



Национальный исследовательский Томский политехнический университет

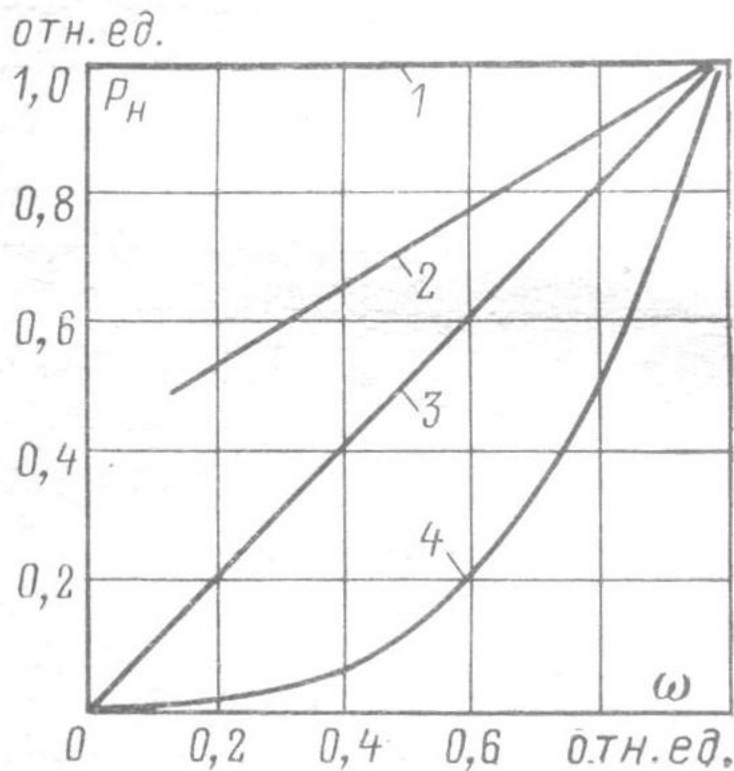
ПРОТИВОАВАРИЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Абеуов Ренат Болтабаевич

Доцент кафедры «Электроэнергетические системы и высоковольтная
техника»

Статические частотные характеристики нагрузки

Статическая частотная характеристика отдельных потребителей, узлов нагрузки или нагрузки в ЭС в целом – это зависимости активной и реактивной мощности от частоты, определяемая при таких медленных изменениях режима, что каждую точку этих зависимостей можно считать точкой устойчивого режима.



Статическая частотная характеристика активной мощности нагрузки различных потребителей:

- 1 – лампы накаливания, печи сопротивления, дуговые печи;
- 2 – люминесцентные лампы;
- 3 – поршневые насосы, компрессоры, шаровые мельницы, дробилки, металлорежущие станки, подъемники;
- 4 – центробежные насосы, вентиляторы.

Статические частотные характеристики нагрузки

Активная мощность, потребляемая осветительной и частично бытовой нагрузкой, получающей питание через выпрямители, а также для потребителей некоторых металлургических производств, от частоты не зависит. Такая нагрузка зависит только от напряжения.

$$P_H = k_0 \cdot U^\beta \quad \text{справочные данные}$$

Активная мощность, потребляемая люминесцентными лампами, зависит от частоты, уменьшая на 0,5-0,8% при снижении частоты на 1%. В меньшей степени зависит от напряжения.

СЧХ двигательной нагрузки (АД, СД) могут быть различными и определяются характеристиками приводного механизма.

У поршневых насосов, дробилок, металлорежущих станков, подъемных и транспортных механизмов момент сопротивления не зависит от частоты вращения двигателей. Таким образом, мощность, потребляемая из сети такими двигателями с такими приводами, снижается пропорционально частоте.

$$P = k \cdot \omega \cdot M_c = k_1 \cdot \omega$$

Момент сопротивления у вентиляторов, центробежных насосов при неизменном статической напоре пропорционален квадрату частоты.

$$M_c = k_2 \cdot \omega^2; P = k \cdot M_c \cdot \omega^2 = k_3 \cdot \omega^3$$

Зная состав узлов нагрузки и параметры различных потребителей, можно непосредственно путем подсчета значений мощности, потребляемой отдельными видами нагрузки. В этом случае суммарная характеристика активной мощности нагрузки при постоянстве напряжений может быть описана следующими выражением:

$$P_{\text{нбм}} = a_0 \cdot P \quad \text{а} \quad 1 \cdot \frac{P_{\text{ном}} \cdot \omega}{\omega_{\text{ном}}} + a_2 \cdot \frac{P_{\text{ном}} \cdot \omega^2}{\omega_{\text{ном}}^2} + a_3 \cdot \frac{P_{\text{ном}} \cdot \omega^3}{\omega_{\text{ном}}^3}$$

a_0, a_1, a_2, a_3 - коэффициенты, определяющие долевое участие нагрузок, независящих от частоты, зависящих от частоты в 1,2,3 степенях суммарной нагрузки узла или энергосистемы при номинальной частоте.

Статические частотные характеристики нагрузки

Величина, характеризующая изменение нагрузки при изменении частоты, называется регулирующим эффектом нагрузки (k_n)

При постоянном напряжении в узлах нагрузки регулирующий эффект активной мощности нагрузки по частоте может быть рассчитан по выражению:

$$k_n = \frac{\partial P}{\partial f} = \frac{\partial P}{\partial \omega} = a_1 + 2a_2 \cdot \frac{\omega}{\omega_{ном}} + 3 \cdot a_3 \cdot \frac{\omega^3}{\omega_{ном}^3}$$

$$k_n = \frac{\omega_0}{\Delta \omega} \cdot \frac{\Delta P}{P_{ном}}$$

Величина обратная регулирующему эффекту нагрузки называется статизмом нагрузки

$$\frac{1}{k_n} = \frac{\Delta \omega}{\omega} \cdot \frac{P_{ном}}{\Delta P} = \sigma_n$$

Статические частотные характеристики установок собственных нужд электростанций

Пример работы питательного электрического насоса (ПЭН)

Напор развиваемый ПЭН

$$h_{разв} = h_{ст} + h_{дин} \quad (1.1)$$

Динамическое противодавление связано с расходом воды следующим соотношением:

$$h_{дин} = R \cdot q^2 \quad (1.2)$$

Расход воды

$$q = \sqrt{\frac{h_{разв} - h_{ст}}{R}} \quad (1.3)$$

Развиваемый напор для целого ряда насосов, работающих в сети без противодавления, связан с угловой частотой следующим выражением:

$$h_{разв} = A \cdot \omega^2 \quad (1.4)$$

$$q = \sqrt{\frac{A \cdot \omega^2 - h_{ст}}{R}} \quad (1.5)$$

Статические частотные характеристики установок собственных нужд электростанций

$$q_{\text{н\text{о}м}} \cdot \sqrt{\frac{h_{\text{разв}} - \left(\frac{f_i}{f_{\text{ном}}}\right)^2 - h_{\text{ст}}}{h_{\text{разв}} - h_{\text{ст}}}} \quad (1.6)$$

$$q_{\text{н\text{о}м}} \cdot \frac{\sqrt{P_{\text{ном}} \left(\frac{f_i}{f_{\text{ном}}}\right)^2 - \text{ст}}}{P_{\text{ном}} - \text{ст}} \quad (1.7)$$

Критическое значение частоты определяется по следующему выражению:

$$f_{\text{крит}} = f_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{ст}}}{R_{\text{разв}}}} = f_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ст}}{\text{ном}}} \quad (1.8)$$

Статические частотные характеристики установок собственных нужд электростанций

Характеристика сети при неизменном статическом напоре определяется в относительных единицах следующим образом:

$$P = P_{ст} + (P_{ном} - P_{ст}) \cdot q^2 \quad (1.9)$$

Характеристики насоса при различных значениях частоты:

$$P_i' = P_i \cdot \frac{f_i^2}{f_{ном}^2}, \quad q_i' = q_i \cdot \frac{f_i}{f_{ном}} \quad (1.10)$$

$$f_{крит} = f_{ном} \cdot \sqrt{\frac{P_{ст}}{P_{0ном}}} \quad (1.11)$$

Первичные и вторичные регуляторы частоты вращения паровых и гидравлических турбин

Регулирование частоты в электрических системах требует изменения мощности, которую генераторы выдают в сеть. Мощность генераторов в установившихся режимах и ее изменения определяются мощностью турбин, которыми эти генераторы приводятся во вращение. Поэтому, рассматривая возможности регулирования частоты в электрических системах, необходимо проанализировать характеристики первичных двигателей — тепловых и гидравлических турбин, определяющих изменение их мощности под действием систем регулирования.

Первичные и вторичные регуляторы частоты вращения паровых и гидравлических турбин

Если турбина имеет автоматический *регулятор скорости*, то он изменяет отпуск энергоносителя (пара или воды) через турбину в зависимости от нагрузки. Регуляторы скорости турбин оказывают стабилизирующее влияние на частоту в системе и поэтому часто называются *первичными регуляторами частоты*. Процесс изменения частоты под действием этих регуляторов называется *первичным регулированием частоты*.

Регуляторы скорости турбины могут иметь астатическую или статическую *характеристику*. При изменении электрической нагрузки под действием регулятора скорости либо восстановится номинальная частота, либо установится некоторая новая частота, близкая к $f_{ном}$. В первом случае, когда после изменения нагрузки и окончания переходного процесса регулятор восстанавливает номинальную частоту, регулирование называется астатическим. Если при изменении нагрузки и окончания переходного процесса устанавливается новая, отличная от номинальной частота, то такое регулирование называется статическим.

Первичные и вторичные регуляторы частоты вращения паровых и гидравлических турбин

Реальные регуляторы скорости имеют статическую характеристику. Добиться астатической характеристики у регулятора практически очень трудно.

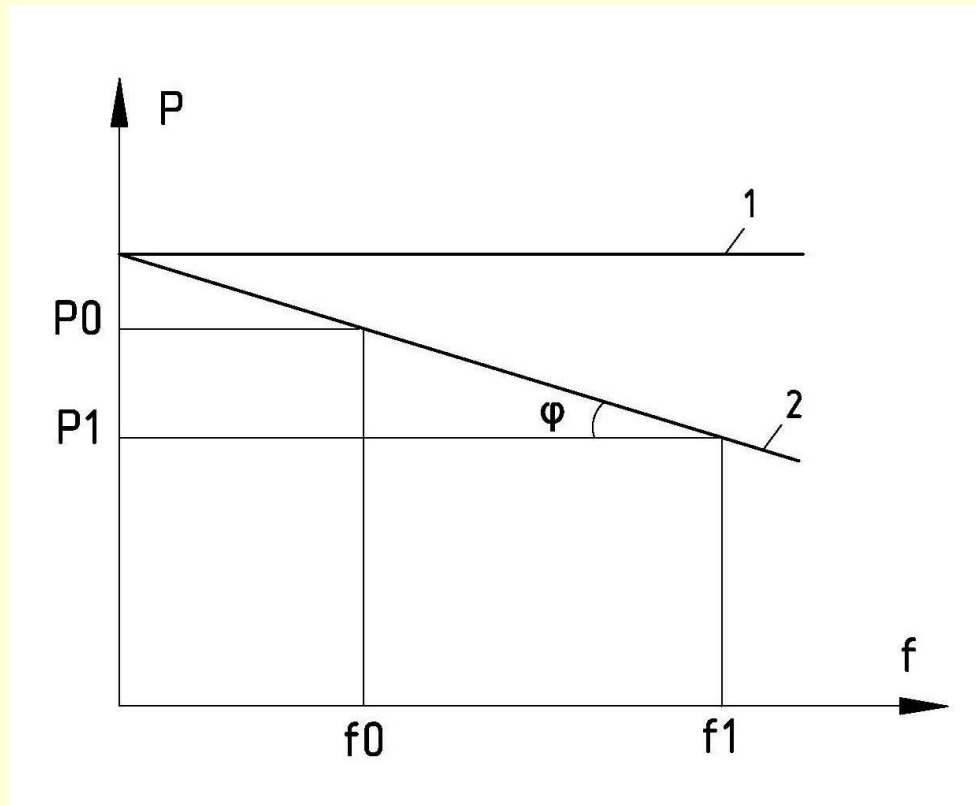
Для астатического регулирования, т. е. для дополнительной корректировки частоты в системе, применяется так называемое *вторичное регулирование*. В процессе вторичного регулирования осуществляется изменение мощности, развиваемой турбинами, в зависимости от частоты переменного тока. Вторичное регулирование ведется либо *автоматическими регуляторами частоты* (вторичными регуляторами скорости), либо обслуживающим персоналом системы (вручную), который контролирует частоту по показаниям приборов. В результате вторичного регулирования статическая характеристика турбины перемещается параллельно самой себе до тех пор, пока частота не станет номинальной.

Статические частотные характеристики турбоагрегатов

Регулирование бывает астатическое и статическое.

При астатическом регулировании (1) с ростом мощности нагрузки частота не изменяется.

При статическом регулировании (2) с ростом мощности нагрузки частота уменьшается.



$$\omega_{xx} - \omega - \sigma_2 \cdot P_2 = 0,$$

$$\omega = \omega_{xx} - \sigma_2 \cdot P_2,$$

$$\sigma_2 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta P} \text{ (в именованных единицах),}$$

$$\sigma_2 = \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \cdot \frac{P_{2 \text{ ном}}}{\Delta P_2} \text{ (в относительных единицах)}$$

ω_{xx} - угловая частота холостого хода;

ω - текущее значение угловой частоты;

P_2 - нагрузка на валу генератора;

σ_2 - коэффициент характеризующий угол наклона статической характеристики регулятора, т.е. статизм АРЧВ.

Статические частотные характеристики турбоагрегатов

Зависимость мощности на валу турбины от частоты вращения называется статической характеристикой турбины.

Зависимость мощности на валу турбины от частоты вращения при постоянном впуске энергоносителя называется статической характеристикой нерегулируемой турбины.

Статическая характеристика турбины при наличии АРЧВ называется статической характеристикой регулируемой турбины.

Для активной паровой турбины зависимость механического момента на ее валу при постоянном впуске энергоносителя может быть записана в следующем виде:

$$M \approx B \cdot (k_{\text{ном}} \omega - \omega) = A - B \cdot \omega \quad (1.12)$$

A, B - постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными особенностями турбины, а также расходом и параметрами пара.

При $\omega = 0$

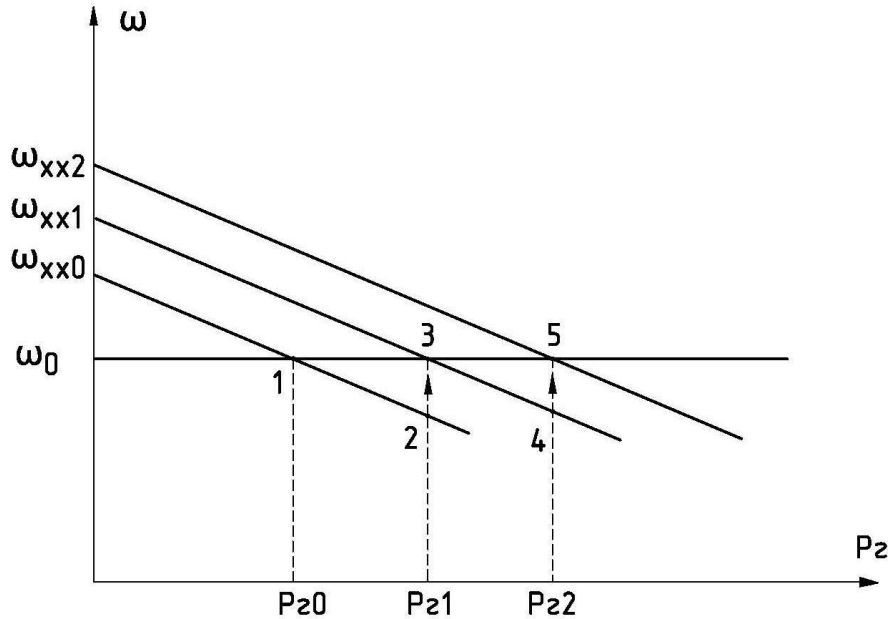
$$M = k_{\text{ном}} M \quad A = k_{\text{ном}} \omega \quad (1.13)$$

$$M = \frac{M_{\omega=0}}{M_{\text{ном}}} \Rightarrow M = \frac{P}{k_A \cdot \omega}$$

Используя данные выражения можно определить зависимость мощности, развиваемой турбиной, от частоты вращения:

$$P = M \cdot \omega = B \cdot (k_{\text{ном}} \omega - \omega) \omega = (A - B\omega) \omega$$

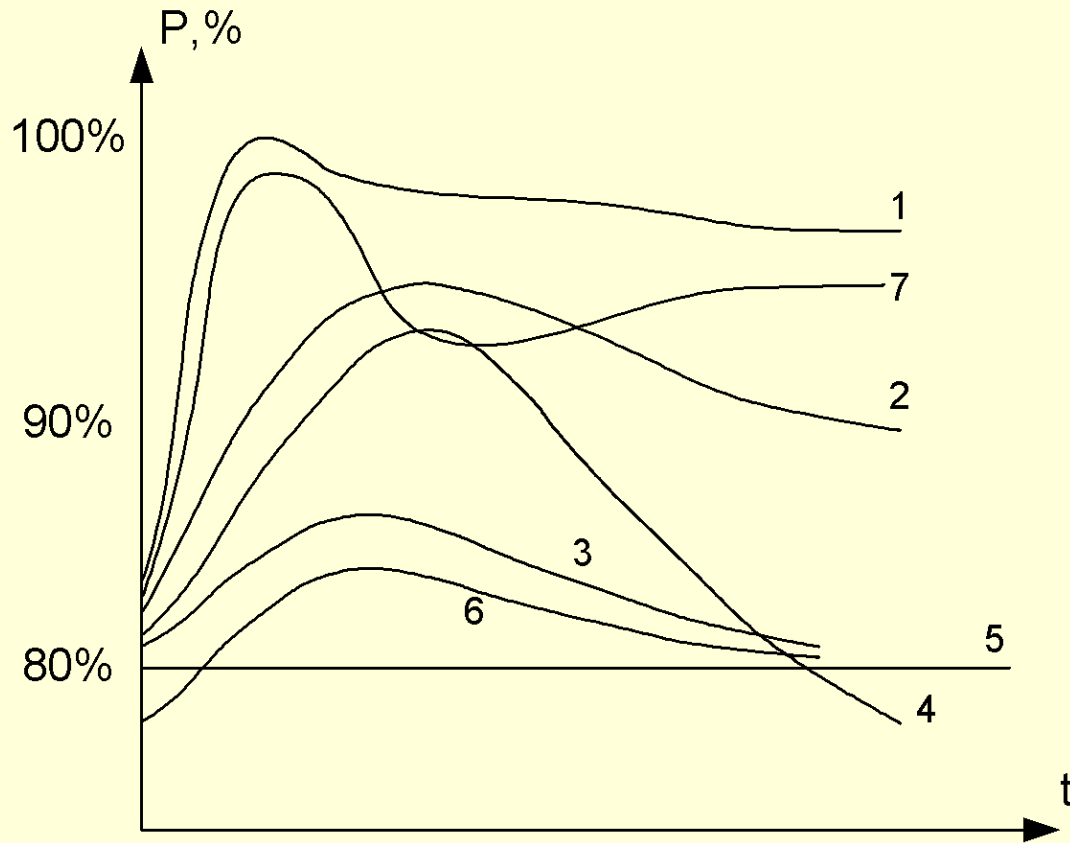
Статические частотные характеристики турбоагрегатов



В исходном режиме генератор работает по исходной характеристике регулирования. С изменением нагрузки включается вторичный регулятор частоты и воздействует на первичный регулятор. Его воздействие заключается в изменении частоты холостого хода. Частота растет и происходит переход из точки 2 в точку 3. После этого первичный регулятор осуществляет регулирование в соответствии с уравнением :

$$\omega_{xx1} - \omega_{xx0} - \sigma_z \cdot P_{z3} = 0$$

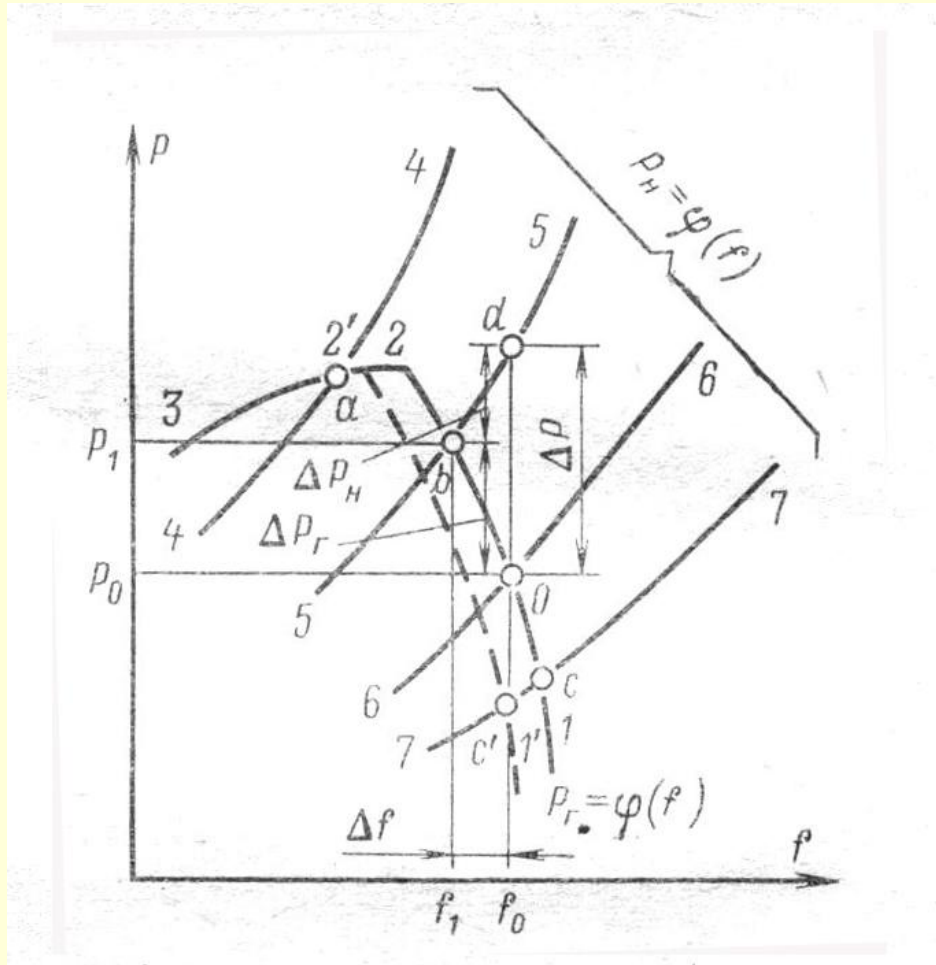
Статические частотные характеристики турбоагрегатов



Характеристики изменения мощности агрегата

- 1 - характеристика изменения мощности агрегата без учета переходного процесса в тепловой части турбины;
- 2, 3 – с учетом переходного процесса в тепловой части турбины, но без учета действия главного регулятора котла
 - 2 – барабанный котел
 - 3 – прямоточный котел
- 4 – соответствует прямоточному котлу с системой РДС;
- 5 – изменение мощности генератора, работающего на скользящих параметрах пара, при полностью открытых клапанах;
- 6 – не при полностью открытых клапанах;
- 7 – прямоточный котел с главным регулятором котла.

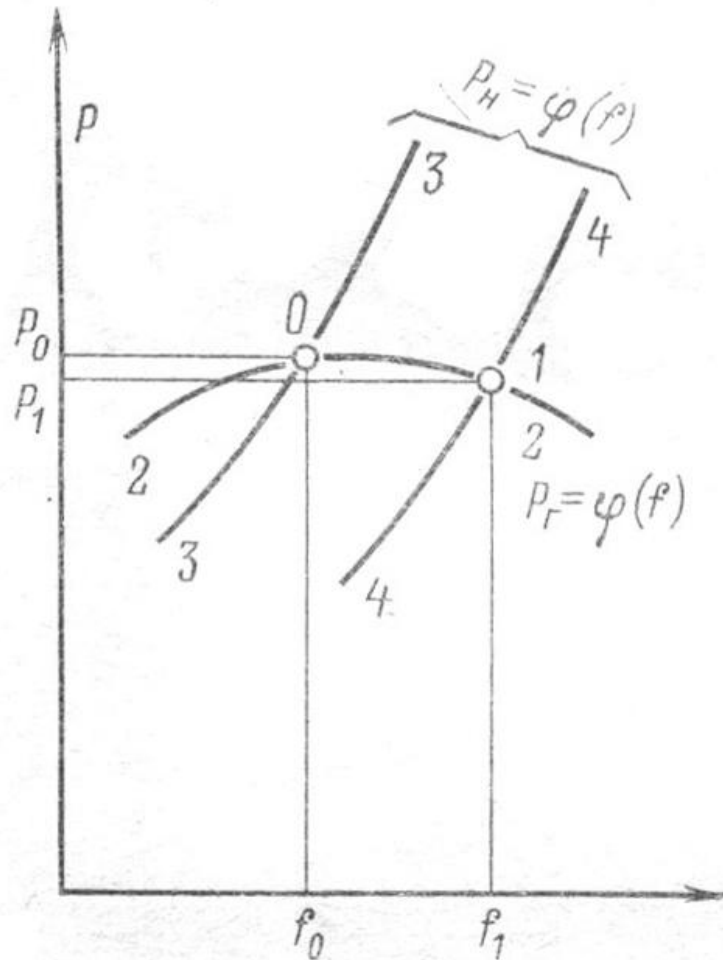
Статические частотные характеристики турбоагрегатов



Пусть установившемуся режиму соответствует точка 0 и происходит наброс мощности. Если бы при увеличении нагрузки частота в системе не изменилась, то произошел бы переход из точки 0 в точку d . Но с увеличением нагрузки частота несколько снижается в связи со статизмом генерирующей части и режим устанавливается в точке b . При этом генераторы увеличивают выработку на Δp , а нагрузка несколько снизится на Δp по сравнению с той, которая была бы при стабильной частоте. Тогда новому установившемуся режиму соответствует точка b с параметрами f_1, p_1 . Соответственно изменение частоты в системе составит величину Δf .

СЧХ энергосистемы с регулируемой турбиной

Статические частотные характеристики энергосистемы



Регулирование частоты в ЭС для случая с нерегулируемой турбиной

Если турбина не имеет регулирования частоты вращения, то установившееся значение частоты в системе будет определяться точками пересечения статических характеристик активной мощности, построенной для нагрузки турбины при постоянном впуске энергоносителя.

СЧХ энергосистемы с нерегулируемой турбиной

Динамические частотные характеристики энергосистемы при возникновении небаланса мощности при отсутствии вращающегося резерва.

Динамическая характеристика по частоте – это зависимость изменения частоты во времени при возникновении небаланса мощности. Она дает возможность наглядно представить физику протекания снижения частоты, осуществить эффективный выбор управляющих воздействий, выявить влияние различных факторов на переходный процесс, анализировать имеющие место аварии.

Для определения динамических частотных характеристик рассмотрим уравнение движения генератора, связывающее его угловую частоту с моментом на валу.

$$M \frac{d\omega}{dt} = M_{\Gamma} - c \quad (*)$$

Систему генератор-нагрузка связывают следующим соотношением:

$$T_J = \frac{J\omega_{ном}^2}{P_{ном}} = \frac{J\omega}{M_{ном}},$$
$$T_J = \frac{2.74 \cdot G \cdot D^2 \cdot n^2 \cdot 10^{-6}}{P_{ном}}, \text{ сек}$$

Постоянная механическая инерция энергосистемы определяется как сумма постоянных инерций отдельных агрегатов (генератор с турбиной, двигатели с приводами), отнесенной к базисной мощности.

$$T_{ДС} = \sum T_{J_{агр}} \cdot \frac{P_{ном}}{P_{баз}} = \frac{\sum (T_{J_{турб}} + T_{J_{ген}}) \cdot P_{эном} + \sum (T_{J_{дв}} + T_{J_{мех}}) \cdot P_{двном}}{P_{н,0}} = T_{J_{турб}} + T_{J_{ген}}$$

Динамические частотные характеристики энергосистемы при возникновении небаланса мощности при отсутствии вращающегося резерва.

Рассмотрим как в уравнении (*) момент турбины и сопротивления нагрузки зависят от частоты. Считаем, что вращающийся резерв мощности турбогенератора отсутствует. Также считается, что для генератора производительность его собственных нужд не зависит от частоты.

Для паровых турбин:

$$M = B(k_A \omega_0 - \omega) = A - B\omega$$

A, B - коэффициенты, определяемые конструктивными параметрами турбины и расходом пара.

$$P = \mu\omega = B(k_A \omega_0 - \omega)\omega = Bk_A \omega_0 \omega - B\omega^2 = (A - B\omega)\omega$$

$$M_c = C + D\omega$$

Уравнение движения системы:

$$T_J \frac{d\omega}{dt} + (B + D)\omega + (C - A) = 0$$

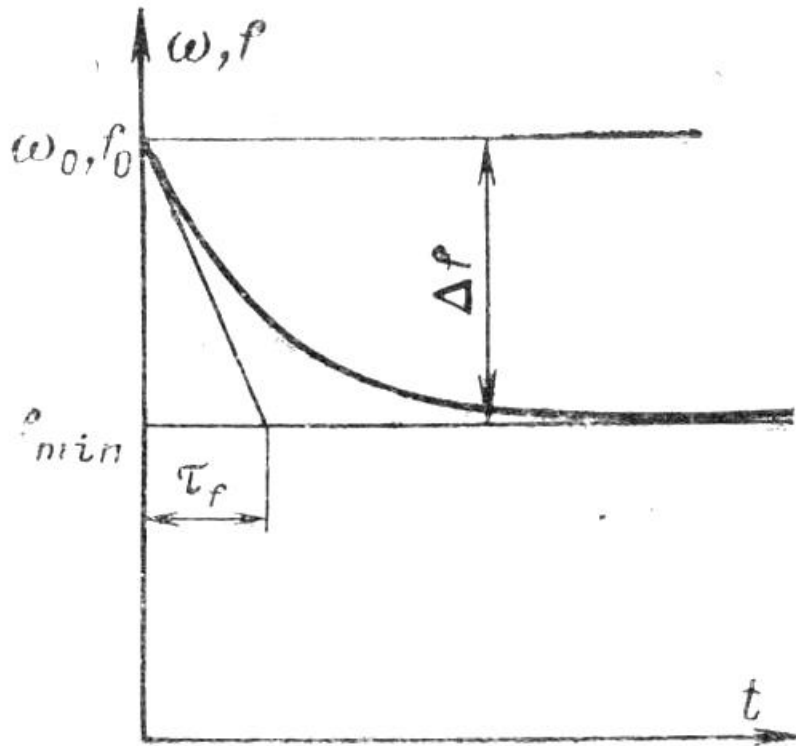
$$\omega = \frac{A - C}{B + D} + C_1 e^{-\frac{B+D}{T_J} t}, \quad C_1 = \omega_0 - \frac{A - C}{B + D}$$

Таким образом, изменение частоты во времени в переходном процессе описывают следующим образом:

$$\omega = \frac{A - C}{B + D} + \left(\omega_0 - \frac{A - C}{B + D} \right) e^{-t/T_J}$$

Данное выражение является динамической характеристикой энергосистемы при отсутствии вращающегося резерва мощности.

Динамические частотные характеристики энергосистемы при возникновении небаланса мощности при отсутствии вращающегося резерва.



Динамическая характеристика энергосистемы при отсутствии вращающегося резерва мощности.

Динамические частотные характеристики энергосистемы при возникновении небаланса мощности и наличии вращающегося резерва.

На вид ДЧС в данном случае большое влияние оказывают не только значения моментов генератора и нагрузки, но также и характеристики системы АРЧВ. Кроме того влияние оказывают статизм регулятора скорости и регулирующий эффект нагрузки.

Уравнение для характеристики ЭС в данном случае имеет вид:

$$\xi(t) = f_0 \left[1 - \frac{\Delta P_z \cdot \sigma_z}{P_{ном} + P_{н,0} \cdot k_n \cdot \sigma_z} t - 2^{-\alpha t} \sqrt{2 + \dots} \cdot \frac{\Delta P_z}{T_J} \cdot \cos(\Omega_{собств} \theta) \right] \quad (**)$$

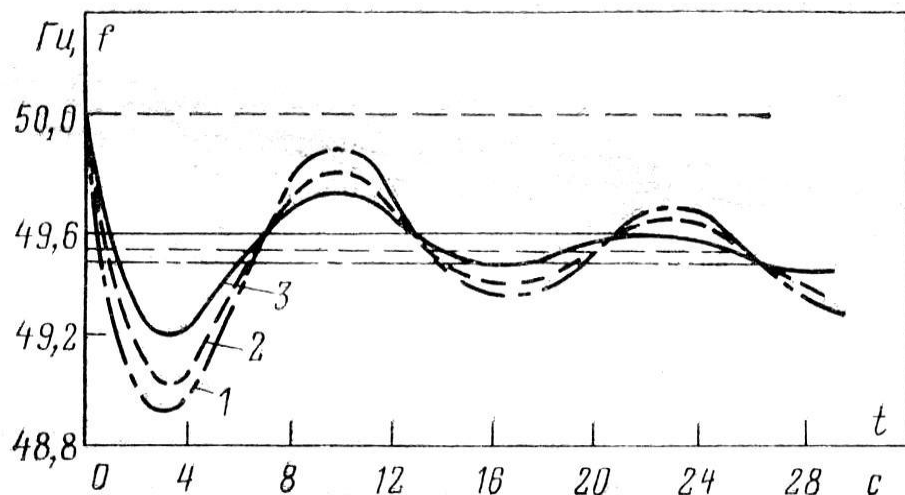
$$\Omega_{собств} = \sqrt{\frac{P_{ном}}{\sigma_1 \cdot T_S \cdot T_J} - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{T_J} - \frac{1}{T_J} \right)}$$

$$T_J = \frac{T_J \cdot J}{P_n \cdot n(0)}, \quad = \frac{\sigma \cdot T}{P2 \left(\frac{a}{ном} \cdot \sigma_z \right)}, \quad J = \frac{1}{2\Omega_{собств}} \left[\frac{\sigma_z (T_J + a' T_S)}{2T_{воп} (P + a' \sigma)} - 1 \right]$$

$$\theta' = k_n \cdot \arctan \theta = \frac{J}{x}, \quad \alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_S} + \frac{1}{T_J} \right)$$

Динамические частотные характеристики энергосистемы при возникновении небаланса мощности и наличии вращающегося резерва.

Выражение (**), полученное для ЭС, состоящее из единственного агрегата и выделенной на него нагрузки, но в полной мере может быть распространено на ЭС с большим числом генерирующих агрегатов и узлов нагрузки при условии, что в это выражение подставить результирующий статизм регуляторов частоты вращения всех турбин.



Характеристики:

1 – $K_H = 1$

2 – $K_H = 1,5$

3 – $K_H = 3,0$

Динамическая характеристика энергосистемы при наличии вращающегося резерва мощности.