

Тахогенераторы

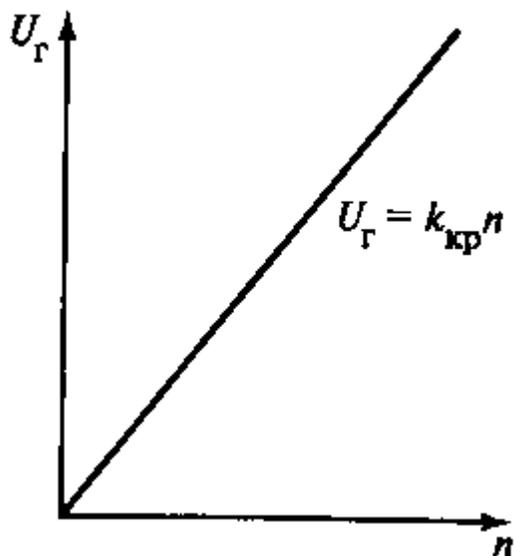
Информационные машины



Тахогенераторы

ТГ – преобразует вращение вала в выходное напряжение
(датчик частоты вращения)

Выходная характеристика ТГ – $U_{\Gamma} = f(n)$



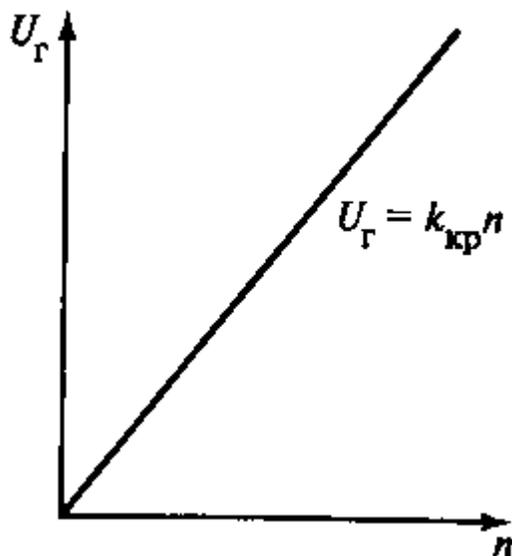
Общие требования к ТГ

- » высокая линейность выходной характеристики (идеальная характеристика – прямая $U_{\Gamma} = k_{кр} n$)
- » большая крутизна выходной характеристики $k_{кр} = U_{\Gamma}/n$
- » симметрия выходного напряжения $|U_{\Gamma}(+n)| = |U_{\Gamma}(-n)|$
- » минимальное остаточное напряжение $U_{\Gamma 0}$ при $n = 0$
- » минимальная зона нечувствительности n_{\min} при $U_{\Gamma} = 0$
- » максимальная выходная мощность при минимальной потребляемой мощности
- » минимальные пульсации выходного напряжения
- » малые J ротора и собственный момент сопротивления
- » стабильность выходной характеристики при изменении окружающих условий
- » малые габариты и масса

Тахогенераторы

ТГ – преобразует вращение вала в выходное напряжение
(датчик частоты вращения)

Выходная характеристика ТГ – $U_{\Gamma} = f(n)$



Специфические требования

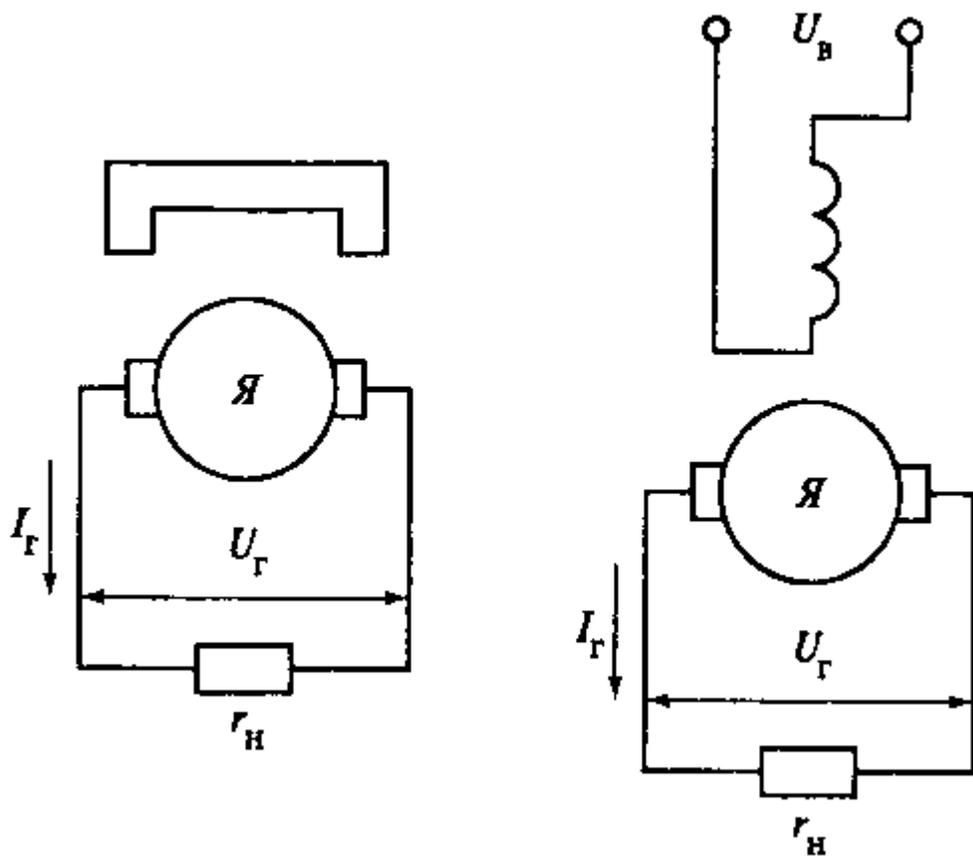
- » Для осуществления обратной связи по скорости (для демпфирования колебаний скорости)
 - большая крутизна выходной характеристики
 - большая мощность выходного сигнала
 - (линейность характеристики необязательна)
- » Для выполнения дифференцирования / интегрирования
 - большая линейность выходной характеристики
 - высокая точность
 - стабильность характеристик
 - (крутизна характеристики, выходная мощность не важны)

$$U_{\Gamma} = k'_{кр} \frac{d\alpha}{dt} \quad \text{где} \quad k'_{кр} = \frac{2\pi}{60} k_{кр}$$
$$\alpha = \frac{1}{k'_{кр}} \int U_{\Gamma}(t) dt$$

Тахогенераторы постоянного тока (ТГПТ)

Тахогенераторы постоянного тока

ТГПТ – генераторы постоянного тока с магнитоэлектрическим / независимым возбуждением



Конструкция аналогична ИДПТ малой мощности

Для уменьшения влияния реакции якоря:

- » ненасыщенный сердечник
→ увеличение габаритов
- » сильно насыщенный сердечник
→ увеличение тока возбуждения
→ более дорогие магниты

Тахогенераторы постоянного тока

Выходная характеристика тахогенератора $U_r = f(n)$ при $r_H = \text{const}$

Напряжение генератора постоянного тока

$$U_r = E_r - I_r r_r - \Delta U_{щ}$$

ЭДС якоря $E_r = c_e \Phi n$

Ток якоря $I_r = \frac{U_r}{r_H}$

Тогда уравнение выходной характеристики

$$U_r = \frac{c_e \Phi n - \Delta U_{щ}}{1 + \frac{r_r}{r_H}}$$

Пренебрегая падением напряжения на щетках

$$U_r = \frac{c_e \Phi n}{1 + \frac{r_r}{r_H}}$$

При постоянном потоке ($I_B = \text{const}$ или ПМ) и неизменных сопротивлений

$$U_r = k_{кр} n$$

– идеальная выходная характеристика ТГ

где $k_{кр} = \frac{c_e \Phi}{1 + \frac{r_r}{r_H}}$ – крутизна выходной характеристики

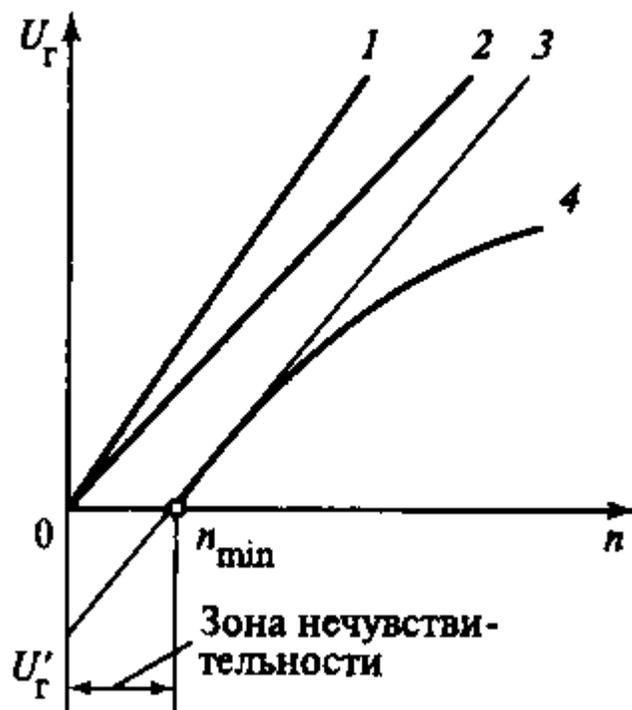
Тахогенераторы постоянного тока

Выходная характеристика тахогенератора

$U_{\Gamma} = f(n)$ при $r_{\text{H}} = \text{const}$

$$U_{\Gamma} = k_{\text{кр}} n$$

где $k_{\text{кр}} = \frac{c_e \Phi}{1 + \frac{r_{\Gamma}}{r_{\text{H}}}}$



- » Наибольшая крутизна характеристики — при холостом ходе ($r_{\text{H}} = \infty$)
 - прямая 1
- » При увеличении нагрузки — уменьшается крутизна
 - прямая 2

В современных ТГ
крутизна выходной характеристики
— от 3 до 100 мВ на об/мин

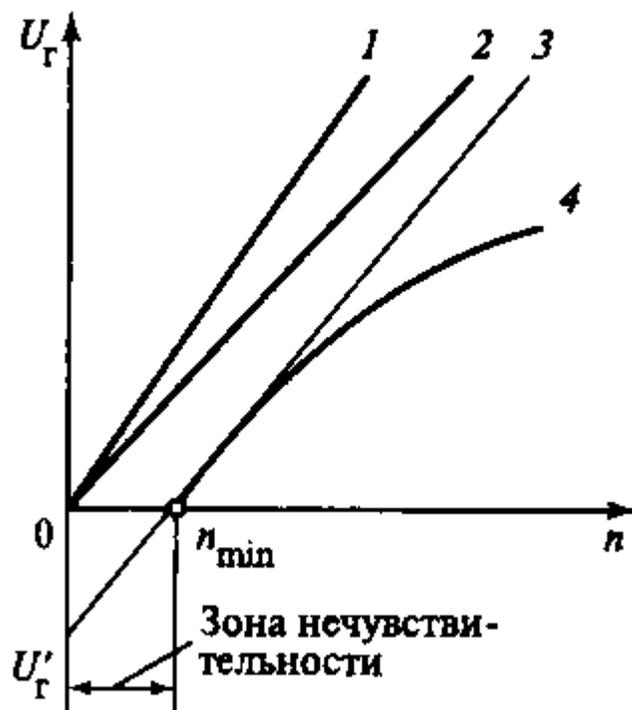
Тахогенераторы постоянного тока

Выходная характеристика тахогенератора

$U_{\Gamma} = f(n)$ при $r_{\text{H}} = \text{const}$

$$U_{\Gamma} = k_{\text{кр}} n$$

где $k_{\text{кр}} = \frac{c_e \Phi}{1 + \frac{r_{\Gamma}}{r_{\text{H}}}}$



» Если принять во внимание $\Delta U_{\text{щ}}$, характеристика сместится вниз на

$$U'_{\Gamma} = -\frac{\Delta U_{\text{щ}}}{1 + \frac{r_{\Gamma}}{r_{\text{H}}}}$$

- прямая 3

появляется зона нечувствительности:

от 0 до n_{min} выходное напряжение ТГ $U_{\Gamma} = 0$

где $n_{\text{min}} = \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{c_e \Phi} = \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{k_{\text{кр}m}}$

Наличие зоны нечувствительности – большой недостаток ТГПТ

Для уменьшения зоны нечувствительности

- » качественные щетки с малым $\Delta U_{\text{щ}}$
 - медно-графитовые / серебряно-графитовые
 - проволочные щетки с покрытием из серебра, золота, платины

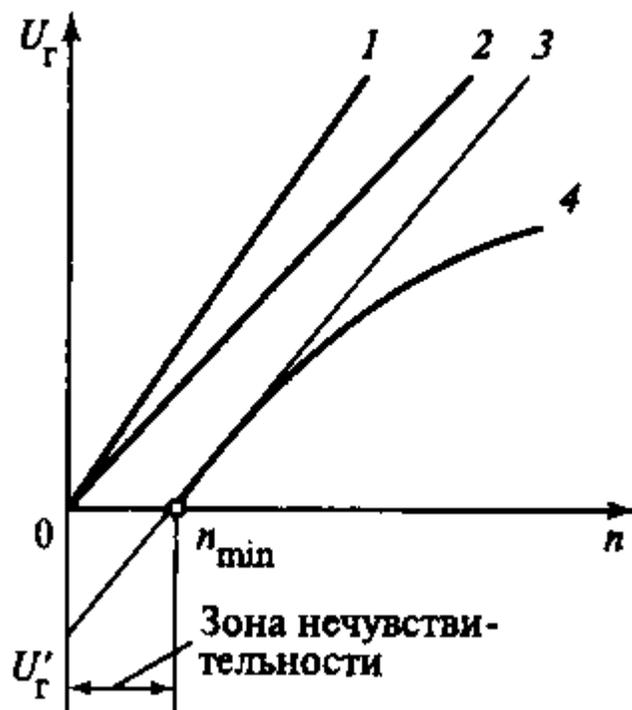
Тахогенераторы постоянного тока

Выходная характеристика тахогенератора

$U_{\Gamma} = f(n)$ при $r_{\text{H}} = \text{const}$

$$U_{\Gamma} = k_{\text{кр}} n$$

где $k_{\text{кр}} = \frac{c_e \Phi}{1 + \frac{r_{\Gamma}}{r_{\text{H}}}}$



- » При больших нагрузках (малое $r_{\text{H}} \rightarrow$ большой ток $I_{\Gamma} = U_{\Gamma}/r_{\text{H}}$) и больших скоростях (большая $n \rightarrow$ ЭДС $E_{\Gamma} \rightarrow U_{\Gamma} \rightarrow I_{\Gamma}$) проявляется размагничивающее действие реакции якоря
 - кривая 4 — нелинейная характеристика

Для борьбы с нелинейностью:

- » ненасыщенная магнитная система — работа на линейном участке кривой намагничивания
 - увеличенный объем стали
- » сильно насыщенная магнитная система — изменение МДС слабо влияет на полный поток Φ
 - повышенный I_{B} или объем ПМ

Погрешности ТГ постоянного тока

Основная погрешность ТГ

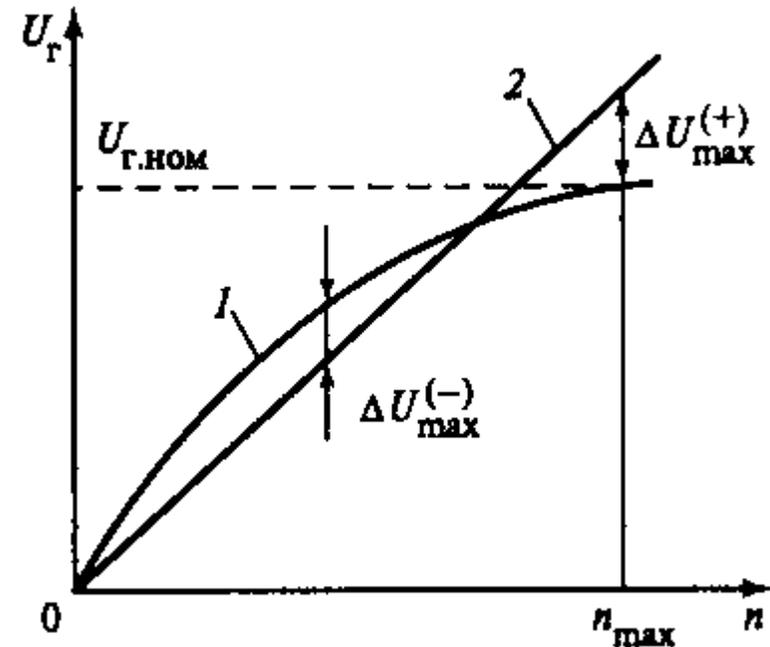
– отклонение реальной характеристики (1)
от калибровочной прямой (2)

Нелинейность
$$H_{\Gamma} = \frac{\Delta U_{\max}^{(+)} + \Delta U_{\max}^{(-)}}{2U_{\Gamma.\text{НОМ}}} \cdot 100\%$$

где $U_{\Gamma.\text{НОМ}} = U_{\Gamma.\text{МАХ}}$, $n_{\text{НОМ}} = n_{\text{МАХ}}$

Классы точности

- » I класс точности – $H_{\Gamma} \leq \pm 0,02\%$
- » ...
- » VII класс точности – $H_{\Gamma} \leq \pm 2,5\%$



Погрешности ТГ постоянного тока

Температурная погрешность

Изменение температуры → изменение I_B → изменение Φ_B → изменение $k_{кр}$
→ отклонение характеристики от калибровочной прямой

Изменение $r_я$ не учитывают, т.к. величина $r_я$ мала и слабо влияет на характеристику

Для устранения температурной погрешности:

- » Стабилизация тока возбуждения I_B
 - терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления в цепи ОВ
 - большое добавочное сопротивление $R_{доб}$ в цепи ОВ
- » Стабилизация потока возбуждения Φ_B
 - сильно насыщенная магнитная цепь

ТГПТ с постоянными магнитами
имеют малую температурную погрешность

Количественная оценка температурной погрешности:

Температурный коэффициент выходного напряжения

– относительное изменение U_r при изменении температуры на 1°

- » в ТГ с электромагнитным возбуждением – 0,42...0,83%
- » в ТГ с магнитоэлектрическим возбуждением – 0,01...0,13%

Погрешности ТГ постоянного тока

Погрешность асимметрии

– асимметрия выходного напряжения при реверсе
(причина – в неточной установке щеток)

Величина погрешности $A_r = \frac{U_{\Gamma(+n)} - U_{\Gamma(-n)}}{(U_{\Gamma(+n)} + U_{\Gamma(-n)}) / 2} \cdot 100\%$

Здесь $U_{\Gamma(+n)}$ и $U_{\Gamma(-n)}$ – величина U_{Γ} при вращении с одинаковой n в разных направлениях
(при номинальной скорости)

Погрешность асимметрии не превышает 2%

Погрешности ТГ постоянного тока

Пульсации выходного напряжения

– изменение U_{Γ} из-за изменения магнитного потока

Коэффициент пульсаций $k_{\text{пуль}} = \frac{U_{\Gamma \text{ max}} - U_{\Gamma \text{ min}}}{U_{\Gamma \text{ ср}}} \cdot 100\%$

Пульсации выходного напряжения – 0,1...1%

Якорные пульсации – вызваны изменениями потока $\Phi_{\text{в}}$

- » неравномерность зазора
- » несоосность статора и ротора
- » анизотропия магнитных свойств стали ротора

Диагностика: частота якорных пульсаций $f_{\text{я}} = n/30$ (n – частота вращения якоря)

Для снижения якорных пульсаций:

- » увеличенный воздушный зазор
- » повышение класса точности при механической обработке
- » веерная сборка пакета стали ротора

Погрешности ТГ постоянного тока

Пульсации выходного напряжения

– изменение U_{Γ} из-за изменения магнитного потока

Коэффициент пульсаций $k_{\text{пуль}} = \frac{U_{\Gamma \text{ max}} - U_{\Gamma \text{ min}}}{U_{\Gamma \text{ ср}}} \cdot 100\%$

Пульсации выходного напряжения – 0,1...1%

Зубцовые пульсации – вызваны изменениями магнитной проводимости зазора

» зубчатость якоря

Диагностика: частота зубцовых пульсаций $f_z = Z_{\text{я}} n / 60$ ($Z_{\text{я}}$ – число зубцов якоря)

Для снижения зубцовых пульсаций:

- » скос пазов якоря
- » оптимизация размеров полюсов и пазов
- » магнитные клинья в пазах
- » применение полого немагнитного якоря

Погрешности ТГ постоянного тока

Пульсации выходного напряжения

– изменение U_{Γ} из-за изменения магнитного потока

Коэффициент пульсаций $k_{\text{пул}} = \frac{U_{\Gamma \text{ max}} - U_{\Gamma \text{ min}}}{U_{\Gamma \text{ ср}}} \cdot 100\%$

Пульсации выходного напряжения – 0,1...1%

Коллекторные пульсации – вызваны вибрацией щеток и колебаниями тока

- » неровности коллектора
- » эллиптичность коллектора
- » периодическое изменение числа секций в параллельных ветвях якоря
- » добавочные коммутационные токи

Диагностика: частота коллекторных пульсаций $f_{\text{к}} = N_{\text{к}}n/60$ ($N_{\text{к}}$ – число коллекторных пластин)

Для снижения коллекторных пульсаций:

- » правильный выбор числа коллекторных пластин
- » правильный выбор ширины щеток
- » улучшение качества щеток, щеткодержателей
- » повышение класса обработки коллектора
- » применение сглаживающих фильтров

Достоинства и недостатки ТГ постоянного тока

Недостатки ТГ постоянного тока

- » наличие щеточно-коллекторного узла
 - зона нечувствительности при малых n
 - несимметрия выходной характеристики
 - нестабильность выходной характеристики
 - пульсации выходного напряжения
 - излучение радиопомех

Достоинства ТГ постоянного тока

- » малые габариты и масса
- » большая выходная мощность
- » отсутствие необходимости в источнике питания (при магнитоэлектрическом возбуждении)

Асинхронные тахогенераторы

Асинхронные тахогенераторы

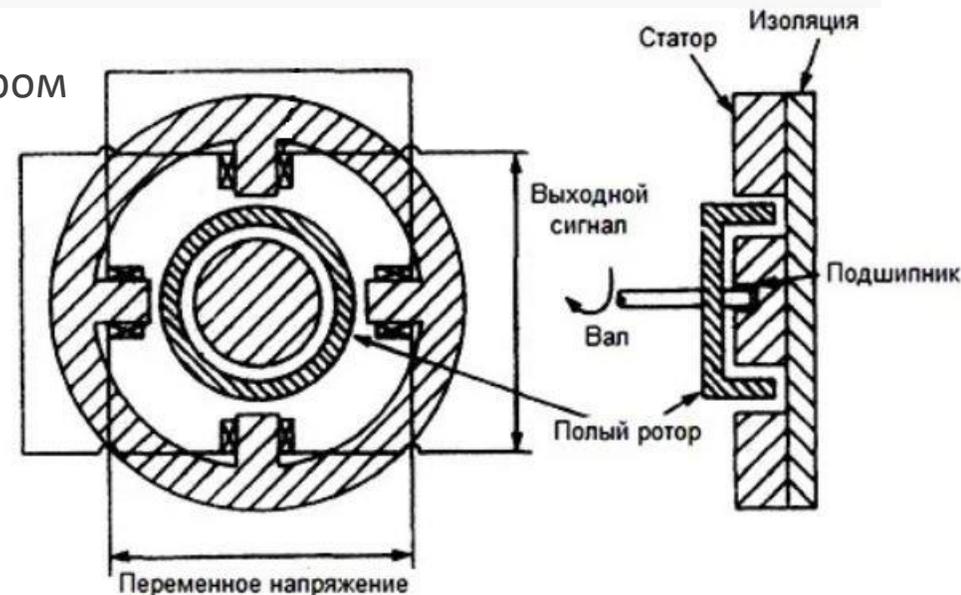
Конструкция аналогична двухфазному АИД с полым немагнитным ротором

- » две обмотки на статоре, сдвинутые на $\pi/2$
- » Обмотка возбуждения – постоянно подключена к сети
- » Обмотка генераторная – выдает напряжение (выходной сигнал)

Возможные исполнения

- » 2 обмотки на внешнем статоре
- » 2 обмотки на внутреннем статоре
- » одна на внешнем, другая на внутреннем статоре

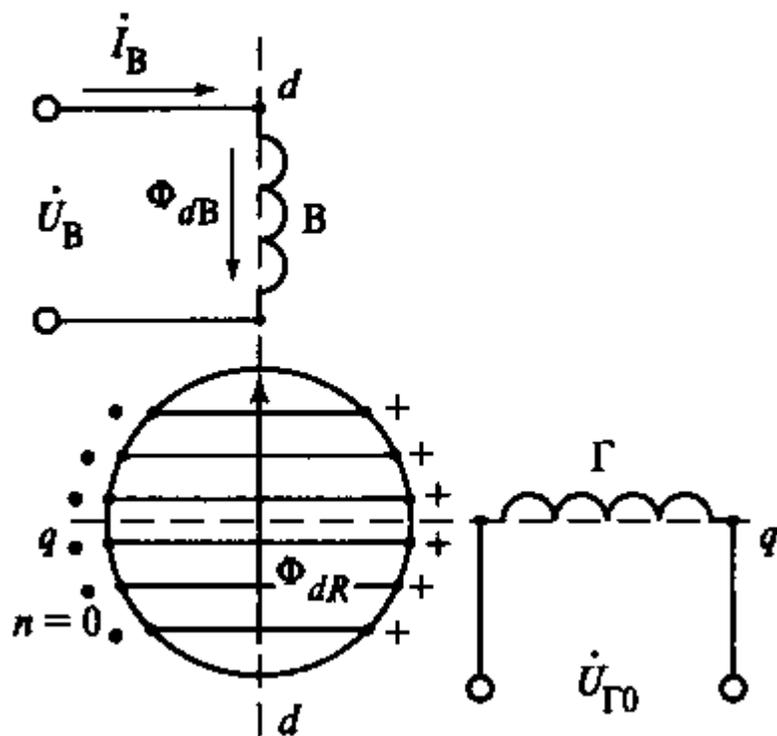
Ротор изготавливают из материала с большим ρ (манганин, константан, фосфористая или марганцовистая бронза) – снижает амплитудную и температурную погрешности



Применяют многополюсные конструкции ($2p \geq 4$) для уменьшения влияния магнитной асимметрии

Асинхронные тахогенераторы

Принцип действия



При неподвижном роторе

Переменное напряжение питания U_B

→ пульсирующий поток возбуждения Φ_{dB} (по оси d)

→ трансформаторная ЭДС в роторе (по оси d)

→ токи в роторе (+/-) (по оси d)

→ пульсирующий поток ротора Φ_{dR} (по оси d)

Генераторная обмотка расположена по оси q

→ в ней ЭДС равна 0

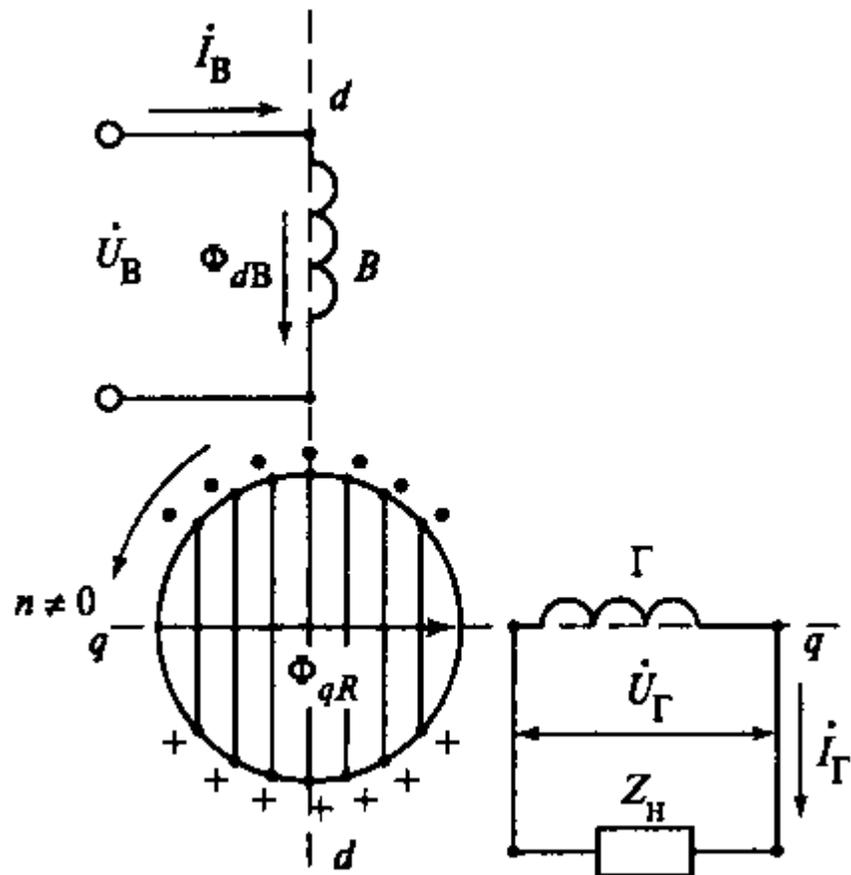
В реальности там можно обнаружить

нулевое / остаточное напряжение $U_{\Gamma 0}$

(погрешность из-за магнитной несимметрии)

Асинхронные тахогенераторы

Принцип действия



При вращении ротора

Поток возбуждения Φ_{dB} наводит в роторе еще и ЭДС вращения $E_{врR}$

» величина ЭДС вращения пропорциональна $\Phi_{dB} \cdot n$

» ЭДС вращения направлена по оси q

→ токи в роторе (+/-) (по оси q)

→ пульсирующий поток ротора Φ_{qR} (по оси q)

→ ЭДС в генераторной обмотке E_Γ

» Частота ЭДС E_Γ равна частоте сети

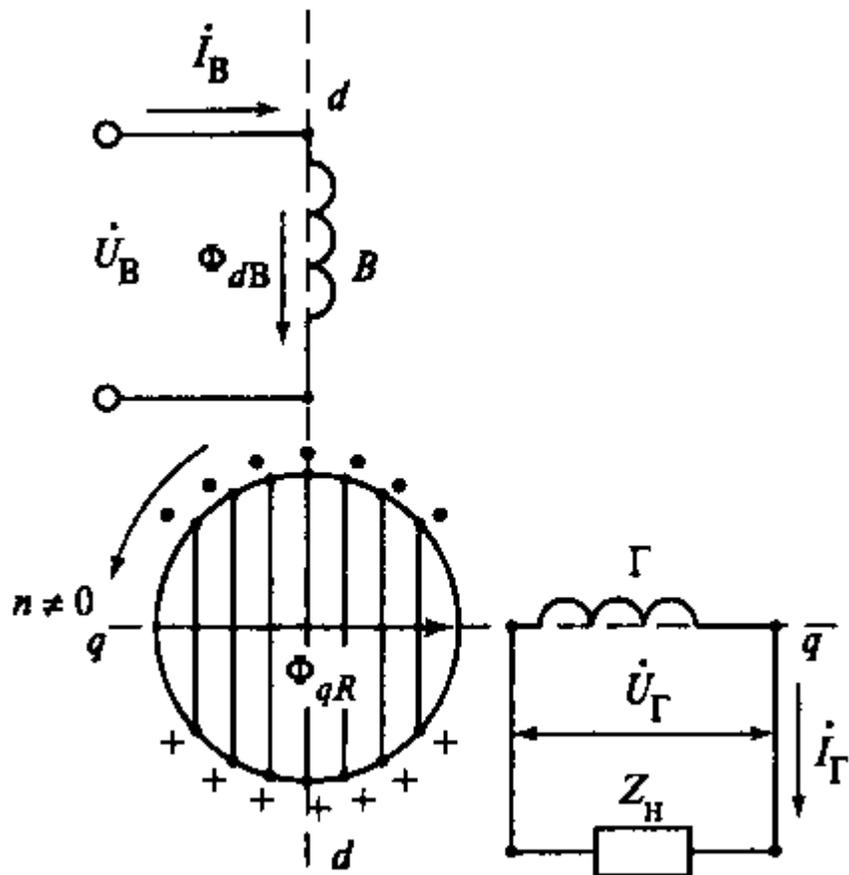
(как и частота I_B , Φ_{dB} , $E_{врR}$, Φ_{qR})

» Величина ЭДС E_Γ пропорциональна n

($E_\Gamma \sim \Phi_{qR} \sim F_{qR} \sim I_{qR} \sim E_{врR} \sim n$)

Асинхронные тахогенераторы

Выходная характеристика ТГ



При подключении нагрузки (измерительной цепи)

Напряжение на зажимах генераторной обмотки

$$\dot{U}_\Gamma = \dot{E}_\Gamma - \dot{I}_\Gamma Z_\Gamma$$

в то же время $\dot{U}_\Gamma = \dot{I}_\Gamma Z_H$

Токи обмоток найдем по методу симметричных составляющих

- » главная обмотка (A) – обмотка возбуждения
- » вторая обмотка (B) не имеет источника напряжения
- » параметры второй обмотки Γ приведены к обмотке B

$$Z_{\Gamma 1} = k^2 Z_{B1} + Z_H \quad Z_{\Gamma 2} = k^2 Z_{B2} + Z_H$$

Здесь k – эффективный коэффициент трансформации $k = \frac{W_B}{W_A} = \frac{W_\Gamma}{W_B}$

Асинхронные тахогенераторы

Выходная характеристика ТГ

Составляющие токов обмотки возбуждения

$$\dot{i}_{B1} = \dot{U}_B \frac{k^2 Z_{B2} + Z_H}{2k^2 Z_{B1} Z_{B2} + Z_H (Z_{B1} + Z_{B2})}$$

$$\dot{i}_{B2} = \dot{U}_B \frac{k^2 Z_{B1} + Z_H}{2k^2 Z_{B1} Z_{B2} + Z_H (Z_{B1} + Z_{B2})}$$

Полный ток генераторной обмотки $\dot{i}_r = \dot{i}_{r1} + \dot{i}_{r2} = j \frac{\dot{i}_{B1}}{k} - j \frac{\dot{i}_{B2}}{k}$

Выходное напряжение

$$\dot{U}_r = \dot{i}_r Z_H = -j \dot{U}_B \frac{k Z_H (Z_{B1} - Z_{B2})}{2k^2 Z_{B1} Z_{B2} + Z_H (Z_{B1} + Z_{B2})}$$

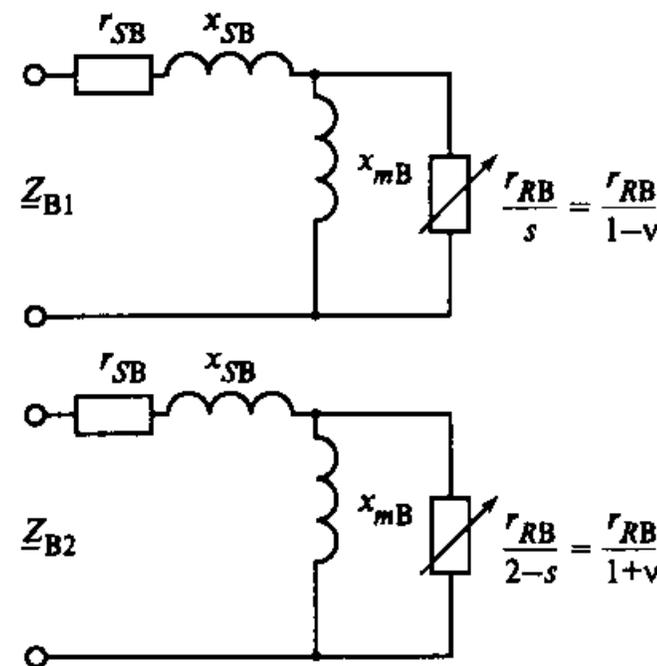
Параметры обмоток – по схеме замещения

Здесь нет x_{RB} , т.к. индуктивное сопротивление рассеяния полого ротора пренебрежимо мало

Можно выразить полное сопротивление

$$Z_{B1} = Z_{SB} + \frac{jx_{mB} r_{RB} / (1-v)}{jx_{mB} + r_{RB} / (1-v)} \quad Z_{B2} = Z_{SB} + \frac{jx_{mB} r_{RB} / (1+v)}{jx_{mB} + r_{RB} / (1+v)}$$

Z_B явно зависит от скольжения s
(или относительной скорости $v = n/n_c$)



Асинхронные тахогенераторы

Выходная характеристика ТГ

Очевидно, что выходное напряжение зависит от относительной скорости v

Для идеального ТГ (учитывая только R ротора) $Z_{B1} = \frac{r_{RB}}{1-v}$ $Z_{B2} = \frac{r_{RB}}{1+v}$

получаем $\dot{U}_r = \frac{-j\dot{U}_B Z_H v}{k^2 r_{RB} + Z_H}$ – это выходная характеристика идеального АТГ $U_r = f(v)$ при $Z_H = \text{const}$

Характеристика идеального АТГ линейна

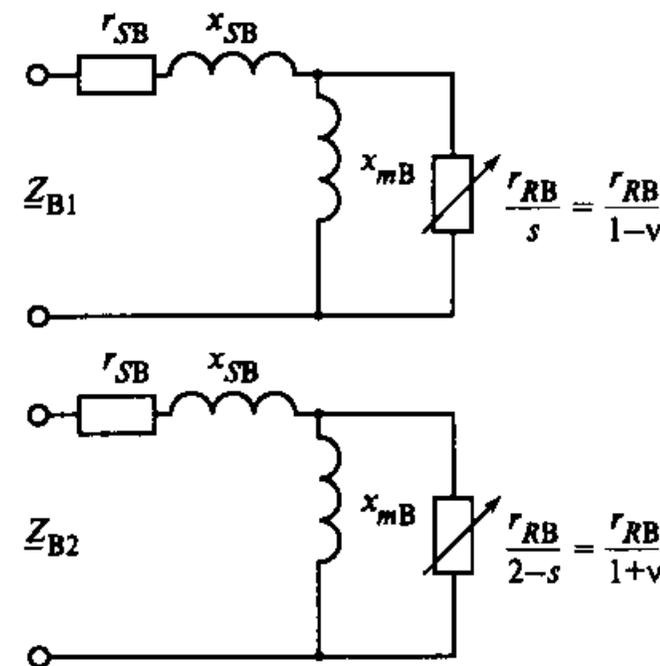
Для реального ТГ (учитывая все параметры схемы замещения)

$$\dot{U}_r = \frac{-jk\dot{U}_B v}{A - Bv^2} \quad \text{где} \quad A = \frac{k^2}{Z_H} \left(\frac{Z_{SB}^2 C}{r_{RB}} + 2Z_{SB} C + r_{RB} \right) + \frac{Z_{SB} C^2}{r_{RB}} + C$$

$$B = \frac{k^2 Z_{SB}^2}{Z_H r_{RB}} + \frac{Z_{SB}}{r_{RB}}$$

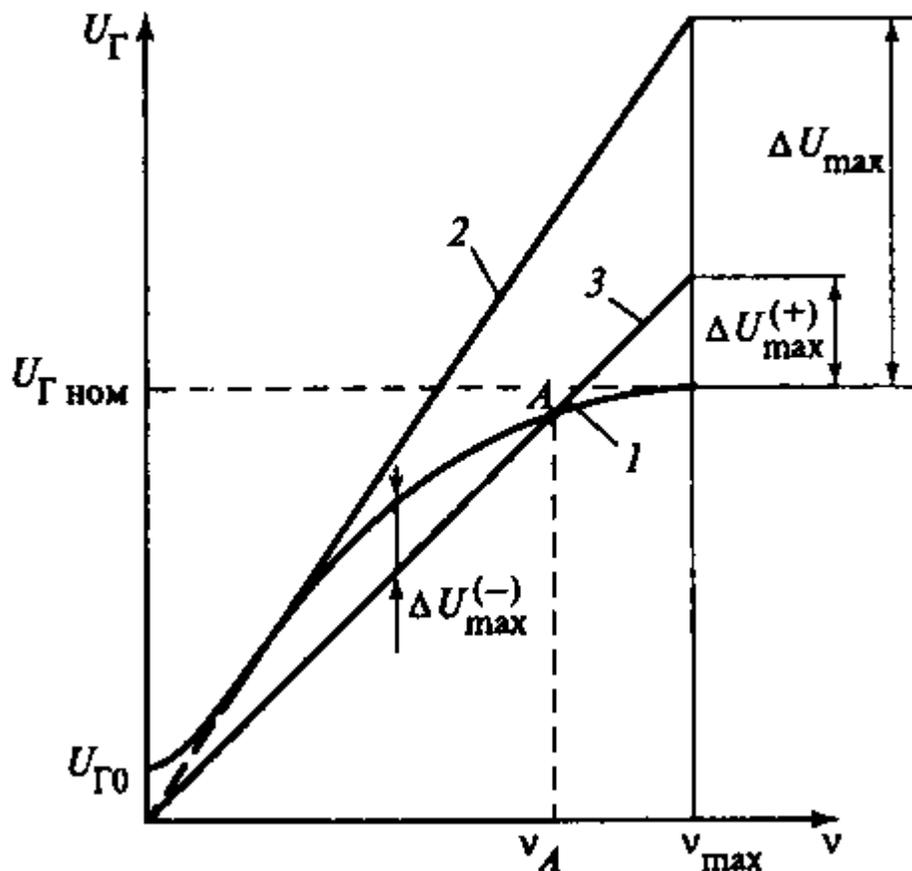
$$C = \frac{jx_{mB} + r_{RB}}{jx_{mB}}$$

Характеристика реального АТГ нелинейна (из-за Bv^2)



Асинхронные тахогенераторы

Выходная характеристика ТГ



- 1 – реальная характеристика
- 2 – идеальная характеристика
- 3 – калибровочная прямая

$$\dot{U}_Г = \frac{-jk\dot{U}_B v}{A - Bv^2}$$

- » Номинальное выходное напряжение $U_{Гном}$ – при v_{max}
- » Нулевое / остаточное напряжение $U_{Г0}$
- » Нелинейность – отклонение от калибровочной прямой ΔU

Крутизна выходной характеристики $k_{кр} = \frac{\Delta U_Г}{\Delta n}$

Способы увеличения крутизны

- » больше Φ_{dB} → больше ЭДС и ток ротора → больше Φ_{qR} → больше $U_Г$ → больше $k_{кр}$ (но возможно насыщение стали)
- » меньше r_R и больше $w_Г$ → больше ток ротора и Φ_{qR} → больше $U_Г$ → больше $k_{кр}$ (но больше нелинейность)

Современные асинхронные ТГ

- » высокоточные ТГ счетно-решающих устройств
 - $k_{кр} = 1 \dots 3$ мВ/(об/мин)
- » ТГ следящих систем
 - $k_{кр} = 6 \dots 10$ мВ/(об/мин)

Асинхронный тахогенератор при возбуждении постоянным током

Поток возбуждения Φ_{dB} остается постоянным ($f = 0$)

При вращении ротора со скоростью n

- » в роторе наводится постоянная ЭДС вращения $E_{врR}$ ($f = 0$),
величина которой пропорциональна $\Phi_{dB} \cdot n$
- » ток ротора и поток Φ_{qR} также постоянны ($f = 0$)
- » ЭДС в генераторной обмотке отсутствует

$$e_r = -w_r \frac{d\Phi_{qR}}{dt} = 0$$

При изменении скорости ротора (мгновенного значения n)

- » изменяется ток ротора и поток Φ_{qR}
- » в генераторной обмотке наводится ЭДС

$$e_r = -w_r \frac{d\Phi_{qR}}{dt} \sim \frac{dn}{dt}$$

Так как n пропорциональна $d\alpha/dt$,
то ЭДС E_r пропорциональна второй производной
углового положения ротора α ,
т.е. ускорению

$$E_r = k' \left(\frac{dn}{dt} \right) = k'' \left(\frac{d^2\alpha}{dt^2} \right)$$

Асинхронный ТГ при этом
→ датчик ускорения

Погрешности асинхронных ТГ

Основные причины погрешностей в ТГ

- » отклонение реальных характеристик от идеальных
- » технологические неточности изготовления
- » изменение условий эксплуатации (температура, частота сети)
- » конструктивные ограничения (нелинейность μ , высшие гармоники, ...)

Величина погрешности

Амплитудная погрешность

– максимальная разность реального выходного напряжения и калибровочного значения

$$\Delta U = \frac{|\dot{U}_{\Gamma} - \dot{U}_{\Gamma к}|}{|\dot{U}_{\Gamma ном}|} \cdot 100\%$$

Фазовая погрешность

– наибольшая разность фаз U_{Γ} при номинальной скорости и минимальной скорости

$$\Delta \varphi = \varphi_{n ном} - \varphi_{n min}$$

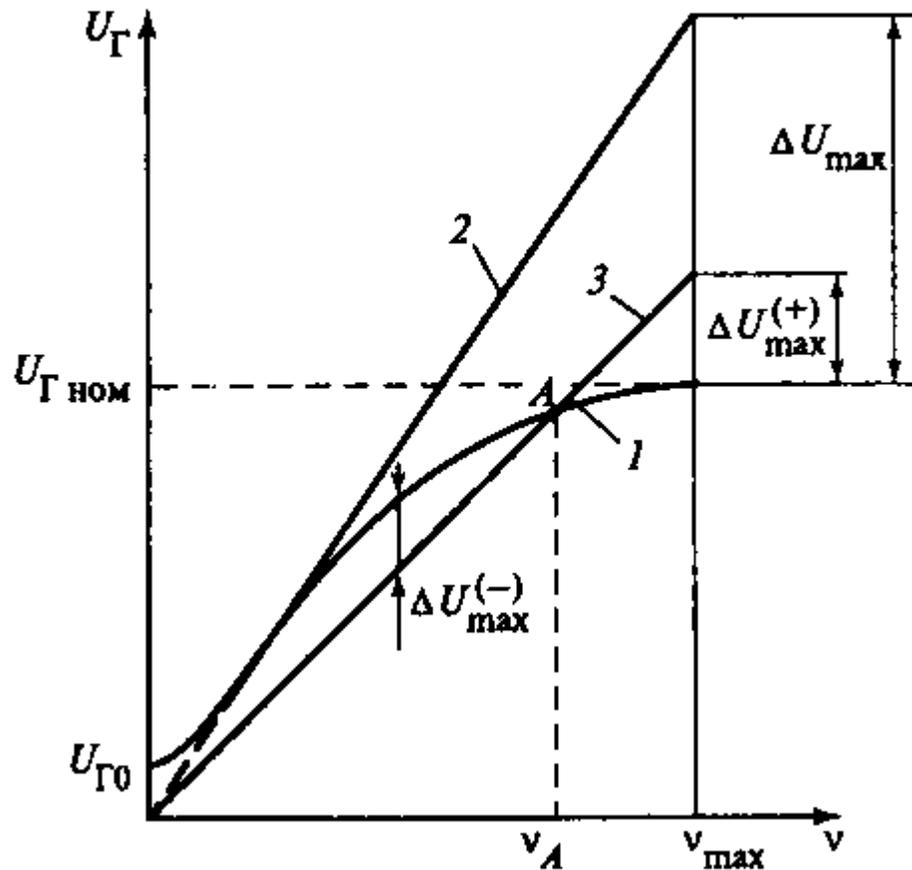
В зависимости от влияющих факторов погрешности подразделяют на

- » скоростные ΔU_v и $\Delta \varphi_v$
- » температурные ΔU_t и $\Delta \varphi_t$
- » частотные ΔU_f и $\Delta \varphi_f$

Погрешности асинхронных ТГ

Скоростные погрешности

– связаны с изменением скорости вращения ротора



Величина погрешности зависит от правильного выбора калибровочной прямой

» прямая 2 – вдоль начального линейного участка

» прямая 3 – через точку А, где $v_A = \frac{\sqrt{3}}{2} v_{\text{ном}}$

Погрешность реальной кривой относительно прямой 3 меньше, чем относительно прямой 2

Погрешности асинхронных ТГ

Скоростные погрешности

– тем меньше, чем меньше Bv^2

$$\dot{U}_r = \frac{-jk\dot{U}_B v}{A - Bv^2}$$

Для снижения относительной скорости $v = \frac{n}{n_c} = \frac{pn}{60f}$

» можно уменьшить p

- p не делают меньше 2 (для снижения влияния несимметрии)

» можно увеличить f

- применяют $f = 500 \dots 1000$ Гц, тогда $v = 0,2 \dots 0,5$

Для снижения комплексного коэффициента

$$B = \frac{k^2 Z_{SB}^2}{Z_H r_{RB}} + \frac{Z_{SB}}{r_{RB}}$$

» можно уменьшить k

- тогда снизится крутизна характеристики (нежелательно)

» можно уменьшить Z_{SB} (в основном, пазовое рассеяние)

- придется увеличить габариты (нежелательно)

» в высокоточных ТГ увеличивают r_{RB} (материалы с высоким ρ)

- при этом снижается крутизна и выходная мощность

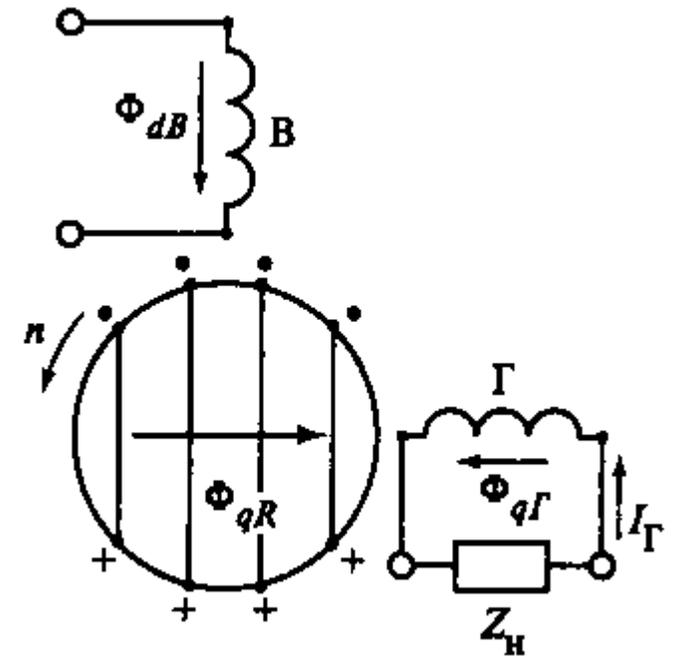
» желательно использовать нагрузку с большим Z_H

- от характера нагрузки зависит соотношение амплитудной и фазовой погрешностей (при RC -нагрузке снижается ΔU , растет $\Delta\varphi$; при RL -нагрузке снижается $\Delta\varphi$, растет ΔU)

Погрешности асинхронных ТГ

Скоростные погрешности – причины возникновения

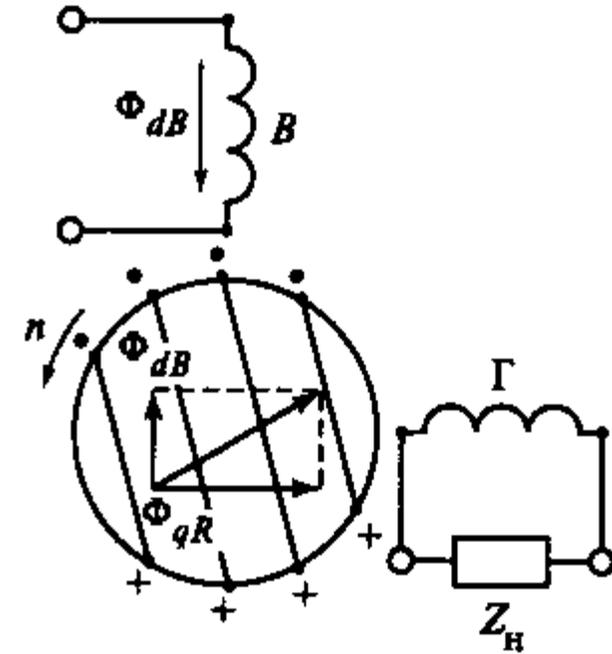
1. Падение напряжения в выходной обмотке $I_{\Gamma}Z_{\Gamma}$
 - с ростом n растет E_{Γ} и I_{Γ}
2. Уменьшение Φ_{qR} из-за размагничивающего действия $\Phi_{q\Gamma}$
 - с ростом n растет I_{Γ} (и F_{Γ} и $\Phi_{q\Gamma}$)



Погрешности асинхронных ТГ

Скоростные погрешности – причины возникновения

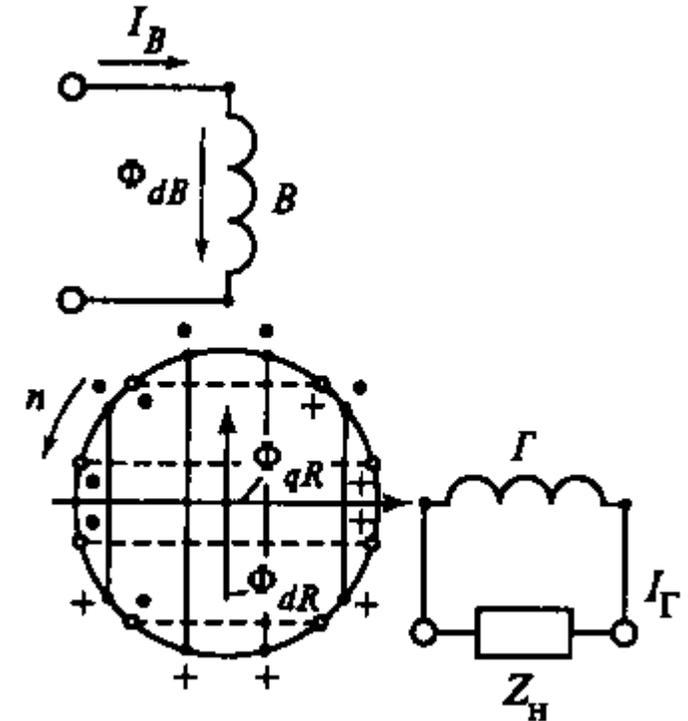
1. Падение напряжения в выходной обмотке $I_{\Gamma}Z_{\Gamma}$
 - с ростом n растет E_{Γ} и I_{Γ}
2. Уменьшение Φ_{qR} из-за размагничивающего действия $\Phi_{q\Gamma}$
 - с ростом n растет I_{Γ} (и F_{Γ} и $\Phi_{q\Gamma}$)
3. Уменьшение Φ_{qR} из-за отклонения результирующего Φ_R
 - I_R (и F_R и Φ_R) направлен как $E_{врR}$ по оси q только при $x_R = 0$
 - с ростом n изменяется x_R
 - уменьшается проекция Φ_R на ось q



Погрешности асинхронных ТГ

Скоростные погрешности – причины возникновения

1. Падение напряжения в выходной обмотке $I_{\Gamma}Z_{\Gamma}$
 - с ростом n растет E_{Γ} и I_{Γ}
2. Уменьшение Φ_{qR} из-за размагничивающего действия $\Phi_{q\Gamma}$
 - с ростом n растет I_{Γ} (и F_{Γ} и $\Phi_{q\Gamma}$)
3. Уменьшение Φ_{qR} из-за отклонения результирующего Φ_R
 - I_R (и F_R и Φ_R) направлен как $E_{врR}$ по оси q только при $x_R = 0$
 - с ростом n изменяется x_R
 - уменьшается проекция Φ_R на ось q
4. Уменьшение I_B (и потока возбуждения Φ_{dB}) под действием дополнительной ЭДС в ОБ от потока ротора Φ_{dR}
 - Φ_{dR} создается токами ротора, от ЭДС вращения, наведенной потоком от МДС F_{Γ}



Погрешности асинхронных ТГ

Температурные погрешности

– связаны с изменением активных сопротивлений обмоток при изменении температуры

В роторе

- » материалы с большим $\rho \rightarrow r_R$ слабо зависят от температуры

В статоре применяют меры защиты (особенно в ОВ)

- » терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления в цепи ОВ – для стабилизации величины r_B
- » автоматическое термостатирование ОВ
 - нагревательные элементы и датчики температуры в пазах для поддержания постоянной температуры обмотки

Количественная оценка температурной погрешности:

Температурный коэффициент выходного напряжения

– относительное изменение U_r при изменении температуры на 1°

- » в асинхронных ТГ – 0,005...0,15%

Погрешности асинхронных ТГ

Остаточная ЭДС

– ЭДС в генераторной обмотке при неподвижном роторе ($n = 0$)

Имеет постоянную составляющую и переменную составляющую (векторная сумма)

$$\dot{E}_{r0} = \dot{E}_{r0 \text{ const}} + \dot{E}_{r0 \text{ var}}$$

Постоянная составляющая остаточной ЭДС

- не зависит от положения ротора
- сдвинута по фазе относительно U_B

Причины возникновения постоянной составляющей остаточной ЭДС

- » неточный сдвиг обмоток ОВ и ОГ на $\pi/2$
- » магнитная несимметрия
- » потоки рассеяния
- » емкостные связи между обмотками (при большой частоте сети)

Для уменьшения $E_{r0 \text{ const}}$

- » качественное изготовление статора
- » расположение ОВ и ОГ на внешнем и внутреннем статоре с подбором оптимального взаимного положения (при котором U_r минимально)

Величина $E_{r0 \text{ const}} - 25...80 \text{ мВ}$

Погрешности асинхронных ТГ

Остаточная ЭДС

– ЭДС в генераторной обмотке при неподвижном роторе ($n = 0$)

Имеет постоянную составляющую и переменную составляющую (векторная сумма)

$$\dot{E}_{r0} = \dot{E}_{r0 \text{ const}} + \dot{E}_{r0 \text{ var}}$$

Переменная составляющая остаточной ЭДС

- зависит от положения, в котором остановился ротор

Причина возникновения переменной составляющей остаточной ЭДС

- » электрическая несимметрия ротора (неравномерная толщина полого ротора)

Для уменьшения $E_{r0 \text{ var}}$

- » качественное изготовление ротора
- » большое число пар полюсов ($p > 2$)

Величина $E_{r0 \text{ var}} - 3...7 \text{ мВ}$

Погрешности асинхронных ТГ

Остаточная ЭДС

– определяет асимметрию выходной характеристики
т.е. несовпадение зависимостей $U_{\Gamma} = f(+n)$ и $U_{\Gamma} = f(-n)$

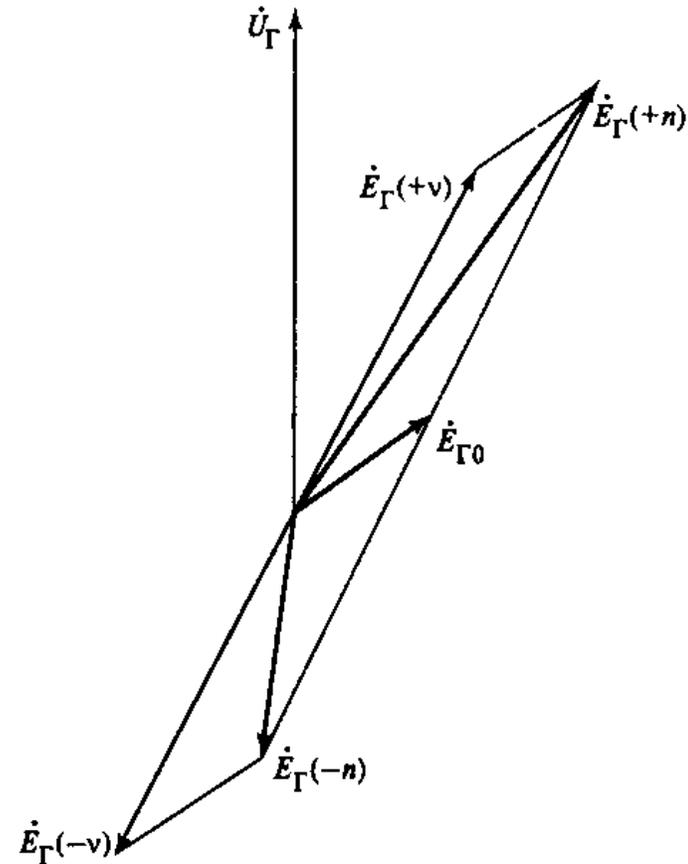
Выходная ЭДС асинхронного ТГ

$$\dot{E}_{\Gamma} = \dot{E}_{\Gamma\pm\nu} + \dot{E}_{\Gamma 0}$$

При изменении направления вращения

- » $E_{\Gamma 0}$ остается неизменной
- » $E_{\Gamma\pm\nu}$ меняет фазу на π

В результате $E_{\Gamma+\nu} \neq E_{\Gamma-\nu}$



Погрешности асинхронных ТГ

Оценка точности асинхронного ТГ – по значениям

- » амплитудной погрешности
- » фазовой погрешности
- » погрешности несимметрии

Нелинейность выходной характеристики оценивают по наибольшим амплитудным погрешностям в интервале скоростей от n_{\min} до $n_{\text{НОМ}}$

$$H_{\Gamma} = \frac{\Delta U_{\max}^{(+)} + \Delta U_{\max}^{(-)}}{2U_{\Gamma \text{НОМ}}} \cdot 100\%$$

Классы точности

- » I класс точности – $H_{\Gamma} \leq \pm 0,025\%$
- » ...
- » VI класс точности – $H_{\Gamma} \leq \pm 1,0\%$

Достоинства и недостатки асинхронных ТГ

Достоинства асинхронных ТГ

- » отсутствие скользящих контактов
- » малоинерционность ротора
- » немагнитный ротор → нет сил магнитного тяжения
→ малый собственный момент сопротивления
- » высокая надежность
- » стабильность характеристик

Недостатки асинхронных ТГ

- » необходимость в источнике питания
- » нелинейность выходной характеристики
- » наличие фазовой погрешности
- » наличие нулевого напряжения
- » малая выходная мощность
- » малая крутизна выходной характеристики
- » низкий $\cos\varphi$

Синхронные тахогенераторы

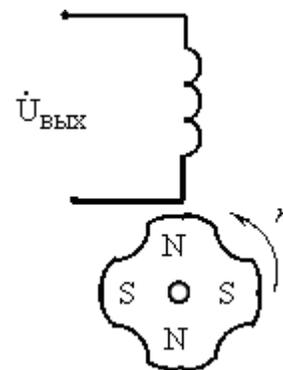
Синхронные тахогенераторы

В качестве тахогенераторов применяют

- » Магнитоэлектрические СГ малой мощности
- » Индукторные (высокочастотные) СГ

Особенности конструкции магнитоэлектрических СГ

- » ненасыщенная магнитная система
- » на роторе – ПМ в виде звездочки
- » на статоре – 1-фазная или 3-фазная обмотка



Простая и надежная конструкция

Особенности работы синхронных тахогенераторов

ЭДС обмотки якоря $E_r = 4,44 f w_r \Phi = 4,44 \frac{pn}{60} w_r \Phi = k_{кр} n$ – выходная характеристика ТГ

Крутизна выходной характеристики $k_{кр} = 4,44 \frac{P}{60} w_r \Phi$

При изменении n в синхронном ТГ изменяется величина ЭДС E_r и ее частота

- » изменение частоты ЭДС и тока
- изменение реактивных сопротивлений ТГ и его нагрузки ($x = \omega L$)
- искажение выходной характеристики (погрешность)

Синхронные генераторы не применяют как обычные тахогенераторы

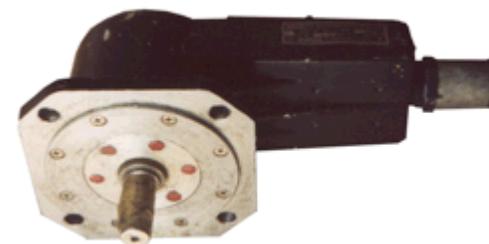
Синхронные тахогенераторы

Области применения синхронных тахогенераторов

- » Синхронный ТГ как информационный элемент для визуализации частоты вращения
 - к обмотке ТГ подключен вольтметр, проградуированный в об/мин
- » Синхронный ТГ с однофазной обмоткой как источник сигнала для схем, работающих на частотном принципе
 - измерительная схема анализирует частоту входного сигнала, а не величину U_T
- » Синхронный ТГ как генератор опорного напряжения в фазочувствительных схемах
 - измерительная схема анализирует фазу напряжения/тока, которая изменяется из-за изменения x с изменением частоты
- » Синхронный ТГ с трехфазной обмоткой, работающий через выпрямитель
 - аналог ТГ постоянного тока

Индукторный синхронный ТГ с выпрямителем на выходе

- » работает на зубцовых гармониках
- низкочастотные пульсации выпрямленной ЭДС малы
- высокочастотные пульсации легко сгладить фильтрами



Далее

Часть 3

👤 Ширинский С.В.
каф. ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»

✉ ShirinskiiSV@mpei.ru

🔗 <https://e-200.ru/EMAU/>

