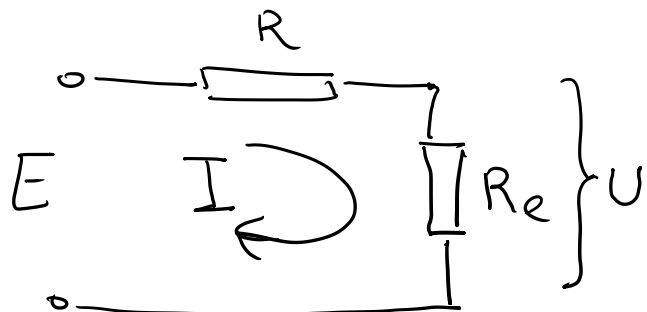


Лекция 8

Устойчивость процессов в электросетях

Сеть постоянного тока:



$$I = \frac{E}{R + R_e}$$

$$U = I R_e$$

$$P = UI = \frac{E^2 R_e}{(R + R_e)^2}$$

При каком сопротивлении нагрузки R_e достигается

максимальная мощность, потребляемая нагрузкой?

$$P' = \frac{E^2(R + R_e)^2 - 2(R + R_e)E^2 R_e}{(R + R_e)^4} = \frac{E^2(R + R_e) - 2E^2 R_e}{(R + R_e)^3} = 0$$

$$\Rightarrow R_e = R \Rightarrow p_{\max} = \frac{E^2}{4R}$$

Пусть имеется регулятор мощности нагрузки:

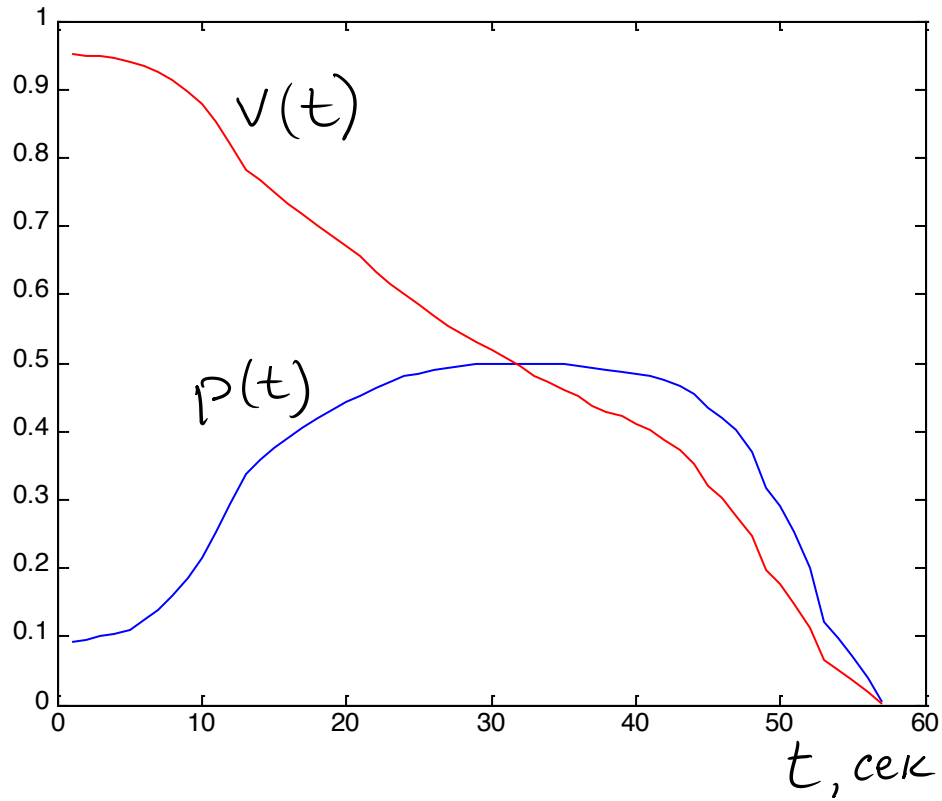
$$\dot{R}_e = \frac{E^2 R_e}{(R + R_e)^2} - p_0, \text{ где } p_0 - \text{некоторая заданная мощность}$$

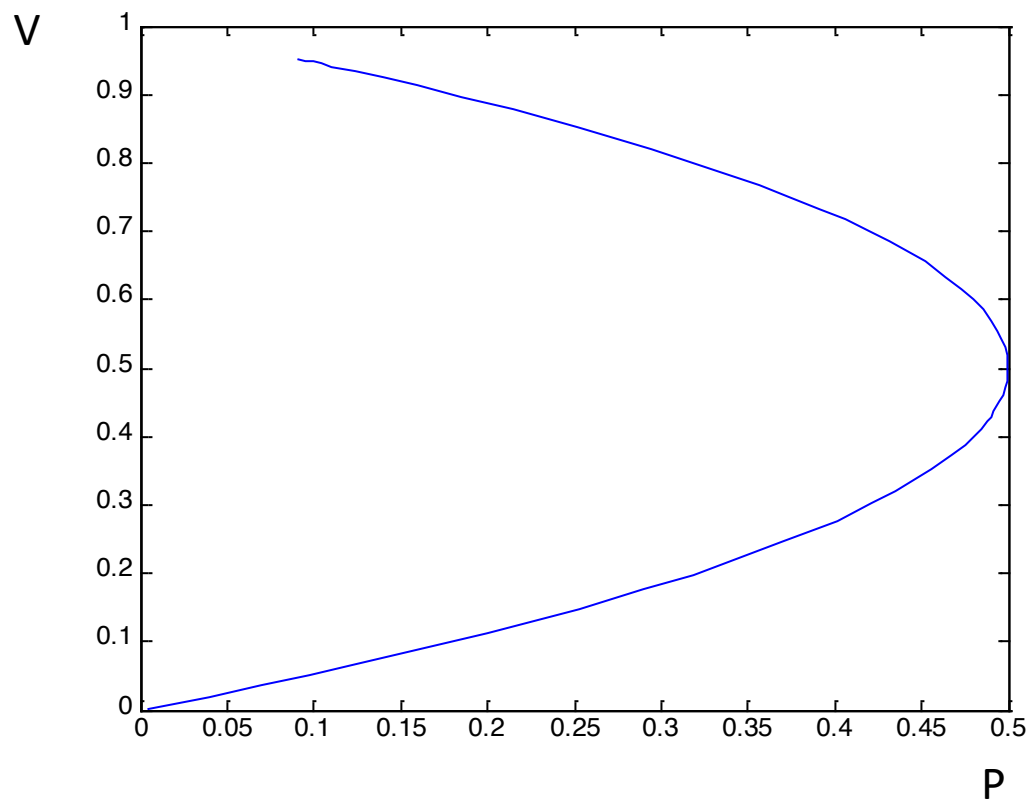
$$\text{Если } p_0 > p_{\max} \Rightarrow R_e \rightarrow 0, p = \frac{E^2 R_e}{(R + R_e)^2} \rightarrow 0,$$

$$U = I R_e = \frac{E R_e}{(R + R_e)} \rightarrow 0$$

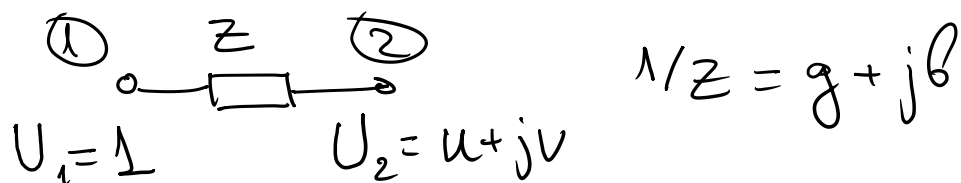
Пример

$$E=1V, R=0.5[OM], R_e(0)=2[OM], p_0=p_{max}+0.01$$





Система УУН в форме баланса мощностей: пример



Узел ① - балансирующий, задана мощность нагрузки в уз. 2 S_2

$$S_2 = (u + jv)(u - jv - 1)(g - jb) = (u^2 + v^2 - u - jv)(g - jb)$$

$$P_2 = (u^2 + v^2)g - ug - bv \quad | \times b$$

$$Q_2 = -(u^2 + v^2)b - vg + bu \quad | \times g$$

$$P_2 b + Q_2 g = -(b^2 + g^2)v \Rightarrow v = -\frac{P_2 b + Q_2 g}{b^2 + g^2}$$

Подставим в первое ур-е для поиска u :

$$u^2 - u - \frac{bv}{g} + v^2 - \frac{p_2}{g} = 0$$

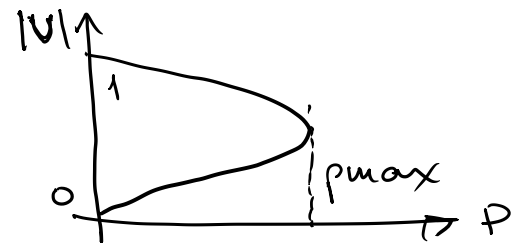
$$u^2 - u + c = 0, \quad c = c(p_2, q_2, g, b), \quad c \rightarrow +\infty, \quad p, q \rightarrow +\infty$$

$$u = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4c}}{2} \Rightarrow c > 1/4 \Rightarrow \text{уравнение не имеет решений}$$

$$\text{При } p_2 = q_2 = 0 \Rightarrow v = 0, \quad u^2 - u = 0 \Rightarrow$$

2 корня: $u_1 = 1, u_2 = 0 \Rightarrow$ общий вид зависимости

модуля напряжения от передаваемой мощности



Система УУН в декартовой системе координат

$$\begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U' \\ U'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I' \\ I'' \end{bmatrix} \quad - \text{система уравнений} \\ \text{баланса токов}$$

$$\begin{aligned} S &= (\text{diag}(U') + j \text{diag}(U'')) (I' - j I'') = \\ &= \text{diag}(U') I' + \text{diag}(U'') I'' + j \text{diag}(U'') I' - \text{diag}(U') I'' \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{diag}(U') & \text{diag}(U'') \\ \text{diag}(U'') & -\text{diag}(U') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I' \\ I'' \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \text{diag}(U') & \text{diag}(U'') \\ \text{diag}(U'') - \text{diag}(U') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U' \\ U'' \end{bmatrix}$$

Система УУН в полярных координатах

$$U = Ve^{j\delta} = V \cos \delta + j V \sin \delta$$

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{diag}(V \cos \delta) & \text{diag}(V \sin \delta) \\ \text{diag}(V \sin \delta) - \text{diag}(V \cos \delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} V \cos \delta \\ V \sin \delta \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

Преимущество представления в полярных координатах

В узлах, где к сети подключены генераторы, которые, как правило, являются источниками ЭДС, модуль напряжения поддерживается постоянным (в пределах технических возможностей соответствующих генераторов)

Поэтому в таких узлах величина V является фиксированной.

В декартовой системе координат для задания постоянного модуля напряжения потребовалось бы ввести дополнительное ограничение вида:

$$U'^2 + U''^2 = \text{const}$$

Анализ УУН

$$\bar{Z} = R + jX$$


$$\frac{1}{\bar{Z}} = g + jb$$

Представление в относительных ед.
(per unit notation, p.u.)

$$V_i := \frac{V_i}{|V^H|}$$

V^H — номинальное напряжение
для данного класса
напряжения

$$S = \frac{U_i}{|V^H|} \left(\frac{U_j}{|V^H|} - \frac{U_i}{|V^H|} \right) (g - jb) |V^H|^2 \Rightarrow V_k \sim 1$$

$$S_o = V_o e^{j\delta_o} (V_1 e^{-j\delta_1} - V_o e^{-j\delta_o}) (g - jb) =$$

$$= (V_o V_1 e^{j(\delta_o - \delta_1)} - V_o^2) (g - jb) =$$

$$(V_o V_1 \cos \Delta\delta + j V_o V_1 \sin \Delta\delta - V_o^2) (g - jb) =$$

$$= gV_0V_1 \cos \Delta\delta - gV_0^2 + bV_0V_1 \sin \Delta\delta + \\ j(-bV_0V_1 \cos \Delta\delta + bV_0^2 + gV_0V_1 \sin \Delta\delta)$$

$$\Delta\delta - \text{mano} \Rightarrow \sin \Delta\delta \sim \Delta\delta \\ \cos \Delta\delta \sim 1 \Rightarrow$$

$$P \sim gV_0V_1 - gV_0^2 + bV_0V_1 \Delta\delta \\ Q \sim -bV_0V_1 + bV_0^2 + gV_0V_1 \Delta\delta$$

$$\frac{\partial P}{\partial \Delta \delta} \sim b V_0 V_1$$

$$\frac{\partial P}{\partial V_1} = g V_0 + b V_0 \Delta \delta$$

$$\frac{\partial P}{\partial V_0} = g V_1 - 2 V_0 + b V_1 \Delta \delta$$

$$\Delta \delta \sim 0, \quad g \ll b \Rightarrow \frac{\partial P}{\partial V_i} \ll \frac{\partial P}{\partial \Delta \delta}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \Delta \delta} = g V_0 V_1 \sim g$$

$$\frac{\partial Q}{\partial V_0} = -b V_1 + 2b V_0 + g V_1 \Delta \delta$$

$$\sim b$$

$$\frac{\partial Q}{\partial V_1} = b V_0 + g V_0 \Delta \delta$$

$$\sim b \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial \Delta \delta} \ll \frac{\partial Q}{\partial V}$$

Прирост потока активной мощности ΔP в основном определяется приростом разности узловых напряжений

Прирост потока реактивной мощности Q в основном определяется приростом напряжений

Задача поиска установившегося режима сети переменного тока

- Дано:
1. Топология и параметры элементов сети: R, X , к-ты трансформации
 2. Заданные величины модулей узловых напряжений V_j в узлах, являющихся источниками ЭДС (генерат. узлах — тип PV)
 3. Заданная величина узлового напряжения в балансирующем узле V_0, δ_0

4. Заданные мощности узловых нагрузок P_i
 $i=1, \dots, N$, Q_i , $i=\{1, \dots, N\} \setminus PV \equiv PQ$

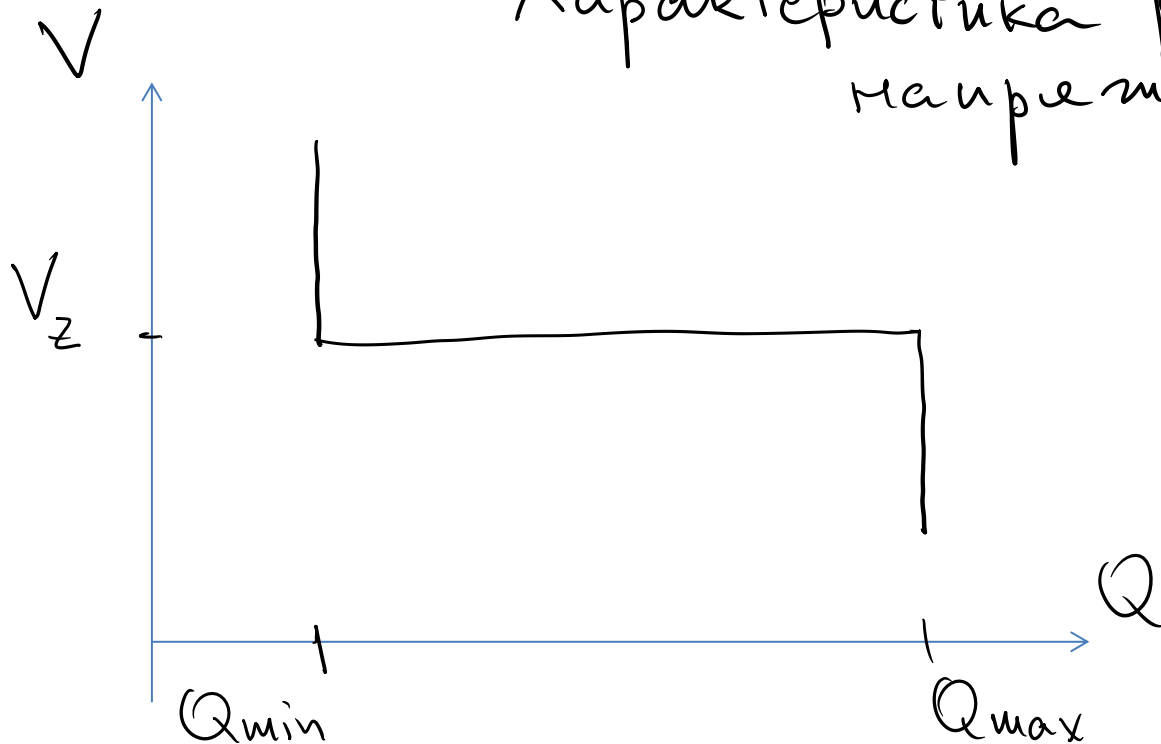
Требуется определить: вектор узловых
напряжений V_i , $i \in PQ$, δ_i , $i=1, \dots, N$;
система УУН (8.1) обращается в равенство

Размерность: $\#$ переменных $2 \cdot N - |PV| =$
 $= \#$ ур-н

Ограничение на возможность поддержания
постоянного напряжения в узлах типа PV:

$$Q \in [Q_{\min}, Q_{\max}]$$

Характеристика регулятора
напряжения



$$V < V_z \Rightarrow Q = Q_{\max}$$

$$V > V_z \Rightarrow Q = Q_{\min}$$