

ЭУ на основе  
электро механических  
преобразователей энергии  
(генераторы, применяемые на ЛА –  
классификация, требования, виды,  
характеристики)

Маргацкая Елена Александровна

# Классификация авиационных генераторов

## 1. По назначению:

- Магистральные – работают в течение всего времени полетного задания, обеспечивают эл. энергией все бортовые системы ЛА.
- Резервные – подключаются к бортсети при выходе из строя магистральных генераторов
- Аварийные - обеспечивают эл. энергией ограниченное число потребителей при выходе из строя магистральных и резервных генераторов
- Специального назначения – для питания энергоемкого спец. оборудования.

# Классификация авиационных генераторов

2. По роду тока:

- Генераторы постоянного тока
- Генераторы переменного тока

3. По типу используемого привода: Генераторы, приводимые во вращение

- Турбиной турбогенераторной установки
- Автономной двигательной установкой
- Маршевыми двигателями ЛА

4. По способу охлаждения:

- Воздушного охлаждения
- Жидкостного циркуляционного охлаждения
- Испарительного охлаждения
- Комбинированного охлаждения

# Требования, предъявляемые к авиационным генераторам

- Высокая надежность
- Внутренние параметры генератора и качество вырабатываемой эл. энергии
- Регулируемость
- Перегрузочная способность
- Автономное и рациональное использование на борту
- Устойчивость к механическим воздействиям со стороны привода и ударных токовых нагрузок

# Генераторы переменного тока на основе синхронной машины классического исполнения

- Особенность СГ – частота вращения ротора = частоте вращения магнитного поля в воздушном зазоре и постоянна при различных нагрузках.

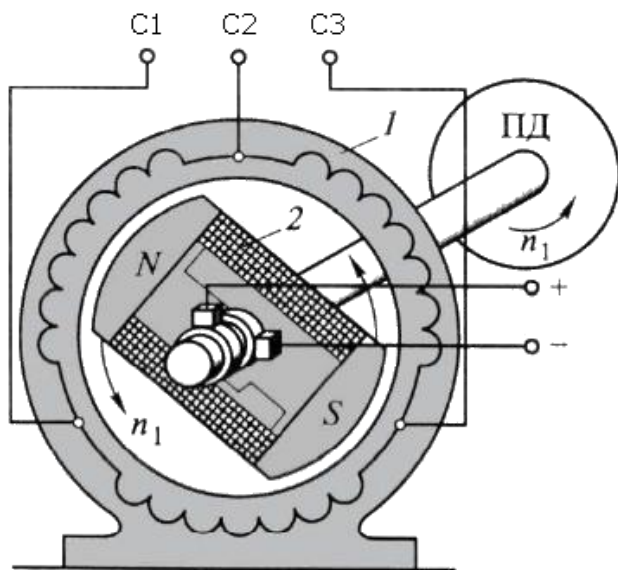


Рис. 1.1. Функциональная схема синхронного генератора

# Математическая модель. Идеализированная электрическая машина

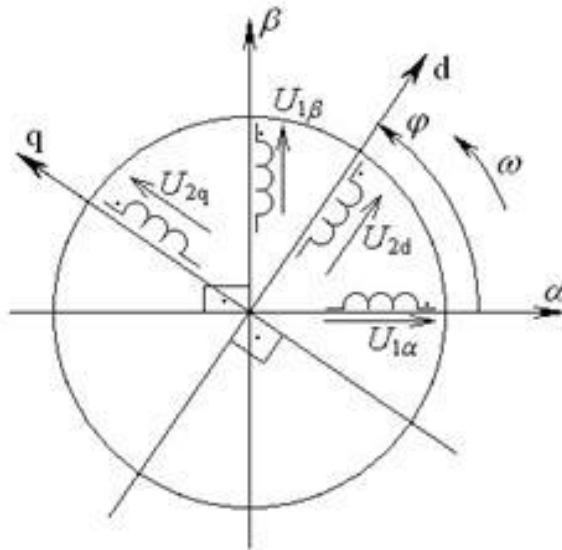
Переходят к изучению идеализированной машины, которая характеризуется абсолютной симметрией (электрической, магнитной и пространственной), гладкими цилиндрическими поверхностями статора и ротора, магнитной проницаемостью  $\mu = \infty$  и распределением МДС в зазоре по гармоническому закону. В идеализированной машине вращающееся поле имеет круговую форму, т.е. его амплитуда постоянна, а мгновенное изменение частоты за период неизменно.

# Математическая модель.

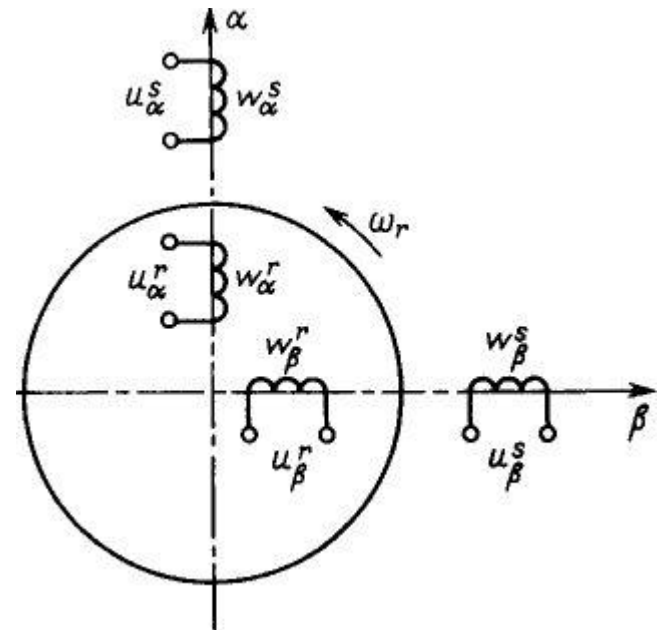
## Обобщенная электрическая машина

- Двухполюсная двухфазная симметричная идеализированная машина, имеющая 2 пары обмоток на роторе и статоре.

Наиболее широкое применение нашли 2 системы координат: d-q и  $\alpha$ - $\beta$ .



Не преобразованная СК

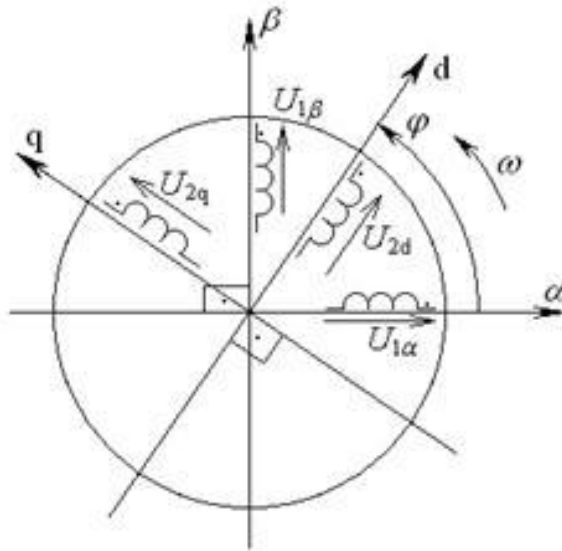


Преобразованная СК

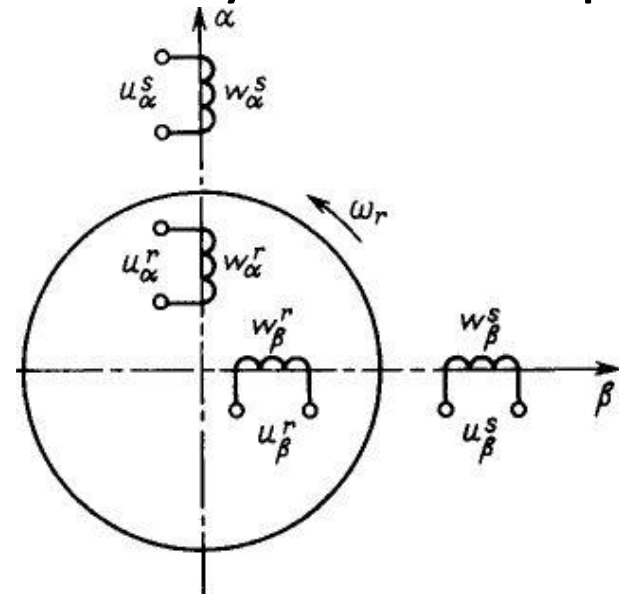
# Математическая модель.

## Обобщенная электрическая машина

СК  $\alpha$ - $\beta$  связана со статором и в ней угловая скорость СК  $\omega_k=0$ . Такую СК применяют для исследования АД. СМ моделируют в осях d-q, которые вращаются синхронно с ротором  $\omega_k=\omega=\omega_1$ ,  $\omega$  – скорость вращения ротора,  $\omega_1$  – синхронная угловая скорость.



Не преобразованная СК



Преобразованная СК



# Математическая модель.

## Обобщенная электрическая машина

Принципиально угловая скорость СК может быть выбрана произвольно СК  $u$ - $v$  – применяют при моделировании машин с вращающимся ротором и статором. Т.о. мат. модель обобщенной машины в СК  $u$ - $v$  является более общим случаем и может быть использована для исследования АМ и СМ.

$$\begin{bmatrix} u_{1u} \\ u_{2u} \\ u_{2v} \\ u_{1v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1u} + \frac{d}{dt} L_{1u} & \frac{d}{dt} M & M\omega_{\kappa} & L_{1v}\omega_{\kappa} \\ \frac{d}{dt} M & r_{2u} + \frac{d}{dt} L_{2u} & L_{2v}(\omega_{\kappa} - \omega) & M(\omega_{\kappa} - \omega) \\ -M(\omega_{\kappa} - \omega) & -L_{2u}(\omega_{\kappa} - \omega) & r_{2v} + \frac{d}{dt} L_{2v} & \frac{d}{dt} M \\ -L_{1u}\omega_{\kappa} & -M\omega_{\kappa} & \frac{d}{dt} M & r_{1v} + \frac{d}{dt} L_{1v} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1u} \\ i_{2u} \\ i_{2v} \\ i_{1v} \end{bmatrix};$$

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \pm m_c = pM(i_{1v}i_{2u} - i_{1u}i_{2v}),$$

# Обобщенная электрическая машина.

## Двухобмоточный трансформатор

При  $\omega_k=0$  и  $\omega=0$  обобщенная электрическая машина превращается в двухобмоточный трансформатор и достаточно рассматривать процессы в одной паре обмоток по любой из осей.

$$\begin{bmatrix} u_{1u} \\ u_{2u} \\ u_{2v} \\ u_{1v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1u} + \frac{d}{dt} L_{1u} & \frac{d}{dt} M & \cancel{M\omega_k} & \cancel{L_{1v}\omega_k} \\ \frac{d}{dt} M & r_{2u} + \frac{d}{dt} L_{2u} & \cancel{L_{2v}(\omega_k - \omega)} & \cancel{M(\omega_k - \omega)} \\ -\cancel{M(\omega_k - \omega)} & -\cancel{L_{2u}(\omega_k - \omega)} & r_{2v} + \frac{d}{dt} L_{2v} & \frac{d}{dt} M \\ -\cancel{L_{1u}\omega_k} & -\cancel{M\omega_k} & \frac{d}{dt} M & r_{1v} + \frac{d}{dt} L_{1v} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1u} \\ i_{2u} \\ i_{2v} \\ i_{1v} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + \frac{d}{dt} L_1 & \frac{d}{dt} M \\ \frac{d}{dt} M & r_2 + \frac{d}{dt} L_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

# Обобщенная электрическая машина.

## АД с короткозамкнутым ротором

Если принять  $\omega_k=0$  (осуществить преобразование к СК  $\alpha$ - $\beta$ ) и учесть, что обмотки ротора замкнуты ( $u_2=0$ ), а угловая скорость  $\omega \neq \omega_1$ , то получим мат. модель АД с короткозамкнутым ротором.

$$\begin{bmatrix} u_{1\alpha} \\ 0 \\ 0 \\ u_{1\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1\alpha} + \frac{d}{dt} L_{1\alpha} & \frac{d}{dt} M & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt} M & r_{2\alpha} + \frac{d}{dt} L_{2\alpha} & -L_{2\beta} \omega & -M \omega \\ M \omega & L_{2\alpha} \omega & r_{2\beta} + \frac{d}{dt} L_{2\beta} & \frac{d}{dt} M \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt} M & r_{1\beta} + \frac{d}{dt} L_{1\beta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{2\alpha} \\ i_{2\beta} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix}$$

# Обобщенная электрическая машина.

## Синхронная машина

Чтобы получить мат. модель СМ, к обмоткам статора нужно приложить переменное напряжение, к одной из обмоток ротора – постоянное, вторую обмотку закортить. При переходе к СК d-q также принять, что  $\omega_k = \omega = \omega_1$ .

$$\begin{bmatrix} u_{1d} \\ u_{2d} \\ 0 \\ u_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1d} + \frac{d}{dt} L_{1d} & \frac{d}{dt} M & M\omega & L_{1q}\omega \\ \frac{d}{dt} M & r_{2d} + \frac{d}{dt} L_{2d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{2q} + \frac{d}{dt} L_{2q} & \frac{d}{dt} M \\ -L_{1d}\omega & -M\omega & \frac{d}{dt} M & r_{1q} + \frac{d}{dt} L_{1q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \\ i_{1q} \end{bmatrix}$$

# Обобщенная электрическая машина.

## Синхронная машина

Для моделирования переходных и установившихся режимов СМ последнее матричное уравнение записывают через потокосцепления (уравнения Парка-Горева):

$$\begin{aligned}u_{1d} &= (r_{1d} + \frac{d}{dt}L_{1d})i_{1d} + \frac{d}{dt}Mi_{2d} + M\omega i_{2q} + L_{1q}\omega i_{1q} = & u_{2d} &= \frac{d}{dt}Mi_{1d} + (r_{2d} + \frac{d}{dt}L_{2d})i_{2d} = \\&= r_{1d}i_{1d} + \frac{d}{dt}(L_{1d}i_{1d} + Mi_{2d}) + \omega(L_{1q}i_{1q} + Mi_{2q}) = & &= r_{2d}i_{2d} + \frac{d}{dt}(L_{2d}i_{2d} + Mi_{1d}) = \\&= r_{1d}i_{1d} + \frac{d}{dt}\Psi_{1d} + \omega\Psi_{1q}; & &= r_{2d}i_{2d} + \frac{d}{dt}\Psi_{2d};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}u_{1q} &= -L_{1d}\omega i_{1d} - M\omega i_{2d} + \frac{d}{dt}Mi_{2q} + (r_{1q} + \frac{d}{dt}L_{1q})i_{1q} = & 0 &= (r_{2q} + \frac{d}{dt}L_{2q})i_{2q} + \frac{d}{dt}Mi_{1q} = \\&= r_{1q}i_{1q} + \frac{d}{dt}(L_{1q}i_{1q} + Mi_{2q}) - \omega(L_{1d}i_{1d} + Mi_{2d}) = & &= r_{2q}i_{2q} + \frac{d}{dt}(L_{2q}i_{2q} + Mi_{1q}) \\&= r_{1q}i_{1q} + \frac{d}{dt}\Psi_{1q} - \omega\Psi_{1d}; & &= r_{2q}i_{2q} + \frac{d}{dt}\Psi_{2q}.\end{aligned}$$

# Обобщенная электрическая машина.

## Синхронная машина

Пусть обмотка статора вместо  $U_{1d}$  и  $U_{1q}$  обозначается как  $U_d$  и  $U_q$ , а для обмотки возбуждения используем индекс «r».

$$u_d = r_d i_d + \frac{d}{dt} \psi_d + \omega \psi_q; \quad (1)$$

$$u_q = r_q i_q + \frac{d}{dt} \psi_q - \omega \psi_d; \quad (2)$$

Уравнения обмоток статора в продольной и поперечной осях

$$\frac{d\psi_r}{dt} + r_r I_r = U_r; \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} + r_{rd} I_{rd} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} + r_{rq} I_{rq} = 0; \quad (5)$$

Уравнения контура возбуждения и продольного и поперечного демпферных контуров

$$\psi_d = x_d I_d + x_{ad} I_r + x_{ad} I_{rd}; \quad (6)$$

$$\psi_q = x_q I_q + x_{aq} I_{rq}; \quad (7)$$

$$\psi_r = x_{ad} I_d + x_r I_r + x_{ad} I_{rd} \quad (8)$$

$$\psi_{rd} = x_{ad} I_d + x_{rd} I_{rd} + x_{ad} I_r; \quad (9)$$

$$\psi_{rq} = x_{aq} I_q + x_{rq} I_{rq}; \quad (10)$$

Уравнения характеризуют связь токов и Потокосцеплений в различных осях и контурах машины

$$\omega_o J \frac{ds}{dt} = M_T + \psi_q I_d - \psi_d I_q; \quad (11)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = s. \quad (12)$$

Уравнения движения ротора

# 1. Синхронный генератор на основе классической СМ

Серьезным недостатком такого генератора является наличие контактного токопередающего узла, снижающего надежность машины.

Устранить узел можно:

- Естественным способом, сформировав индуктор в виде ротора с постоянными магнитами;
- Разместив обмотки якоря и возбуждения на статоре, обеспечив изменение магнитного потока конструктивными параметрами.
- Выполнив генератор с собственным бесконтактным возбудителем.

# 1. Синхронный генератор на основе

## классической СМ .Применение

Возрождение централизованных СЭС переменного тока связано с появлением тяжелых турбовинтовых самолетов (Ту-95, Ил-18, Ан-10... Ан-30 и т.д.) с мощными противообледенительными системами и пилотажно-навигационными комплексами. Первые отечественные магистральные генераторы переменного тока в авиационных СЭС смешанного типа стали однофазные серии СГО и ГО и трехфазные серии СГС контактные синхронные генераторы. Контактные (классические) СГ продолжают эксплуатироваться на самолетах Ил-18, Ил-38, Ан-12, Ту-95, Су-25, Ми-8.



Ан-30 1971 - 1980



Су-25 1978 – наст. вр.



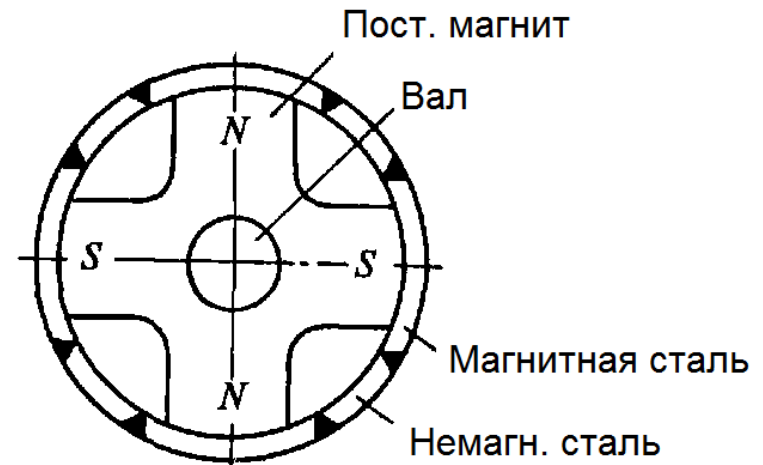
Ту-95 1955 – 1992



## 2. Генераторы переменного тока с возбуждением от пост-х магнитов

Такие генераторы отличает:

- Надежное возбуждение и отсутствие специального источника питания для цепи возбуждения
- Высокая эксплуатационная надежность и простота обслуживания
- Высокий КПД (до 0,9 – 0,95)
- Малая инерционность
- Возможность работы при достаточно высоких температур-х и частотах вращения



## 2. Генераторы переменного тока с возбуждением от пост-х магнитов

Несмотря на естественную бесконтактность, область применения генераторов с ПМ была ограничена по причинам:

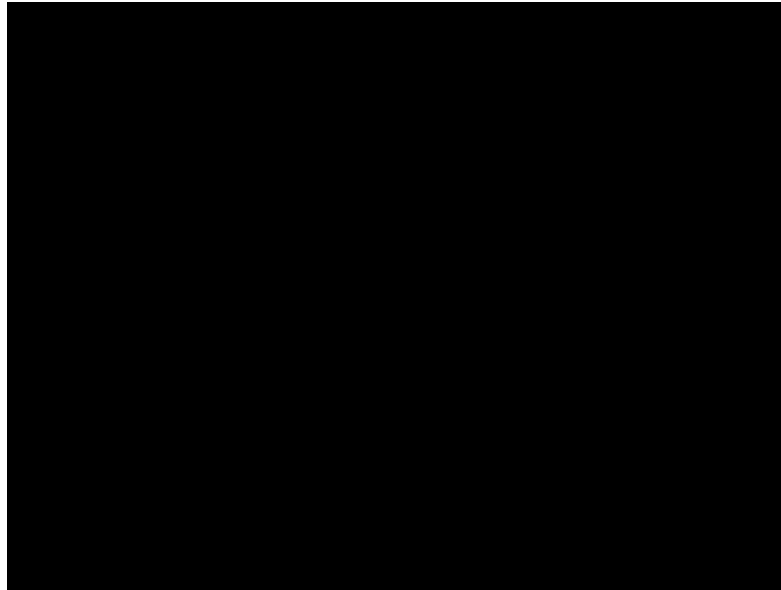
- Невысокие магнитные характеристики ПМ (может конкурировать с классическими СМ только в области небольших мощностей)
- Затруднено регулирование напряжения
- Характеристики СГ с ПМ зависят от разброса параметров материалов ПМ, которые чувствительны к температуре и ее изменениям.

В последнее время интерес вызывают соединения Nd-Fe-B – у них более высокие магнитные свойства, но плохая термостабильность.

## 2. МЭГ. Применение

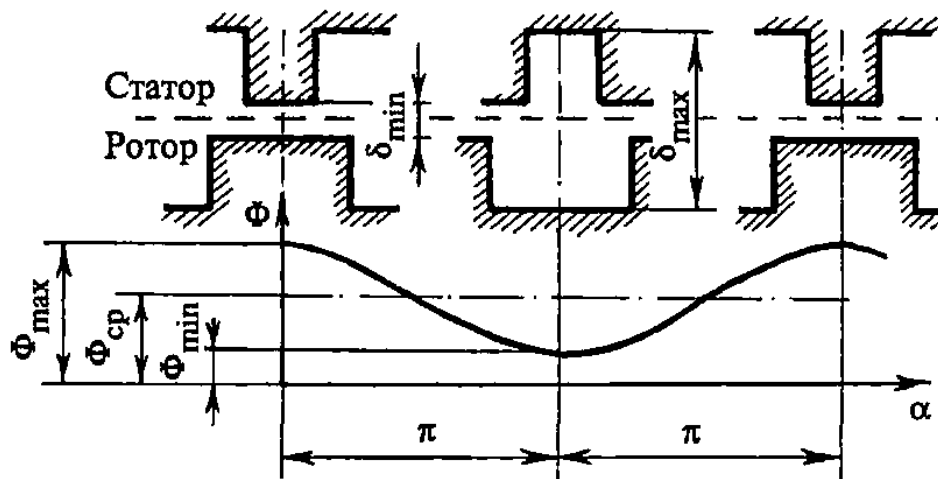
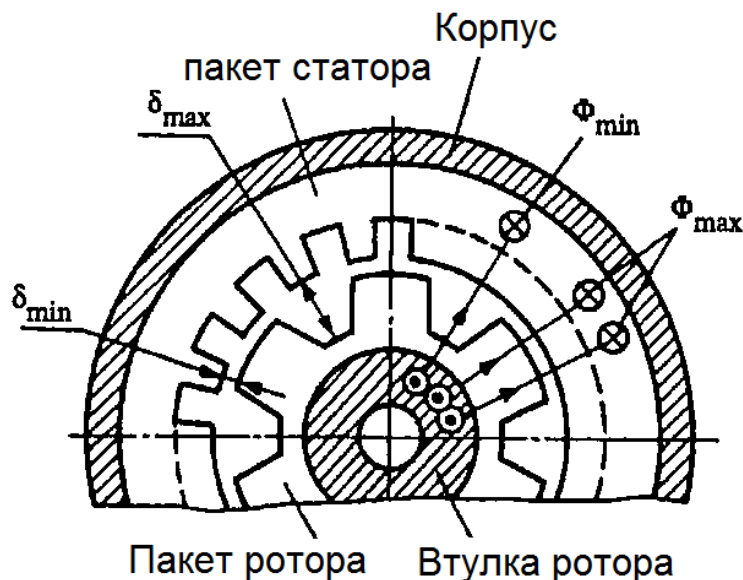
В настоящее время в авиационной электротехнике разработка и внедрение на ЛА генераторов с возбуждением от постоянных магнитов (магнитоэлектрические генераторы (МЭГ)) рассматриваются в качестве одного из перспективных направлений развития автономных источников питания.

«Стартер-генератор для Ка-62 впервые создан по схеме двух электрических машин – магнитоэлектрического генератора (основного) и индукторного генератора (генератор управления) и соединяет в себе лучшие свойства машин этих типов. Использование возбуждения от постоянных магнитов позволяет получить повышенный КПД в генераторном режиме, кроме того, разработка подтвердила поддержание стабильного напряжения в двукратном диапазоне оборотов при меньшей массе.»



# 3. Генераторы переменного тока с безобмоточным ротором (индуктронный генератор)

Принцип действия основан на периодическом изменении магнитной проводимости рабочего зазора при вращении ротора. Источник магнитного потока – МДС неподвижной ОВ постоянного тока или МДС ПМ (расположен в стороне от системы статор-ротор). При вращении ротора поток в зубцах статора будет меняться от  $\Phi_{\max}$  до  $\Phi_{\min}$ .



### 3. Генераторы переменного тока с безобмоточным ротором.

«+»: простота и надежность конструкции, технологичность, хорошая регулируемость, возможность работы в агрессивных средах и при повышенных частотах вращения.

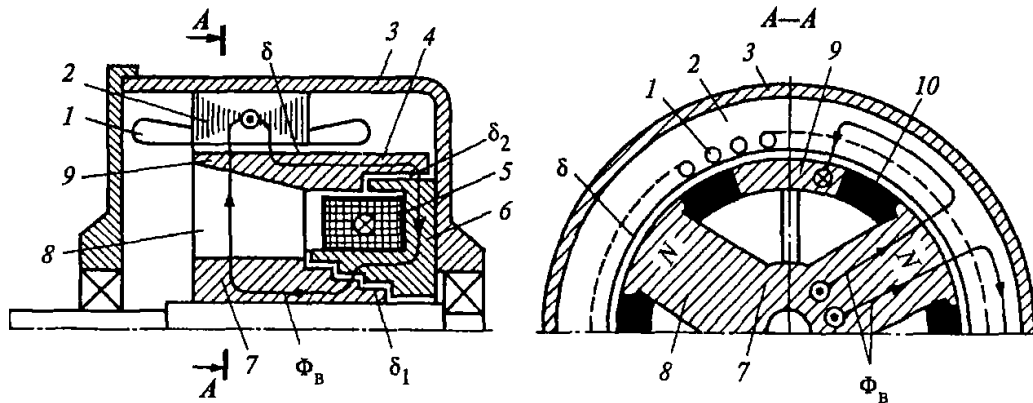
«-»: низкая степень использования активных материалов (масса индукторного генератора больше массы классического на 40-60%); высокий коэффициент искажения кривой напряжения – до 20% (у классических не больше 10%); сравнительно большое изменение напряжения при изменении нагрузки.

# 3. Генераторы переменного тока с безобмоточным ротором.

## Применение

На самолетах подобные генераторы использовались лишь в маломощных электромашинных преобразователях серии МА.

Пример практического применения в авиационных СЭС – электромеханические преобразователи с внутризамкнутым магнитопроводом типа «сексин» (напр., МиГ-25).



МиГ-25 1969 - 1985

## 4. Бесконтактные генераторы с комбинированным возбуждением

В таком генераторе рабочий поток создается в результате совместного действия двух источников МДС – ОВ и ПМ. Благодаря наличию ПМ, создающего основную часть потока, мощность ОВ и, значит, мощность регулирования с таких СГ меньше. Наибольшее распространение получили генераторы с КВ представляющие собой двухмашинный агрегат – основной генератор с ПМ и вспомогательный бесконтактный генератор с внутризамкнутым потоком, выполняющий роль регулировочного звена.

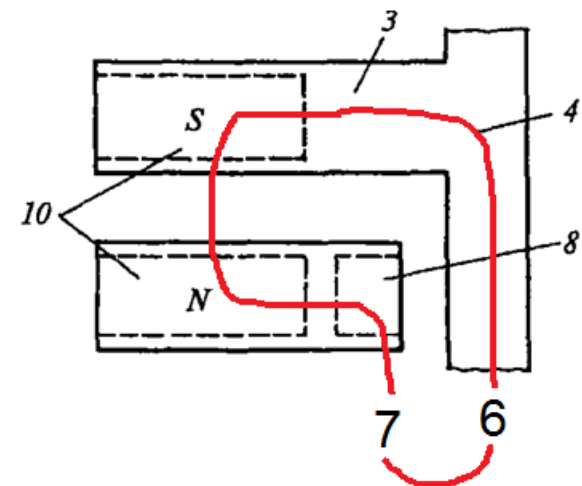
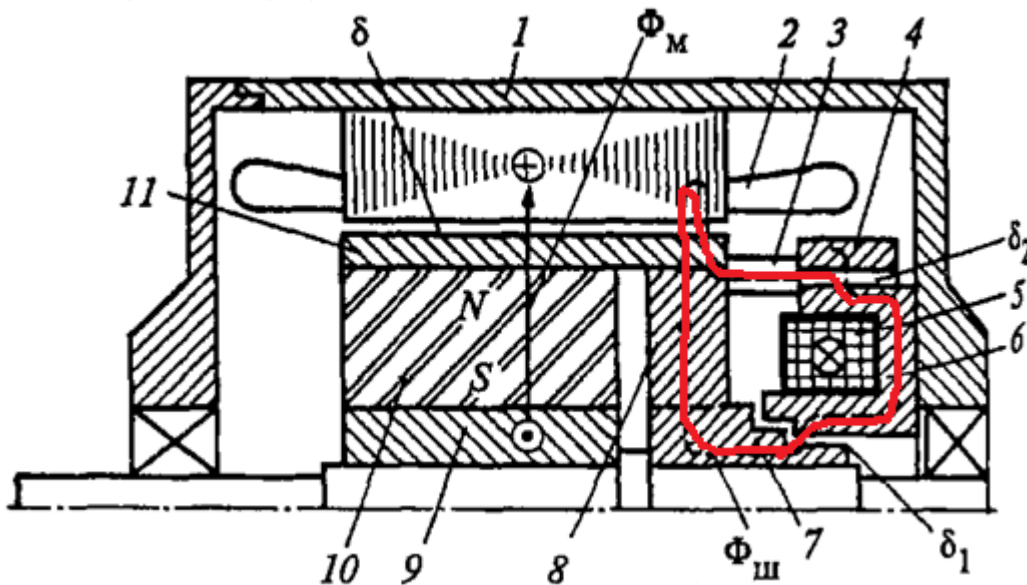
# 4. Бесконтактные генераторы с

## комбинированным возбуждением

2 пути замыкания потока: 1 – основной (от N 10 – 11 – возд. зазор – 1 – возд. зазор – 3 – S 10), 2 – шунтирующий (N 10 – 11 – 8 – 7 – 6 – 4 – 3 – S 10).

Т. о. поток в воздушном зазоре  $\Phi_{\delta} = \Phi_{M} - \Phi_{S} \pm \Phi_{Ш}$

$\Phi_M$  – поток от ПМ,  $\Phi_S$  – поток рассеяния,  $\Phi_{Ш}$  – поток шунтирующий





# 4. Бесконтактные генераторы с комбинированным возбуждением.

## Применение

Отечественной промышленностью разработаны генераторы серии СГК, используемые как магистральные в смешанных СЭС на борту Миг-23, Миг-27 и Су-24.



МиГ-23 1969 - 1985



МиГ-27 1973 - 1994



Су-24 1971 - 1993

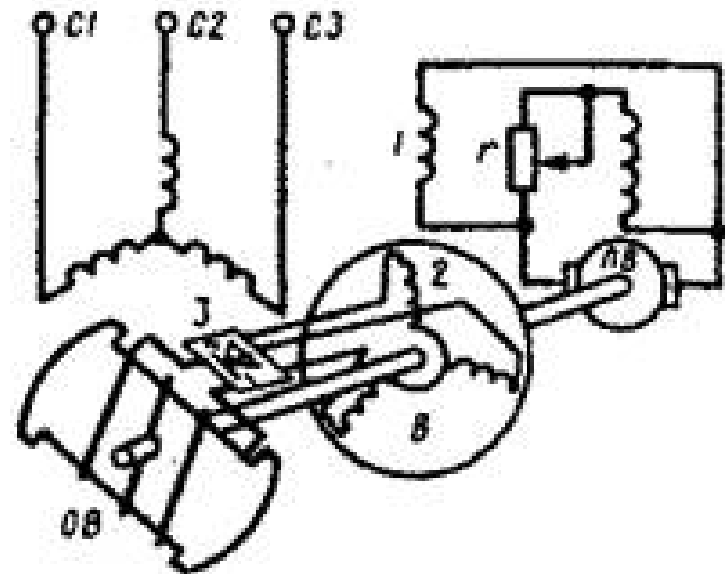
# 5. Бесконтактные генераторы с вращающимися выпрямителями

Основной элемент – обычная СМ, только питание ОВ происходит не через щеточный контакт, а от специального вращающегося выпрямителя.

В качестве возбудителя используется СГ, у которого ОЯ расположена на роторе а ПВ укреплен непосредственно на валу

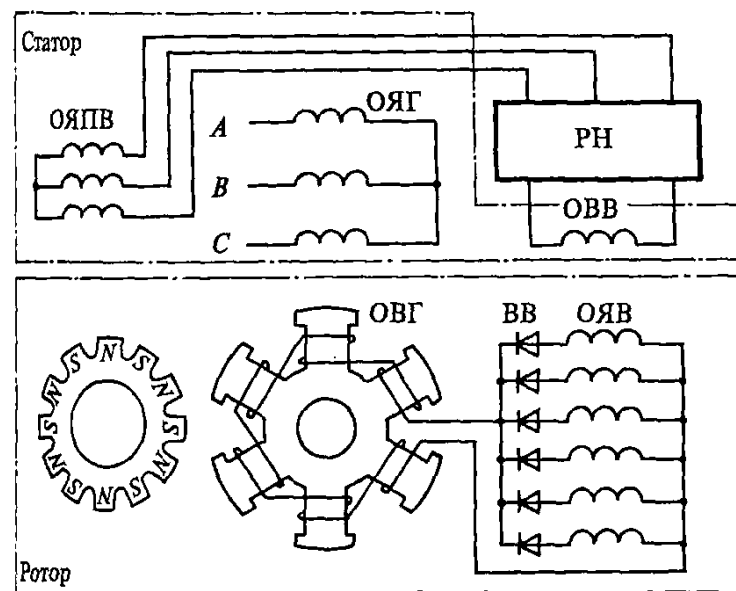
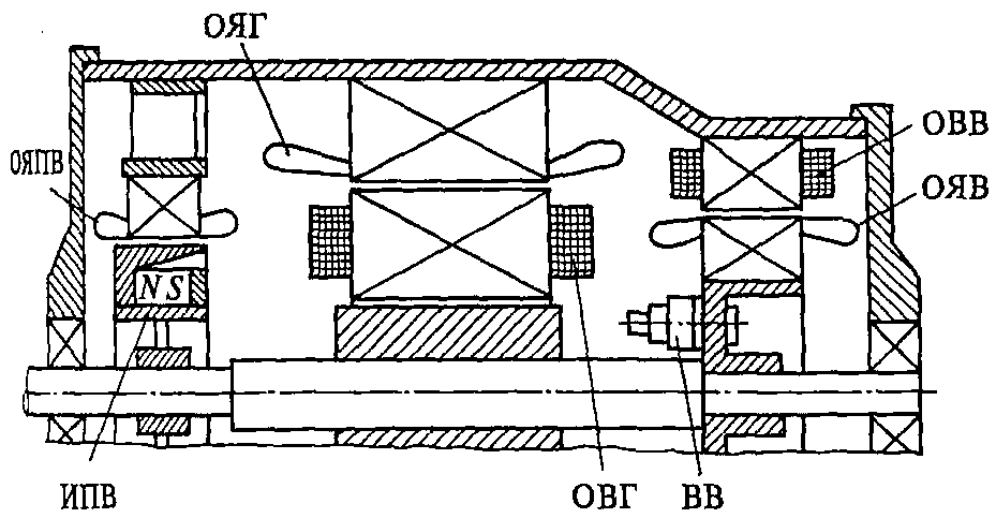
для питания ОВ СГ.

ОВ возбудителя получает питание от подвозбудителя – небольшого генератора с ПМ или генератора постоянного тока.



# 5. Бесконтактные генераторы с вращающимися выпрямителями

При вращении индуктора ПВ (подвозбудителя), связанного с авиадвигателем и приводом, в ОЯ ПВ индуцируется ЭДС, которая питает ОВ возбuditеля через РН (т.е. регулируемым выпрямленным током). Этот ток в ОВВ создает поток, в поле которого вращается ОЯВ. Индуцируемая в ней ЭДС выпрямляется с помощью выпрямительного блока ВВ и питает ОВ основного генератора.



# 5. Бесконтактные генераторы с вращающимися выпрямителями.

## Применение

Наилучшими удельными массогабаритными показателями и возможностями достижения требуемого качества эл. энергии обладают генераторы с вращающимися выпрямителями. Отечественной промышленностью генераторы серии ГТ выпускаются с 1960-х гг. и в наст. вр. Широко используются на самолетах и вертолетах в качестве основных, резервных и аварийных источников трехфазного тока.



Ил-96 1988 – наст. вр.



Ту-204 1990– наст. вр.



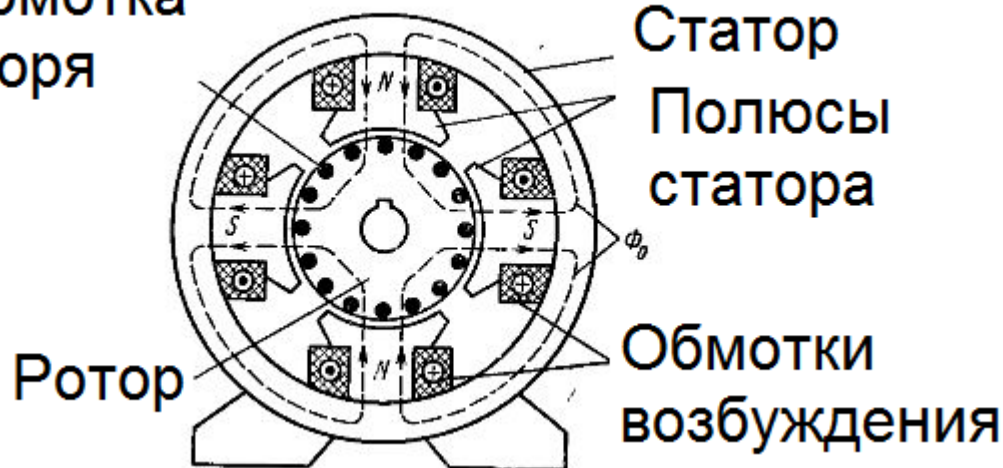
Су-35 2008 – наст. вр.<sup>28</sup>

# 6. Генераторы постоянного тока

Магнитная цепь ГПТ состоит из неподвижной части — статора и вращающейся части — ротора. На магнитные полюсы статора насаживается обмотка возбуждения, питаемая постоянным током и создающая основной магнитный поток  $\Phi_0$ . Ротор машины набирают из стальных штампованных листов. В пазы ротора закладывается рабочая обмотка машины постоянного тока — обмотка якоря, в которой основным магнитным потоком индуцируется э. д. с.

Главная особенность ГПТ - в способе съёма тока с катушек, который основан на том, что концы активных сторон ОЯ присоединяются к полукольцам с изолированными промежутками между ними.

Обмотка  
якоря



# 6. Генераторы постоянного тока. Применение



Ту 22М3 1971 - 1997



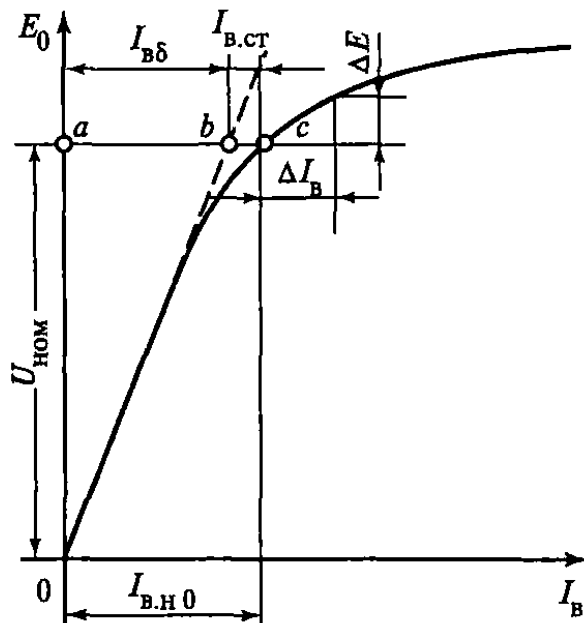
Ту 160 1984 – наст. вр.



Миг-31 1975 – 1994

# Характеристики авиационных генераторов

1. Характеристика хх  $E = U_0 = f(I_B)$  снимается при постоянной частоте вращения  $n = \text{const}$  и разомкнутой внешней цепи генератора. Хар-ка хх определяет магнитные свойства генератора (ЭДС пропорциональна магнитному потоку). Магнитные свойства генератора характеризуются коэффициентом насыщения магнитной цепи  $k_H$  и коэффициентом относительной крутизны  $k_\Gamma$ .



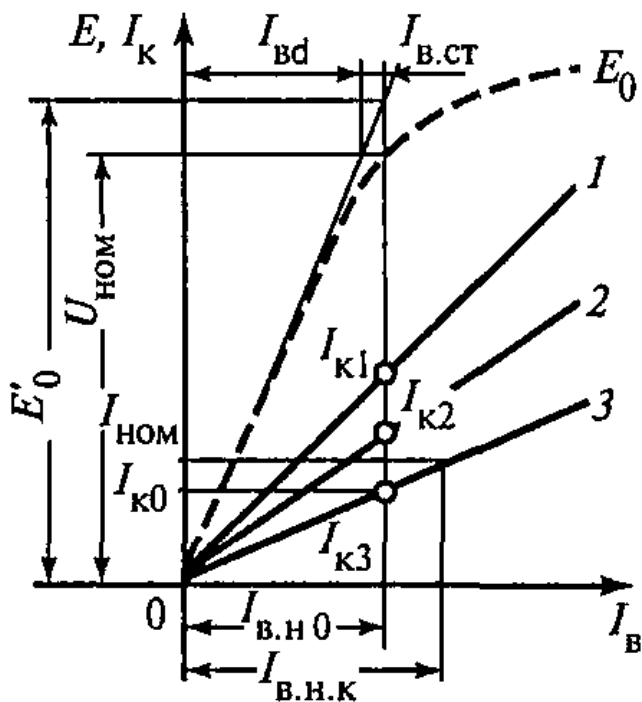
$$k_H = \frac{I_{B.H0}}{I_{B\delta}} = 1 + \frac{I_{B.ст}}{I_{B\delta}} \quad k_\Gamma = \frac{\Delta E}{E} \frac{\Delta I_B}{I_B}$$

$I_{B.H0}$  – ток возбуждения при номин-м напряжении генератора на хх;  $I_{B\delta}$ ,  $I_{B.ст}$  – токи возбуждения для проведения магнитного потока через воздушный зазор и магнитопровод генератора;  $\Delta E/E$ ,  $\Delta I_B/I_B$  – относит-е изменение напряжения и тока возбуждения.

# Характеристики авиационных генераторов

## 2. Характеристика КЗ

$I_K = f(I_B)$  смысл для генераторов с независимым возбуждением) и снимается при  $n = \text{const}$  и короткозамкнутых фазах  $U = 0$ . В этом режиме из-за сильной размагничивающей реакции якоря (нагрузка генератора – его обмотки со значительной индуктивностью) магнитная цепь не насыщена и хар-ка имеет вид прямой.



Токи генератора в зависимости от вида КЗ (одно-, двух- или трехфазное):

$$I_{K3} \approx \frac{E'_0}{x_d}; \quad \text{Наиболее опасное – однофазное КЗ}$$

$$I_{K2} \approx \frac{\sqrt{3}E'_0}{x_d + x_2}; \quad I_{K3} : I_{K2} : I_{K1} = 1 : (1,3 \div 1,5) : (2,2 \div 2,4)$$

$$I_{K1} \approx \frac{3E'_0}{x_d + x_2 + x_0}$$



# Характеристики авиационных генераторов

Из характеристика КЗ и ХХ можно определить отношение короткого замыкания (ОКЗ) – оказывает влияние на размеры генератора, его перегрузочную способность и степень устойчивости при параллельной работе.

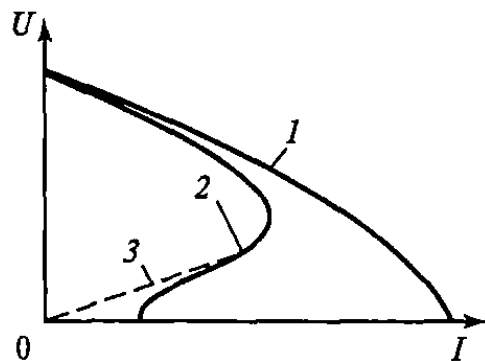
$$\text{ОКЗ} = \frac{I_{\text{к0}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{I_{\text{в.н.0}}}{I_{\text{в.н.к}}} = \frac{U_{\text{ном}}/x_d}{I_{\text{ном}}}$$

$I_{\text{к0}}$  – ток КЗ при токе возбуждения  $I_{\text{вн0}}$ ;  $I_{\text{ном}}$  – номинальный ток генератора;  $I_{\text{внк}}$  – ток возбуждения при КЗ и номинальном токе генератора.

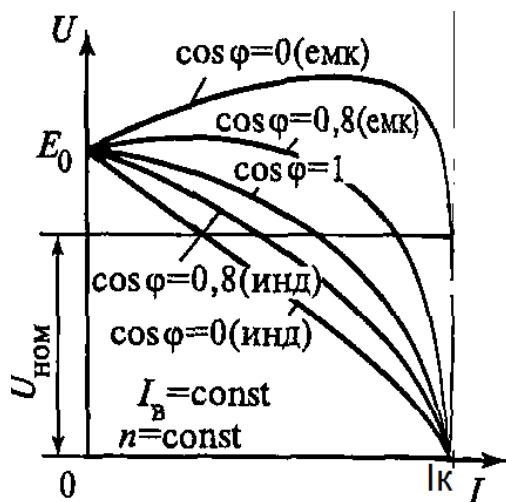
Генератор с большим значением ОКЗ имеет слабо падающую внешнюю характеристику и большие токи КЗ, обладает большой перегрузочной способностью и устойчивостью к параллельной работе генераторов.

# Характеристики авиационных генераторов

3. Внешняя характеристика – показывает, как меняется напряжение генератора при изменении нагрузки.



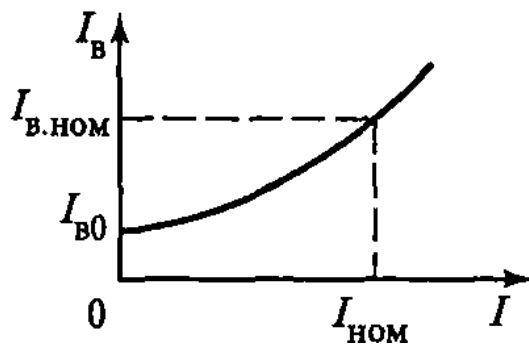
1 – хар-ка генератора постоянного тока независимого возбуждения, 2 – хар-ка генератора постоянного тока с параллельным возбуждением (наиболее часто встречается), 3 – хар-ка при КЗ генератора постоянного тока с параллельным возбуждением



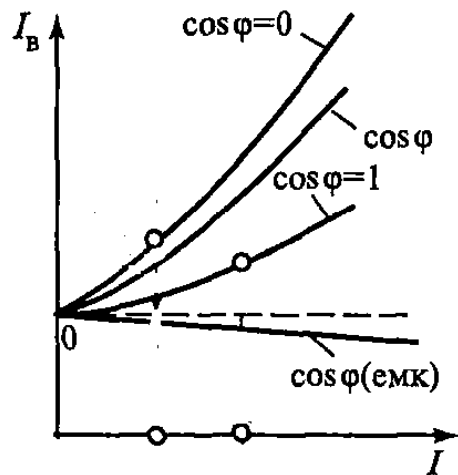
– внешняя хар-ка СГ переменного тока независимого возбуждения (при активной и активно-индуктивной нагрузке напряжение падает, при емкостной - увеличивается)

# Характеристики авиационных генераторов

4. Регулировочная характеристика – показывает, как при данной частоте вращения и заданном хар-ре нагрузки (в случае генератора переменного тока) следует менять ток ОВ, чтобы при изменении нагрузки напряжение генератора оставалось постоянным.



– хар-ка генератора постоянного тока – для него увеличение нагрузки сопровождается уменьшением напряжения на зажимах, значит, одновременно с током нагрузки нужно увеличивать ток возбуждения, чтобы поддерживать напряжение постоянным



– хар-ка генератора переменного тока – с возрастанием нагрузки при  $\varphi > 0$  (инд.) нужно увеличивать ток возбуждения, при  $\varphi < 0$  (емк.) – уменьшать.