувача (ЯПЗ).

На вихід МП через випрямляючий міст В1 включена обмотка збудження збудника (ОЗЗ), послідовно до якої включена первинна обмотка стабілізуючого трансформатора (ТЗ), призначеного для підвищення стійкості роботи схеми в перехідних режимах.

Вторинна обмотка ТЗ включена на обмотку стабілізації  $W_{ст}$ .

#### 5. Транзисторні РН.

Роботу розглянемо на прикладі принципової схеми найпростішого транзисторного РН ГПТ.



РН складається з двох основних елементів: вимірювального органу (BO), виконаного за схемою моста з керованим транзистором VT1 і кремнієвим стабілітроном VD, та регулюючого органу (PO), що впливає на ланцюг порушення. Основний елемент PO - транзистор VT2.

Крім цих елементів у схемі передбачені: ланцюг зворотного зв'язку, що складається з опору  $R_{33}$  і діода VD2, який необхідний для надійного закриття транзистора VT1 після відкриття транзистора VT2; і діод VD1, включений паралельно O3 і призначений для захисту транзистора VT2 і O3 від перенапруг, що виникають при розриві ланцюга O3.

При невеликій напрузі генератора G транзистор VT1 закритий, а VT2 відкритий. Цим забезпечується самозбудження генератора. Під час відкритого стану транзистора VT2, струм збудження і напруга генератора зростають. При досягненні певної напруги генератора (напруга VD досягає величини пробоя) провідність стабілітрона зростає.

Напруга на опорі R1 також зростає, і VT1 відкривається.

## 2. Транзисторні РН

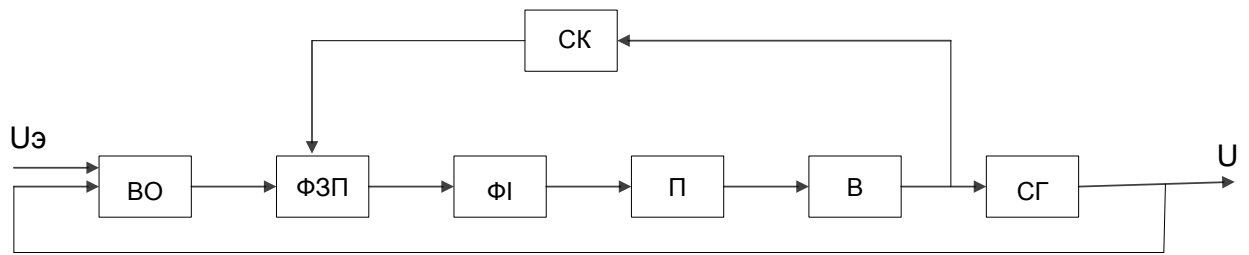
Використовуються на Іл-86, Іл-96-300, Ту-204 (БРН-120 Т5А).

Всі сучасні широко-імпульсні напівпровідникові РН – регулятори дискретної дії. Їх аналогом в сорокових роках були вібраційні РН. В якості імпульсного елемента використовувалися електромагнітні реле.

Збільшення потужності генераторів призвело до того, що потужність ланцюга збудження, яку необхідно переривати, перевищила допустиму розривну потужність контактів реле (змінний 150 ВА) і вібраційні регулятори були замінені УРН.

## 6. Тиристорні РН.

Тиристорні регулятори відносяться до класу фазоімпульсних регуляторів, тобто керуючий вплив являє собою послідовність імпульсів, параметри яких пропорційні фазі значень сигналу помилки у фіксований дискретний момент часу.



Регулятор складається з вимірювального пристрою (ВО), фазозміщуючого пристрою ФЗП, формувачів імпульсів (ФІ), підсилювача потужності (П), стабілізуючого контуру (СК).

Регулювання напруги генератора здійснюється впливом на струм збудження збудника ОЗЗ шляхом фазового управління тиристорами: тиристори, включені в ланцюг синусоїдальної напруги, періодично відмикаються короткочасними керуючими імпульсами, синхронізованими з напругою живлення.

Вимірюючий орган виконаний по мостовій схемі з електричним еталоном на двох стабілітронах.

## Лекція № 5

**Тема лекції: Статика та динаміка процесів регулювання напруги авіаційних генераторів .**

### План лекції

1. Генератор змінного струму як об'єкт регулювання напруги
2. Аналіз динаміки процесів регулювання напруги генератора змінного струму
3. Генератор постійного струму, як об'єкт регулювання напруги
- 4.

### Література

1. Синдеев И.М., Савелов А.А. Системы электроснабжения воздушных судов. – М.: Транспорт, 1990. – 296 с.
2. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии : ГОСТ 19705-89. – [Введ. 1990.01.01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1989. -45 с.
3. Захарченко В.А., Панов В.И. Оценка динамических свойств авиационных энергоузлов с применением вычислительной техники. – К.: КИИГА, 1994.– 36 с.
4. Зонтов В.М., Куприн Б.В. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1988. – 390 с.



## Зміст лекції

### 1. Генератор змінного струму як об'єкт регулювання напруги

Основні труднощі рішення системи диференціальних рівнянь, що описують процес, обумовлені періодичною зміною індуктивностей та взаємоіндуктивностей обмоток при обертанні явнополюсного ротора внаслідок безперервної зміни опору магнітним потоком, які визначають дані індуктивності. Для виключення цих ускладнень використовують лінійне перетворення, запропоноване для дослідження перехідних процесів Горєвим і Парком.

Сутність цього перетворення полягає в тому, що замість трьохосової нерухомої системи координат  $A, B, C$  використовується така, що обертається, жорстко пов'язана з ротором і поєднана відповідно з його поздовжньою і поперечною осями двовісна система координат  $d, q$ . Оскільки обмотки фаз, розташовані в осях  $d$  і  $q$ , нерухомі щодо ротора, індуктивності і взаємоіндуктивності такої машини постійні. Це дозволяє перетворити систему рівнянь з коефіцієнтами, що періодично змінюються, в систему рівнянь з постійними коефіцієнтами.

Так як перехідні процеси в ланцюзі якоря синхронного генератора і в демпферних обмотках протікають значно швидше, ніж в ланцюзі збудження, при аналізі процесів регулювання напруги їх можна не враховувати.

### 2. Аналіз динаміки процесів регулювання напруги генератора змінного струму

Процес регулювання напруги синхронного генератора взаємопов'язаний з процесом регулювання частоти обертання. Але внаслідок того, що процеси в контурі регулювання напруги відбуваються значно швидше, дослідження стійкості цих процесів можна проводити роздільно. Зазвичай регулювання напруги синхронного генератора здійснюють регулюванням напруги на магнітних підсилювачах.

Процес регулювання розглянемо при спільній роботі безконтактного синхронного генератора з регулятором напруги на магнітних підсилювачах. В даному випадку зміна опору кола збудження  $\rho_B=0$ .

Для дослідження стійкості процесу регулювання необхідно скласти характеристичний рівняння замкнутої системи:

$$W_p + 1 = 0$$

### 3. Генератор постійного струму. як об'єкт регулювання напруги.

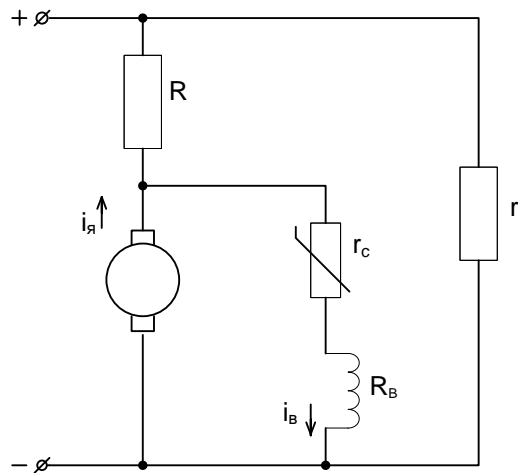


Рис. 2. Принципіальна схема підключення генератора постійного струму

У схемі ГПТ (генератор постійного струму) з регулюючим опором в ланцюзі збудження, нехтуватимемо дією вихрових струмів в масивних частинах магнітного ланцюга машини, потоками розсіяння і гістерезисом магнітних ланцюгів, перехідним падінням  $U$  на контакті щіток з колектором, зміною опору обмоток машини під впливом  $t^0$ , індуктивністю ланцюга якоря і взаємоіндуктивністю між обмотками якоря і збудження.