

ЛЕКЦИЯ №1

1. Математическая модель синхронной машины

1.1. Исходные уравнения и преобразование координат

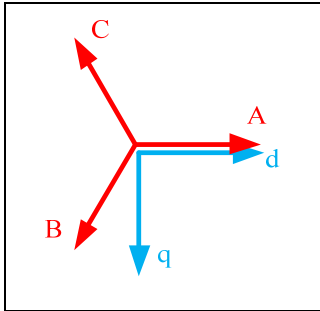
Система уравнений статорной цепи генератора имеет вид:

$$\begin{cases} u_A + i_A R + \frac{d\psi_A}{dt} = 0 \\ u_B + i_B R + \frac{d\psi_B}{dt} = 0 \\ u_C + i_C R + \frac{d\psi_C}{dt} = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} u_A = -i_A R - \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_B = -i_B R - \frac{d\psi_B}{dt} \\ u_C = -i_C R - \frac{d\psi_C}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $u_A, u_B, u_C, i_A, i_B, i_C$ - напряжения и токи на выходе генератора ψ_A, ψ_B, ψ_C - потокосцепления, R_A, R_B, R_C - сопротивления обмоток статора.

Вспомогательные преобразования координат

Уравнения статорной цепи запишем во вращающейся системе координат ротора. Для этого введем вспомогательный изображающий вектор в 3х-фазной системе координат статора и 2х-фазной вращающейся системе координат ротора (изображающий вектор может быть записан для любой величины i, u или ψ)



$$\frac{2}{3}(i_A + i_B a + i_C a^2) = (i_d - j \cdot i_q) e^{j\omega t} \quad (2)$$

Где $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – оператор поворота.

В последнем соотношении перенесем экспоненту влево и разделим действительную и мнимую части:

$$i = \frac{2}{3}(i_A + i_B a + i_C a^2) e^{-j\omega t} = (i_d - j \cdot i_q)$$

$$\begin{aligned} \frac{2}{3}(i_A + i_B a + i_C a^2) e^{-j\omega t} &= \frac{2}{3} \left(i_A e^{-j\omega t} + i_B e^{-j\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)} + i_C e^{-j\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)} \right) = \\ &= \frac{2}{3} \left(i_A \cos(\omega t) + i_B \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_C \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) - \\ &\quad - j \frac{2}{3} \left(i_A \sin(\omega t) + i_B \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_C \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \end{aligned}$$

В результате деления действительной и мнимой частей получаем:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} \left(i_A \cos(\omega t) + i_B \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_C \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\ i_q &= \frac{2}{3} \left(i_A \sin(\omega t) + i_B \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_C \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \end{aligned}$$

Получим обратную зависимость, i_A, i_B, i_C от i_d, i_q . Для этого произведем вспомогательные операции. Найдем действительную часть правой части выражения (2)

$$\frac{2}{3} (i_A + i_B a + i_C a^2) = \frac{2}{3} \left(i_A + i_B \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + i_C \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right)$$

Получим

$$\begin{aligned} & \frac{2}{3} \operatorname{Re} \left(i_A + i_B \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + i_C \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right) = \\ &= \frac{2}{3} \operatorname{Re} \left(i_A - \frac{1}{2} (i_B + i_C) + j \frac{\sqrt{3}}{2} (i_B - i_C) \right) = \frac{2}{3} i_A - \frac{1}{3} (i_B + i_C) + \frac{1}{3} (i_A - i_A) = \\ &= i_A - i_0 \end{aligned}$$

Таким образом, имеем соотношение

$$\frac{2}{3} \operatorname{Re} (i_A + i_B a + i_C a^2) = i_A - i_0 \quad (3)$$

где $i_0 = \frac{i_A + i_B + i_C}{3}$ ток нулевой последовательности.

Аналогично можно получить

$$\frac{2}{3} \operatorname{Re} (a^2 (i_A + i_B a + i_C a^2)) = \frac{2}{3} \operatorname{Re} (i_B + i_C a + i_A a^2) = i_B - i_0 \quad (4)$$

$$\frac{2}{3} \operatorname{Re} (a (i_A + i_B a + i_C a^2)) = \frac{2}{3} \operatorname{Re} (i_C + i_A a + i_B a^2) = i_C - i_0 \quad (5)$$

Найдем действительную часть левой части выражения (2) и получим в соответствии с выражением (3)

$$i_A = i_d \cos(\omega t) + i_q \sin(\omega t) + i_0$$

Умножим выражение (2) на a^2 , выделим действительную часть и в соответствии с выражением (4) получим

$$i_B = i_d \cos(\omega t - 2\pi/3) + i_q \sin(\omega t - 2\pi/3) + i_0$$

Умножим выражение (2) на a , выделим действительную часть и в соответствии с выражением (5) получим

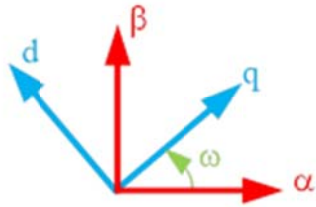
$$i_C = i_d \cos(\omega t + 2\pi/3) + i_q \sin(\omega t + 2\pi/3) + i_0$$

Для симметричной цепи при $i_0 = 0$ получаем систему уравнений связывающих системы ABC и qd

$$\begin{cases} i_A = i_d \cos(\omega t) + i_q \sin(\omega t) \\ i_B = i_d \cos(\omega t - 2\pi/3) + i_q \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_C = i_d \cos(\omega t + 2\pi/3) + i_q \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (6)$$

Трехфазная система координат статора ABC является избыточной, поэтому используют двухфазную ортогональную систему координат статора $\alpha\beta$.

Приведем связь координат $\alpha\beta$ и qd



$$(i_q + j \cdot i_d) e^{j\omega t} = i_\alpha + j \cdot i_\beta$$

Или коротко: $i_{\alpha\beta} = i_\alpha + j \cdot i_\beta, \quad i_{qd} = i_q + j \cdot i_d$

$$i_{qd} e^{j\omega t} = i_{\alpha\beta}$$

Запишем исходную систему координат в координатах $\alpha\beta$

$$u_{\alpha\beta} = -\frac{d}{dt} \psi_{\alpha\beta} - i_{\alpha\beta} R$$

Перейдем к системе координат qd

$$u_{qd} e^{j\omega t} = -\frac{d}{dt} (\psi_{qd} e^{j\omega t}) - i_{qd} e^{j\omega t} R \rightarrow$$

$$u_{qd} \cancel{e^{j\omega t}} = -\cancel{e^{j\omega t}} \frac{d}{dt} \psi_{qd} - j\omega \cancel{e^{j\omega t}} \psi_{qd} - i_{qd} \cancel{e^{j\omega t}} R$$

$$u_{qd} = -\frac{d}{dt} \psi_{qd} - j\omega \psi_{qd} - i_{qd} R$$

Разделим на действительную и мнимую части и получим систему уравнений

$$u_q + j u_d = -\frac{d}{dt} (\psi_q + j \psi_d) - j\omega (\psi_q + j \psi_d) - (i_q + j i_d) R$$

Трансформаторные
ЭДС

$$\begin{cases} u_d = -\frac{d}{dt} \psi_d - \omega \psi_q - R i_d \\ u_q = -\frac{d}{dt} \psi_q + \omega \psi_d - R i_q \end{cases}$$

ЭДС Вращения

(7)

Введем понятие скольжение

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \rightarrow \omega = \omega_0 - s\omega_0 = \omega_0 (1-s)$$

Тогда уравнения статорной цепи можно переписать

$$\begin{cases} u_d = -\frac{d}{dt} \psi_d - \omega_0 (1-s) \psi_q - R i_d \\ u_q = -\frac{d}{dt} \psi_q + \omega_0 (1-s) \psi_d - R i_q \end{cases}$$

(8)

При установившемся режиме система имеет вид

$$\begin{cases} u_d = -\omega\psi_q - Ri_d \\ u_q = \omega\psi_d - Ri_q \end{cases}$$

В системе координат ротора потокосцепления связаны с токами выражениями

$$\begin{cases} \psi_q = i_q L_q \\ \psi_d = i_d L_d + i_f L_{ad} \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_d = -\omega L_q i_q - Ri_d \\ u_q = \omega L_d i_d + \omega L_{ad} i_f - Ri_q \end{cases} \rightarrow \begin{cases} u_d = -x_q i_q - Ri_d \\ u_q = x_d i_d + E_q - Ri_q \end{cases} \quad (9)$$

Здесь $E_q = x_{ad} i_f$ – синхронное ЭДС генератора. Заметим, что в относительных единицах $x = L$.

Запишем эти уравнения в комплексной плоскости

$$\underline{U}_q = u_q, \underline{U}_d = ju_d, \underline{I}_q = i_q, \underline{I}_d = ji_d$$

Умножим первое уравнение на j

$$\begin{cases} \underline{U}_d = -jx_q \underline{I}_q - R\underline{I}_d \\ \underline{U}_q = -jx_d \underline{I}_d + E_q - R\underline{I}_q \end{cases}$$

Просуммируем верхнее и нижнее уравнения

$$\underline{U}_q + \underline{U}_d = -R(\underline{I}_d + \underline{I}_q) + E_q - jx_q(\underline{I}_q + \underline{I}_d - \underline{I}_d) - jx_d \underline{I}_d$$

получаем

$$\underline{U} = -R\underline{I} + \underline{E}_q - jx_q \underline{I} - j(x_d - x_q) \underline{I}_d$$

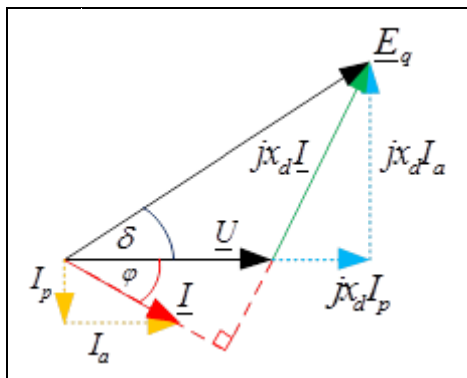
Или

$$\underline{E}_q = \underline{U} + R\underline{I} + jx_q \underline{I} + j(x_d - x_q) \underline{I}_d$$

Для неявнополюсного генератора $x_d = x_q$, и если не учитывать активные потери тогда последнее выражение можно переписать

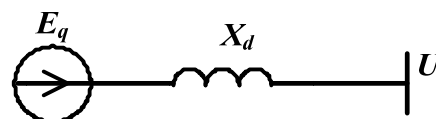
$$\underline{E}_q = \underline{U} + jx_d \underline{I}.$$

Важно помнить что, величина $E_q = x_{ad} i_f$ пропорциональная току возбуждения называется



синхронной ЭДС, а сопротивление x_d **синхронным сопротивлением**.

Нарисуем схему замещения и диаграмму синхронного генератора



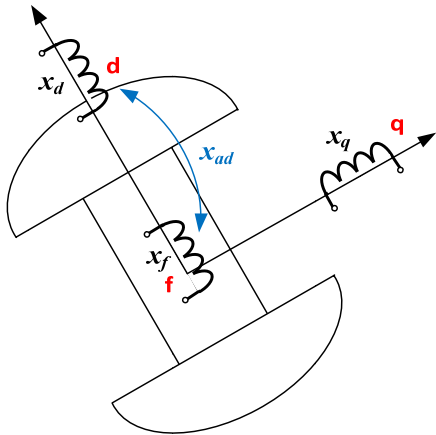
Такую схему можно использовать для анализа установившихся режимов синхронной машины.

При внезапном нарушении режима, синхронная ЭДС ($E_q = x_{ad} i_f$) меняется скачком из-за резкого изменения тока возбуждения. Резко изменяющаяся величина не удобна для решения дифференциального уравнения. Поэтому нужно найти величину, которая бы не изменялась скачком. Такой величиной является потокосцепление обмотки возбуждения. Запишем связь потокосцепления обмотки возбуждения с током возбуждения

$$\psi_f = i_d L_{ad} + i_f L_f$$

Выразим ток возбуждения через потокосцепление обмотки возбуждения в относительных единицах

$$i_f = \frac{\psi_f}{x_f} - i_d \frac{x_{ad}}{x_f}$$



И подставим полученное выражение во второе уравнение (9, без сопротивления R)

$$\begin{aligned} u_q &= x_d i_d + x_{ad} i_f = x_d i_d + x_{ad} \left(\frac{\psi_f}{x_f} - \frac{x_{ad}}{x_f} i_d \right) \\ &= \frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f + \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \right) i_d \end{aligned}$$

Введем обозначения

$$E'_q = \frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f, \quad x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f}$$

Тогда выражение напряжения u_q переписывается в виде:

$$u_q = E'_q + x'_d i_d$$

Перепишем последнее выражение в комплексном виде

$$\underline{U}_q = \underline{E}'_q - jx'_d \underline{I}_d$$

или

$$\underline{E}'_q = \underline{U}_q + jx'_d \underline{I}_d$$

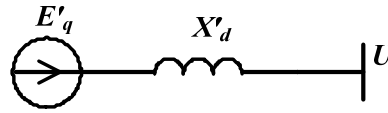
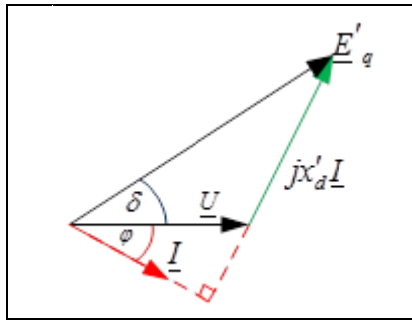
С небольшой погрешностью последнее выражение можно переписать

$$\underline{E}'_q = \underline{U} + jx'_d \underline{I}$$

Важно помнить что, величина $E'_q = \frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f$ пропорциональная потокосцеплению

называется **переходной ЭДС**, а сопротивление $x' = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f}$ **переходным сопротивлением**.

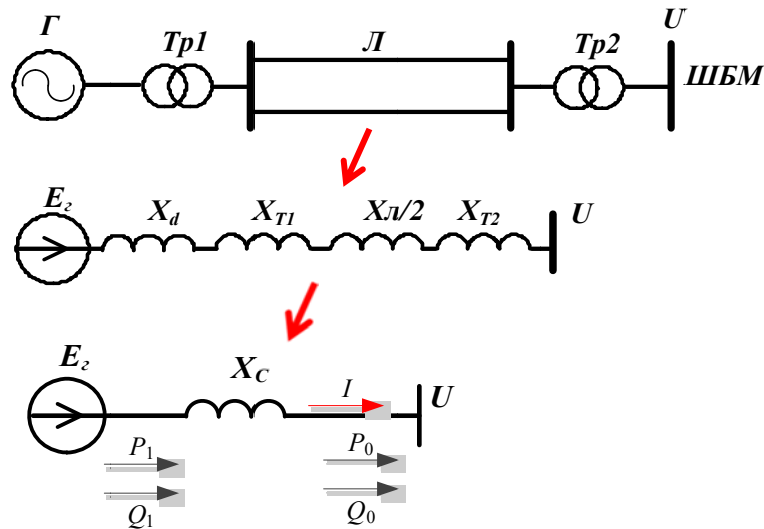
Рисуем схему замещения и диаграмму синхронного генератора:



Таким образом, в переходном режиме синхронная машина может быть представлена схемой замещения в виде переходного ЭДС- $\underline{E}'_q$ и переходного реактивного сопротивления x'_d . $\underline{E}'_q$ переходное ЭДС еще называют расчетной. $\underline{E}'_q$ является непрерывной величиной при переходных процессах и поэтому предпочтительной, по сравнению с $\underline{E}_q$ - изменяющейся скачком.

2. Угловые характеристики мощности и понятия об устойчивости.

Рассмотрим схему простейшей электрической системы в которой имеется генератор включенный через трансформатор и длинную линию к шинам приемной системы.



Найдем результирующее сопротивление схемы

$$x_{\Sigma} = x_G + x_{T1} + \frac{x_L}{2} + x_{T2}$$

Запишем комплексное выражение тока для последней схемы

$$\underline{E}_2 - U = jx_{\Sigma} \underline{I} \rightarrow \underline{I} = \frac{\underline{E}_2 - U}{jx_{\Sigma}} = \frac{E_2 e^{j\delta} - U}{jx_{\Sigma}}, \quad \underline{I}^* = j \frac{E_2 e^{-j\delta} - U}{x_{\Sigma}}$$

Находим полную мощность в конце системы и ее активную и реактивную части

$$\begin{aligned} \underline{S}_0 &= U \underline{I}^* = j \frac{U E_2 e^{-j\delta} - U^2}{x_{\Sigma}} = j \frac{E_2 U \cos(\delta)}{x_{\Sigma}} - j \frac{j U E_2 \sin(\delta) + U^2}{x_{\Sigma}} \\ &= \frac{U E_2 \sin(\delta)}{x_{\Sigma}} + j \frac{E_2 U \cos(\delta) - U^2}{x_{\Sigma}} \end{aligned}$$

$$P_0 = \frac{E_e U \sin(\delta)}{x_\Sigma},$$

$$Q_0 = \frac{U E_e \cos(\delta) - U^2}{x_\Sigma}$$

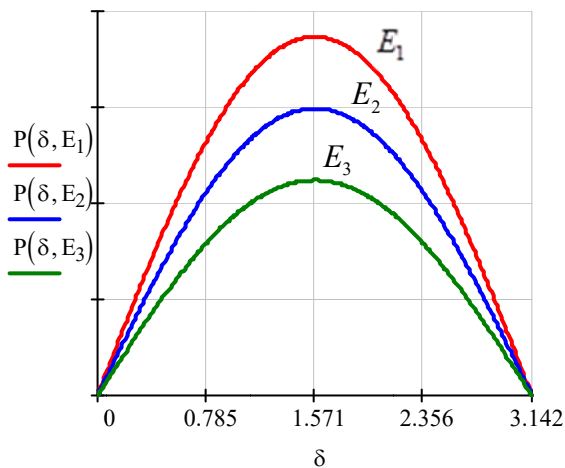
Находим полную мощность в начале системы и ее активную и реактивную части

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 &= E_e \underline{I}^* = j \frac{E_e e^{-j\delta} - U}{x_\Sigma} E_e e^{j\delta} = j \frac{E_e^2 - U(E_e \cos(\delta) + j E_e \sin(\delta))}{x_\Sigma} \\ &= \frac{U E_e \sin(\delta)}{x_\Sigma} + j \frac{E_e^2 - E_e U \cos(\delta)}{x_\Sigma} \end{aligned}$$

$$P_1 = \frac{E_e U \sin(\delta)}{x_\Sigma},$$

$$Q_1 = \frac{E_e^2 - U E_e \cos(\delta)}{x_\Sigma}$$

Построим графическую зависимость активной мощности от угла - угловую характеристику мощности $P(\delta, E)$, для различных значений ЭДС $E_1 > E_2 > E_3$.

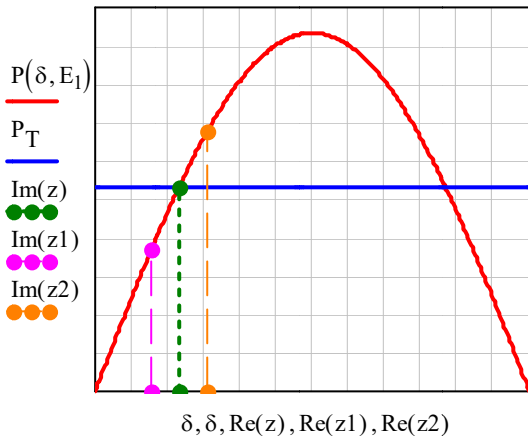


Максимальная мощность приходится на величину угла $\delta = \pi / 2$ и равна величине

$$P_{\max} = \frac{E_e U}{x_\Sigma}.$$

Эта величина является **пределом передаваемой мощности**, а угол называется критическим. Таким образом, максимальную мощность, которую можно передать без учета в потерь сети равна величине $P_{\max}$. Из графика видно, что предел передаваемой мощности увеличивается с

ростом ЭДС машины.



На валу агрегата турбина – генератор действуют два момента, вращающий момент турбины M_T и тормозящий момент генератора M_G . В некотором приближении моменты пропорциональны мощностям $M_G \approx P_G, M_T \approx P_T$ и тогда можно записать уравнение относительного движения ротора:

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_T - P_G = \Delta P \quad \text{или} \quad T_J \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_G = \Delta P$$

Здесь T_J - постоянная инерции, ω - частота вращения ротора.

При постоянной частоте вращения наступает равновесие

$$0 = P_T - P_e \rightarrow P_T = P_e = P_{\max} \sin(\delta)$$

На графике мощности можно найти точку положения равновесия

$$\delta = \arcsin(P_T / P_{\max}) = \arcsin(P_T x_C / E_T U).$$

Если мощность турбины P_T больше мощности генератора P_g , $\Delta P > 0$ производная скорости изменения частоты положительная (сиреневая точка на графике)

$$\frac{d\omega}{dt} > 0,$$

и, следовательно, частота увеличивается (ротор начинает вращаться быстрее).

Если мощность турбины P_T меньше мощности генератора P_g , $\Delta P < 0$ производная скорости изменения частоты отрицательная (оранжевая точка на графике)

$$\frac{d\omega}{dt} < 0,$$

и, следовательно, частота уменьшается (ротор начинает вращаться медленнее).

Все описанное справедливо для участка, где угол изменяется от 0 до 90°. Этот участок изменения угла является устойчивым. То есть при отклонении от точки положения равновесия в любую сторону система возвращается в исходную точку. На этом участке производная мощности по углу положительная величина:

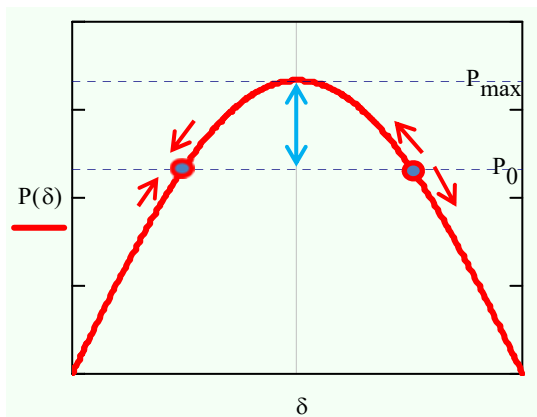
$$\frac{dP}{d\delta} > 0.$$

Производная мощности по углу называется **синхронизирующей мощностью**.

На участке где угол меняется от 90° до 180°, синхронизирующая мощность является отрицательной величиной.

$$\frac{dP}{d\delta} < 0$$

Процесс на этом участке неустойчив. При отклонении от положения равновесия отклонение системы только прогрессирует.



Запасом устойчивости называется величина равная

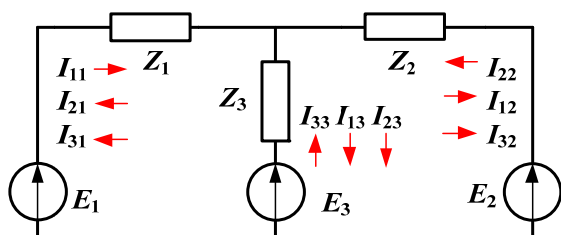
$$K = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0} \cdot 100\%$$

3. Характеристики мощности сложной электрической системы

Система, содержащая более одного генератора, считается сложной. Для определения мощностей сложной системы используют принцип суперпозиции (метод наложения).

Рассмотрим применения принципа для определения мощности сложной системы.

Представим токи I_1, I_2, I_3 как сумму частичных токов создаваемых каждой ЭДС в отдельности

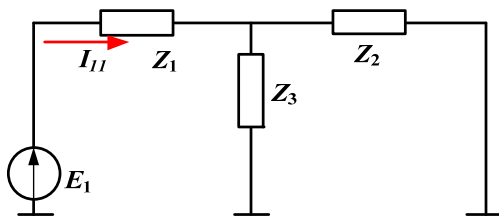


$$I_1 = I_{11} - I_{21} - I_{31}$$

$$I_2 = I_{22} - I_{12} - I_{32}$$

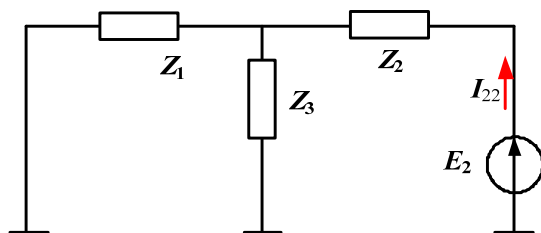
$$I_3 = I_{33} - I_{13} - I_{23}$$

Первый частичный ток I_{11} определяется соотношением.

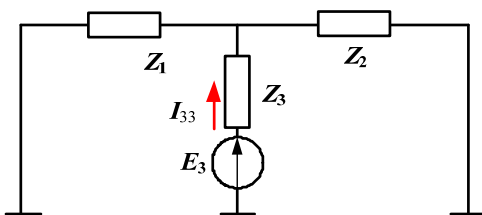


$$I_{11} = \frac{E_1}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}} = \frac{E_1}{Z_{11}}, \quad Z_{11} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

Аналогично определяются токи I_{22}, I_{33} .



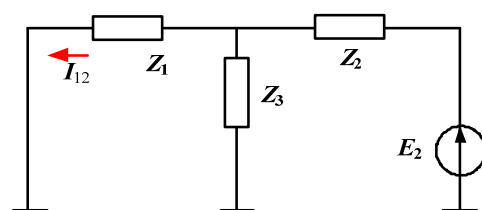
$$I_{22} = \frac{E_2}{Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3}} = \frac{E_2}{Z_{22}}, \quad Z_{22} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3}$$



$$I_{33} = \frac{E_3}{Z_3 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}} = \frac{E_3}{Z_{33}}, \quad Z_{33} = Z_3 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Сопротивления, Z_{11}, Z_{22}, Z_{33} входящие в выражения принято называть собственными сопротивлениями. Они определяют фазу тока и его значения в ветви собственного генератора при отсутствии генераторов других ветвей.

Определим частичные токи

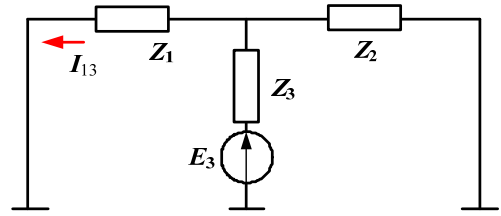


$$I_{12} = \frac{E_2 Z_3}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}} \cdot \frac{1}{Z_2 + Z_3} = \frac{E_2 Z_3}{Z_2 Z_1 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_1}$$

$$= \frac{E_2}{\frac{Z_2 Z_1}{Z_3} + Z_2 + Z_1} = \frac{E_2}{Z_{12}}, \quad Z_{12} = \frac{Z_2 Z_1}{Z_3} + Z_2 + Z_1$$

$$I_{13} = \frac{E_3 Z_2}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}} \frac{1}{Z_2 + Z_3} = \frac{E_3 Z_2}{Z_2 Z_1 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_1}$$

$$= \frac{E_3}{\frac{Z_3 Z_1}{Z_2} + Z_3 + Z_1} = \frac{E_3}{Z_{13}}, \quad Z_{13} = \frac{Z_3 Z_1}{Z_2} + Z_3 + Z_1$$

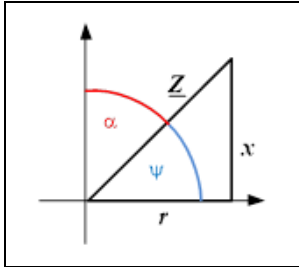


Находим полную мощность:

$$\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \underline{E}_1 \underline{I}_1^* =$$

$$= E_1 e^{j\delta_1} \left(\frac{E_1 e^{-j\delta_1} e^{j\psi_{11}}}{Z_{11}} - \frac{E_2 e^{-j\delta_2} e^{j\psi_{12}}}{Z_{12}} - \frac{E_3 e^{-j\delta_3} e^{j\psi_{13}}}{Z_{13}} \right)$$

$$= \frac{E_1^2 e^{j\psi_{11}}}{Z_{11}} - \frac{E_1 E_2 e^{j\delta_{12}} e^{j\psi_{12}}}{Z_{12}} - \frac{E_1 E_3 e^{j\delta_{13}} e^{j\psi_{13}}}{Z_{13}}$$



Разделяя действительную и мнимую части получаем:

$$P_1 = \frac{E_1^2 \cos(\psi_{11})}{Z_{11}} - \frac{E_1 E_2 \cos(\delta_{12} + \psi_{12})}{Z_{12}} - \frac{E_1 E_3 \cos(\delta_{13} + \psi_{13})}{Z_{13}}$$

$$Q_1 = \frac{E_1^2 \sin(\psi_{11})}{Z_{11}} - \frac{E_1 E_2 \sin(\delta_{12} + \psi_{12})}{Z_{12}} - \frac{E_1 E_3 \sin(\delta_{13} + \psi_{13})}{Z_{13}}$$

Введем угол $\alpha = 90 - \psi \rightarrow \psi = 90 - \alpha$

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin(\alpha_{11}) + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \frac{E_1 E_3}{Z_{13}} \sin(\delta_{13} - \alpha_{13})$$

$$Q_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \cos(\alpha_{11}) - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}) - \frac{E_1 E_3}{Z_{13}} \cos(\delta_{13} - \alpha_{13})$$

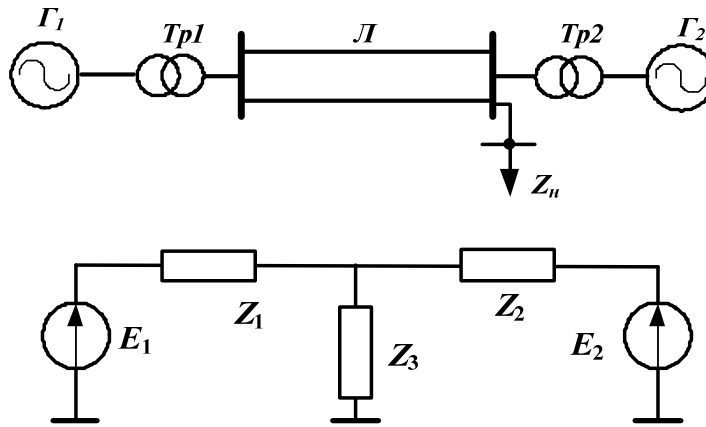
$$P_2 = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin(\alpha_{22}) + \frac{E_2 E_1}{Z_{21}} \sin(\delta_{21} - \alpha_{21}) + \frac{E_2 E_3}{Z_{23}} \sin(\delta_{23} - \alpha_{23})$$

$$Q_2 = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \cos(\alpha_{22}) - \frac{E_2 E_1}{Z_{21}} \cos(\delta_{21} - \alpha_{21}) - \frac{E_2 E_3}{Z_{23}} \cos(\delta_{23} - \alpha_{23})$$

$$P_3 = \frac{E_3^2}{Z_{33}} \sin(\alpha_{33}) + \frac{E_3 E_1}{Z_{31}} \sin(\delta_{31} - \alpha_{31}) + \frac{E_3 E_2}{Z_{32}} \sin(\delta_{32} - \alpha_{32})$$

$$Q_3 = \frac{E_3^2}{Z_{33}} \cos(\alpha_{33}) - \frac{E_3 E_1}{Z_{31}} \cos(\delta_{31} - \alpha_{31}) - \frac{E_3 E_2}{Z_{32}} \cos(\delta_{32} - \alpha_{32})$$

Рассмотрим пример с двумя генераторами



$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin(\alpha_{11}) + \frac{E_2 E_1}{Z_{21}} \sin(\delta_{31} - \alpha_{31}) & Q_1 &= \frac{E_1^2}{Z_{11}} \cos(\alpha_{11}) - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}) \\
 P_2 &= \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin(\alpha_{22}) + \frac{E_2 E_1}{Z_{21}} \sin(\delta_{21} - \alpha_{21}) & Q_2 &= \frac{E_2^2}{Z_{22}} \cos(\alpha_{22}) - \frac{E_2 E_1}{Z_{21}} \cos(\delta_{21} - \alpha_{21})
 \end{aligned} \tag{10}$$

Если нагрузки нет, то сопротивления определяются выражениями

$$Z_{11} = Z_{22} = Z_1 + Z_2, \quad Z_{12} = Z_{21} = Z_1 + Z_2$$