

# Режими на работа на ЕЕС

## Вовед

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи  
Факултет за електротехника и информациски технологии  
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk  
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2017

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

1 / 7

## Област на изучување

Во предметот се разгледуваат стационарни работни режими во ЕЕС

- пресметка на напони и распределба на моќности, проверка на техничките услови за работа на системот
  - ▶ превисоки или прениски напони,
  - ▶ преоптоварени елементи од преносната мрежа,
  - ▶ проверка на работните режими на генераторите.
- одредување оптимални режими на работа
  - ▶ регулација на моќности и напони кај генераторите,
  - ▶ регулација на напон кај трансформаторите,
  - ▶ регулација на компензационите уреди,
  - ▶ вклучување и исклучување на елементи од системот.

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

2 / 7

## Параметри на ЕЕС

Состојба во системот е опишана со два типа параметри

- **мрежни параметри:** параметри на елементите на системот и нивна поврзаност
  - ▶ физичките карактеристики на елементите на мрежата кои се практично константни
- **режимски параметри:** параметри на режимот на работа на системот
  - ▶ моќности на потрошувачите и генераторите,
  - ▶ напони на јазлите,
  - ▶ моќностите во елементите од системот,
  - ▶ фреквенцијата
    - ★ режимските параметри непрекинато се менуваат
    - ★ системот постојано осцилира околу некоја рамнотежна положба
    - ★ при преодни процеси (куса врска, исклучување на генератор, потрошувач или вод) се преминува во нова стационарна со нови режимски параметри

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

3 / 7



## Цел на предметот (2)

- многу е важно да се усвои критички однос кон резултатите кои се добиени со некоја компјутерска програма
  - ▶ во програмата може да има грешка
  - ▶ во влезните податоци може да има грешка
  - ▶ откривањето на „дефекти“ во добиеното решение се учи со вежбање
- примена на Matlab за решавање на проблемите
  - ▶ Matlab е применуван и во други курсеви на студиите и студентите се веќе запознаени со него
  - ▶ програмирањето во Matlab е практично идентично со програмирањето во GNU Octave (бесплатен софтвер)

# Режими на работа на ЕЕС

## Дијаграм на оптоварување и крива на траење на оптоварување

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи  
Факултет за електротехника и информациски технологии  
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk  
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2017

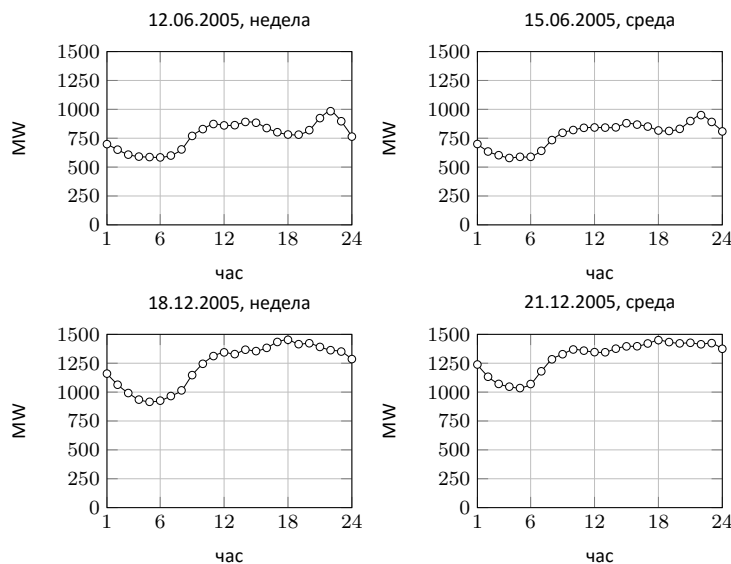
MT (ПЕЕС) PEES Скопје, 2017 1 / 14

### Основни разгледувања

- дијаграмот на оптоварување ја дава хронолошка зависност на моќноста на потрошувачот од времето
  - ▶ дневен дијаграм
  - ▶ неделен дијаграм
  - ▶ месечен дијаграм
  - ▶ годишен дијаграм
- обликот на дијаграмот зависи од природата на потрошувачите, процентуалното учество на одделните потрошувачи во вкупната потрошувачка и од периодот во годината
- моќноста на потрошувачите која се црта на дијаграмот е средна вредност измерена за 15, 30 или 60 минути

MT (ПЕЕС) PEES Скопје, 2017 2 / 14

### Дневни дијаграми во ЕЕС на Македонија

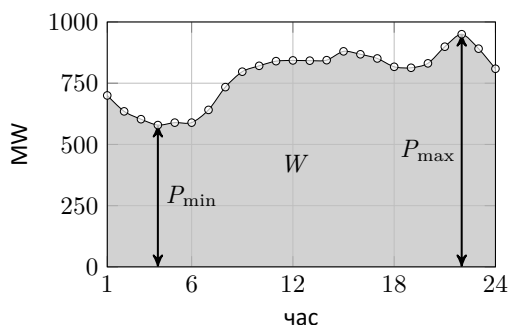


MT (ПЕЕС) PEES Скопје, 2017 3 / 14

## Основните големини на дијаграмот на оптоварување

- минимална моќност  $P_{\min}$
- максимална моќност  $P_{\max}$
- енергија  $W$ , т.е. површина под кривата на дијаграмот

$$W = \sum_i P_i \cdot \Delta t_i$$



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

4 / 14

## Други карактеристични показатели на дијаграмот на оптоварување

- средно оптоварување  $P_{\text{ср.}} = \frac{W}{T}$
- време на максимална моќност  $T_{\text{max}} = \frac{W}{P_{\text{max}}}$
- однос на минимумот и максимумот  $m = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$
- варијабилна моќност  $P_v = P_{\max} - P_{\min}$
- константна енергија  $W_k = P_{\min} \cdot T$
- варијабилна енергија  $W_v = W - W_k$

MT (ПЕЕС)

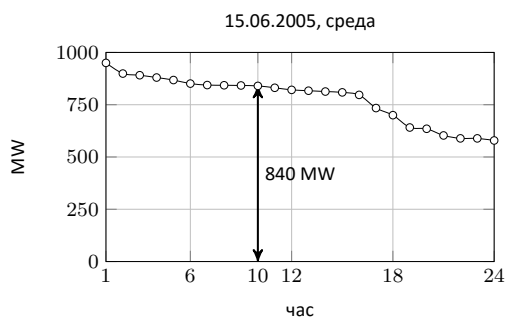
ПЕЕС

Скопје, 2017

5 / 14

## Крива на траење на оптоварувањето

- оптоварувањето подредено по големина
- ги задржува основните големини како и дијаграмот на оптоварување
- се губи информацијата за хронолошката промена на оптоварувањето



$P \geq 840 \text{ MW}$  се појавува во 10 часови во денот

MT (ПЕЕС)

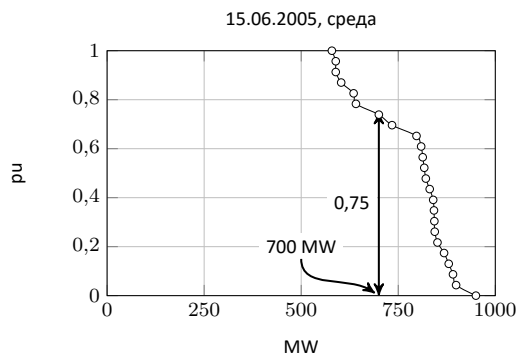
ПЕЕС

Скопје, 2017

6 / 14

## Инверзна крива на траење на оптоварувањето

- на хоризонталната оска се моќностите, а на вертикалната оска е времето изразено во релативни единици
- крива на веројатноста за појавување на одредена моќност



веројатноста за појава на  $P \geq 700$  MW изнесува 0,75

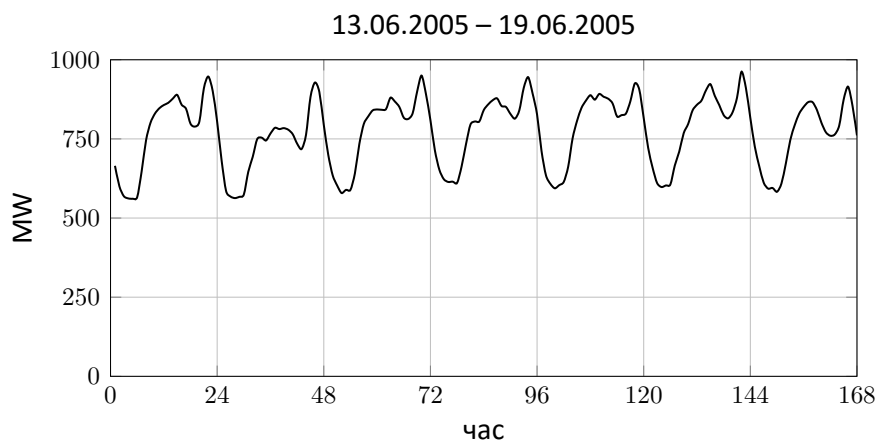
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

7 / 14

## Неделен дијаграм на оптоварување



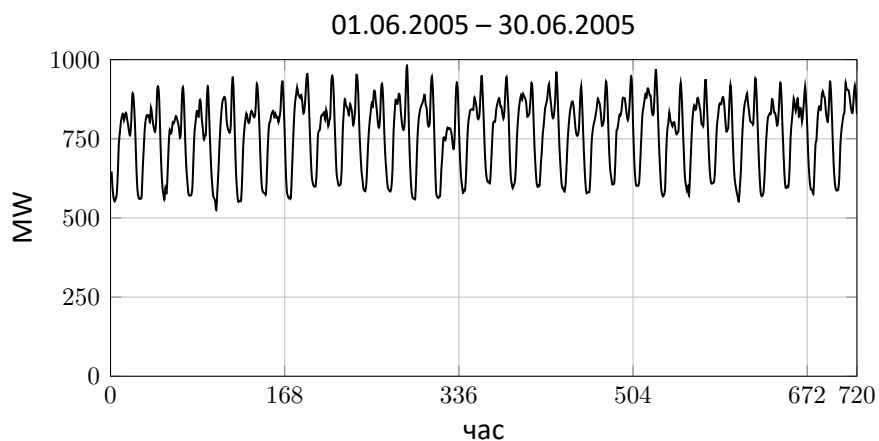
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

8 / 14

## Месечен дијаграм на оптоварување



MT (ПЕЕС)

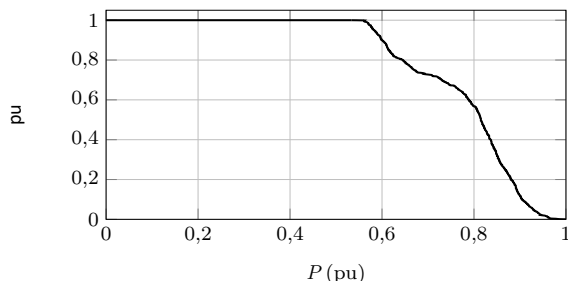
ПЕЕС

Скопје, 2017

9 / 14

## Апроксимација на кривата на траење на оптоварување

- нормализираната инверзна крива на траење на оптоварувањето  $P$  (pu)
- точка  $i$  со моќност  $P_i$   $y_i = \frac{i-1}{N-1}$ ,  $x_i = \frac{P_i}{P_{\max}}$
- полином  $f(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_N \cdot x^N$



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

10 / 14

## Ограничувања

- кривата треба да минува низ точките кои одговараат на  $P_{\min}$  и  $P_{\max}$

$$f(P_{\min}/P_{\max}) = f(m) = 1$$

$$f(P_{\max}/P_{\max}) = f(1) = 0$$

- површината под кривата треба да биде еднаква со  $W$

$$W = W_k + W_v = \left[ m \cdot 1 + \int_m^1 f(x) dx \right] \cdot P_{\max} \cdot T$$

- трапезно правило за интеграција

$$W = \left( \frac{y_1 + y_n}{2} + \sum_{i=2}^{n-2} y_i \right) \cdot \frac{1}{n-1} \cdot P_{\max} \cdot T$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

11 / 14

## Метод на најмали квадрати

$$F = \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 \cdot x_i + a_2 \cdot x_i^2 + \dots + a_N \cdot x_i^N - y_i)^2 +$$

$$+ \lambda (a_0 + a_1 \cdot m + a_2 \cdot m^2 + \dots + a_N \cdot m^N - 1) +$$

$$+ \mu (a_0 + a_1 + a_2 + \dots + a_N) +$$

$$+ \rho \left[ a_0 (1-m) + \frac{a_1}{2} (1-m^2) + \dots + \frac{a_N}{N+1} (1-m^{N+1}) - \frac{W}{P_{\max} \cdot T} + m \right]$$

$$\frac{\partial F}{\partial a_k} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 \cdot x_i + a_2 \cdot x_i^2 + \dots + a_N \cdot x_i^N - y_i) \cdot x_i^k +$$

$$+ \lambda \cdot m^k + \mu + \frac{1}{k+1} \cdot \rho \cdot (1-m^{k+1}) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, N,$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = a_0 + a_1 \cdot m + a_2 \cdot m^2 + \dots + a_N \cdot m^N - 1 = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial \mu} = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial \rho} = a_0 (1-m) + \frac{a_1}{2} (1-m^2) + \dots + \frac{a_N}{N+1} (1-m^{N+1}) - \frac{W}{P_{\max} \cdot T} + m = 0,$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

12 / 14

## Програма за апроксимација на кривата (1)

```
../programi/dijagram_polinom.m
1 function a = dijagram_polinom(datoteka,N)
2 x = load(datoteka); n = length(x); T = n;
3 x = sort(x,'descend');
4 Pmax = x(1); Pmin = x(end); m = Pmin/Pmax;
5 W = (x(1)+x(2))/2 + sum(x(2:end));
6 x = x/Pmax;
7 y = ((1:n)' - 1)/(n - 1);
8 A = zeros(N+1);
9 for i = 1:N+1
10     for j = 1:N+1
11         A(i,j) = sum(x.^(i+j-2));
12     end
13 end
14 C = ones(3,N+1);
15 for i = 1:N+1
16     C(1,i) = m^(i-1);
17     C(3,i) = (1-m^i)/i;
18 end
19 A = [
20     A C'/2
21     C zeros(3)
22     ];
23 B = zeros(N+1,1);
24 for i = 1:N+1
25     B(i) = sum(x.^(i-1).*y);
```

Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

13 / 14

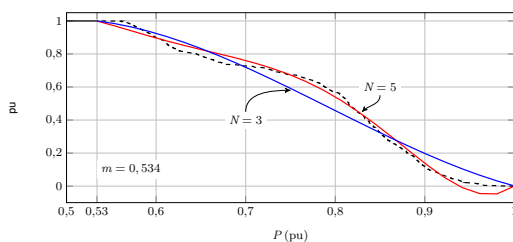
## Програма за апроксимација на кривата (2)

```
26 end
27 B = [B; 1; 0; W/(Pmax*T)-m];
28 c = A\B;
29 a = c(1:N+1)';
30 yp = polyval(a(N+1:-1:1),x);
31 plot(x,[y yp]); grid;
```

```
>> a = dijagram_polinom('juni_2005.txt',3)
```

```
a =
-2.3891  16.2038 -23.7835  9.9688
```

$$f(x) = -2,389 + 16,204 \cdot x - 23,783 \cdot x^2 + 9,969 \cdot x^3$$



Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

14 / 14



# Режими на работа на ЕЕС

## Трошоци за работа на генераторите во термоцентралите

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи  
Факултет за електротехника и информациски технологии  
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk  
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2017

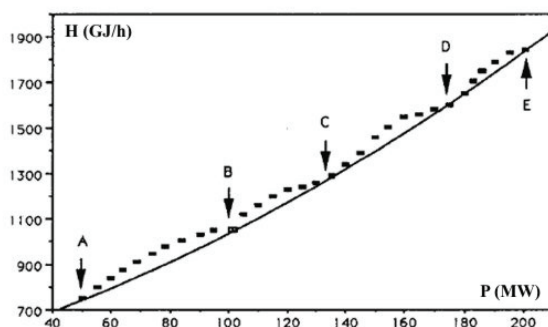
МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

1 / 33

### Карактеристиката на производните трошоци



Апроксимација со парабола

$$f = a + b \cdot P_G + c \cdot P_G^2,$$

$$P_G^{\min} \leq P_G \leq P_G^{\max}$$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

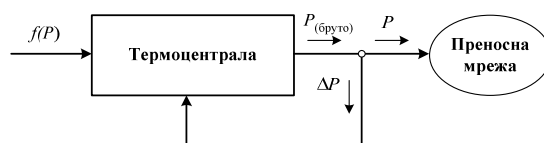
Скопје, 2017

2 / 33

### Бруто и нето моќност

- Моќноста на генераторот  $P$  која се појавува во изразот е моќноста која што тој ја оддава во преносната мрежа

$$f = a + b \cdot P_G + c \cdot P_G^2,$$



- Одредувањето на  $a$ ,  $b$  и  $c$  се прави со примена на методот на најмали квадрати користејќи податоците добиени со мерењето на потрошувачката на топлина

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

3 / 33

## Одредување на $a$ , $b$ и $c$

- Дадени се податоци од мерењето на потрошувачката на топлина на една термоцентрали изразени во kJ/kWh

$P_G$ (MW)	70	75	112,5	150
$H$ (kJ/kWh)	8200	8150	7965	7955

- Метод на најмали квадрати

$$\min F = \sum_{i=1}^n (a + b \cdot P_{Gi} + c \cdot P_{Gi}^2 - H_i)^2,$$

$$\frac{\partial F}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (a + b \cdot P_{Gi} + c \cdot P_{Gi}^2 - H_i) = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (a + b \cdot P_{Gi} + c \cdot P_{Gi}^2 - H_i) \cdot P_{Gi} = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^n (a + b \cdot P_{Gi} + c \cdot P_{Gi}^2 - H_i) \cdot P_{Gi}^2 = 0,$$

## Одредување на $a$ , $b$ и $c$ [ $H$ (kJ/kWh)]

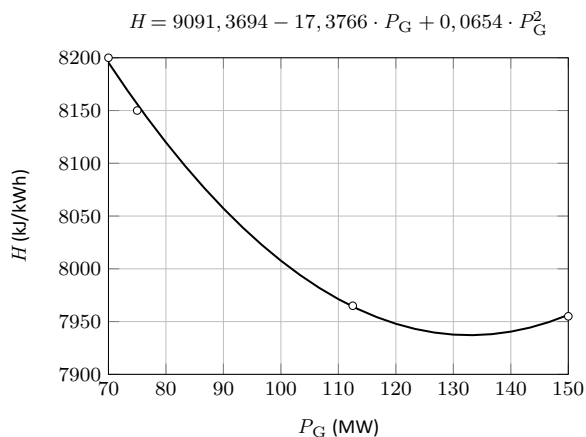
../programi/odredi\_abc.m

```
1 PG = [70 75 112.5 150];
2 H = [8200 8150 7965 7955];
3 A = zeros(3,3);
4 for i = 1:3
5     for j = 1:3
6         A(i,j) = sum(PG.^(i+j-2));
7     end
8 end
9 B = zeros(3,1);
10 for i = 1:3
11     B(i) = sum(H.*PG.^(i-1));
12 end
13 koeficienti = A\B; fprintf('%%.4f\n',koeficienti)
```

```
PG = [70 75 112.5 150];
H = [8200 8150 7965 7955];
koeficienti = polyfit(PG,H,2);
```

резултат:  $a = 9091,3694$ ;  $b = -17,3766$  и  $c = 0,0654$ .

## Одредување на $a$ , $b$ и $c$ [ $H$ (kJ/kWh)]



## Одредување на $a$ , $b$ и $c$ [ $H$ (GJ/h)]

- За да ја изразиме потрошувачка на топлина во GJ/h наместо во kJ/kWh треба секоја вредност на  $H$  да ја помножиме со  $P$

$$H_1' = H_1 \cdot P_{G,1} = 8200 \cdot 70 \cdot 10^3 = 574 \cdot 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 574 \frac{\text{GJ}}{\text{h}}$$

$P_G$ (MW)	70	75	112,5	150
$H$ (kJ/kWh)	8200	8150	7965	7955
$H'$ (GJ/h)	574	611,25	896,0625	1193,25

- На идентичен начин како претходно го добиваме следниот резултат:  $a = 77,946$ ;  $b = 6,7835$  и  $c = 0,0043$

## Карактеристика на трошоци изразена во €/h

- Производ на карактеристиката на потрошувачка на топлина со цената на горивото  $K$  (€/GJ)

$$F = K \cdot f = K \cdot (a + b \cdot P_G + c \cdot P_G^2)$$

- Вообичаено цените се изразуваат на следниот начин: 20 €/t. При позната специфична содржина на топлина на горивото 8000 kJ/kg (8 GJ/t) имаме

$$K = \frac{20 \text{ €/t}}{8 \text{ GJ/t}} = 2,5 \text{ €/GJ}$$

## Пример

Една термоцентрали чија карактеристика на потрошувачка на топлина е  $f = 77,946 + 6,7835 \cdot P_G + 0,0043 \cdot P_G^2$  (GJ/h) користи лигнит чија цена изнесува  $K = 2,5$  €/GJ.

- Да се одреди карактеристиката на трошоци на термоцентралата и да се пресметаат трошоците за работа на термоцентралата со моќности од 70, 130 и 150 MW.
- Колкава ќе биде цената на произведената електрична енергија за трите зададени моќности?
- Колкави ќе бидат трошоците за работа на термоцентралата за еден ден ако во текот на целиот ден работи со моќност од 130 MW?

$$F = 2,5 \cdot (77,946 + 6,7835 \cdot P_G + 0,0043 \cdot P_G^2) = \\ = 194,87 + 16,9588 \cdot P_G + 0,0108 \cdot P_G^2 \quad (\text{€}/\text{h}),$$

$$F(70) = 194,87 + 16,9588 \cdot 70 + 0,0108 \cdot 70^2 = 1434,66 \text{ €}/\text{h}, \\ F(130) = 194,87 + 16,9588 \cdot 130 + 0,0108 \cdot 130^2 = 2581,18 \text{ €}/\text{h}, \\ F(150) = 194,87 + 16,9588 \cdot 150 + 0,0108 \cdot 150^2 = 2980,56 \text{ €}/\text{h}.$$

$$C(70) = \frac{F(70)}{70} = \frac{1434,66}{70} = 20,50 \text{ €}/\text{MWh}, \\ C(130) = \frac{F(130)}{130} = \frac{2581,18}{130} = 19,86 \text{ €}/\text{MWh}, \\ C(150) = \frac{F(150)}{150} = \frac{2980,56}{150} = 19,87 \text{ €}/\text{MWh}.$$

Вкупните трошоци за цел ден при 130 MW се  
 $2581,18 \cdot 24 = 61948,32 \text{ €}$

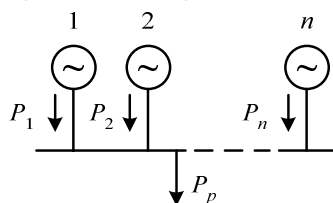
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

10 / 33

## Оптимална работа на ЕЕС составен од термоцентрали



$$F = \sum_{i=1}^n f_i = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_P \Rightarrow P_P - \sum_{i=1}^n P_{Gi} = 0$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

11 / 33

## Метод на Лагранж

$$L = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) + \lambda \left( P_P - \sum_{i=1}^n P_{Gi} \right)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = b_i + 2c_i P_{Gi} - \lambda, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = P_P - \sum_{i=1}^n P_{Gi} = 0$$

$$P_{Gi} = \frac{\lambda - b_i}{2c_i} \quad P_P - \sum_{i=1}^n \frac{\lambda - b_i}{2c_i} = 0$$

$$\lambda = \frac{2P_P + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{c_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i}}$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

12 / 33



## Пример 1

$$f_1 = 2311 + 41 \cdot 532,003 + 0,0027 \cdot 532,003^2 = 24887,31 \text{ €/h,}$$

$$f_2 = 2500 + 42 \cdot 312,136 + 0,0030 \cdot 312,136^2 = 15902,02 \text{ €/h,}$$

$$f_3 = 2417 + 43 \cdot 155,860 + 0,0028 \cdot 155,860^2 = 9187,01 \text{ €/h,}$$

$$F = f_1 + f_2 + f_3 = 49976,34 \text{ €/h}$$

## Пример 2

За колку ќе се зголемат трошоците за работа на системот од примерот 1 ако моќноста на потрошувачите се зголеми за 1 MW?

$$P_{G1} = 532,352 \text{ MW,} \quad f_1 = 24902,63 \text{ €/h,}$$

$$P_{G2} = 312,451 \text{ MW,} \quad f_2 = 15915,80 \text{ €/h,}$$

$$P_{G3} = 156,197 \text{ MW,} \quad f_3 = 9201,78 \text{ €/h,}$$

$$F = 50020,21 \text{ €/h.}$$

$\Delta F = 50020,21 - 49976,34 = 43,87 \text{ €/h}$ , што е бројно еднакво со вредноста на  $\lambda$

## Пример 3

Во системот од примерот 1 се појавил купувач кој сака да купи електрична енергија по цена од 44 €/MWh. Колкава дополнителна моќност треба да се произведе и да се продаде на купувачот? Колкава е заработката од продажбата?

сметајќи дека е  $\lambda = 44 \text{ €/MWh}$  добиваме

$$P_{G1} = \frac{44 - 41}{2 \cdot 0,0027} = 555,556 \text{ MW,}$$

$$P_{G2} = \frac{44 - 42}{2 \cdot 0,0030} = 333,333 \text{ MW,}$$

$$P_{G3} = \frac{44 - 43}{2 \cdot 0,0028} = 178,571 \text{ MW.}$$

$$P'_P = P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} = 1067,46 \text{ MW,}$$

$$P_{\text{дополнително}} = P'_P - P_P = 1067,46 - 1000 = 67,46 \text{ MW.}$$

## Пример 3

трошоци

$$f_1 = 2311 + 41 \cdot 555,556 + 0,0027 \cdot 555,556^2 = 25922,13 \text{ €/h,}$$

$$f_2 = 2500 + 42 \cdot 333,333 + 0,0030 \cdot 333,333^2 = 16833,32 \text{ €/h,}$$

$$f_3 = 2417 + 43 \cdot 178,571 + 0,0028 \cdot 178,571^2 = 10184,84 \text{ €/h,}$$

$$F = f_1 + f_2 + f_3 = 52940,29 \text{ €/h.}$$

заработка

$$\Delta F = 67,46 \cdot 44 = 2968,24 \text{ €/h,}$$

вкупните трошоци за работа намалени за заработката

$$F' = F - \Delta F = 52940,29 - 2968,24 = 49972,05 \text{ €/h.}$$

заработка во однос на примерот 1

$$49976,34 - 49972,05 = 4,29 \text{ €/h}$$

MT (ПЕЕС)

PEEC

Скопје, 2017

19 / 33

## Пример 4

Да се реши примерот 1 ако моќноста на потрошувачите во системот изнесува  $P_P = 1300 \text{ MW}$ .

$$P_{G1} = 636,741 \text{ MW} > P_{G1}^{\max}$$

$$P_{G2} = 406,401 \text{ MW,}$$

$$P_{G3} = 256,858 \text{ MW,}$$

$$P_{G1} = 600 \text{ MW}$$

$$P_P = 1300 - 600 = 700 \text{ MW}$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 1000 + \frac{42}{0,0030} + \frac{43}{0,0028}}{\frac{1}{0,0030} + \frac{1}{0,0028}} = 44,54 \text{ €/MWh,}$$

MT (ПЕЕС)

PEEC

Скопје, 2017

20 / 33

## Пример 4

$$P_{G2} = \frac{44,54 - 42}{2 \cdot 0,0030} = 424,138 \text{ MW,}$$

$$P_{G3} = \frac{44,54 - 43}{2 \cdot 0,0028} = 275,862 \text{ MW.}$$

$$f_1 = 2311 + 41 \cdot 600 + 0,0027 \cdot 600^2 = 27883,00 \text{ €/h,}$$

$$f_2 = 2500 + 42 \cdot 424,138 + 0,0030 \cdot 424,138^2 = 20853,47 \text{ €/h,}$$

$$f_3 = 2417 + 43 \cdot 275,862 + 0,0028 \cdot 275,862^2 = 14492,15 \text{ €/h,}$$

$$F = f_1 + f_2 + f_3 = 63228,62 \text{ €/h.}$$

MT (ПЕЕС)

PEEC

Скопје, 2017

21 / 33

## Квадратно програмирање во Matlab

$$\min_x \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{f}^T \mathbf{x}$$

со следните ограничувања

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b},$$

$$\mathbf{A}_{\text{eq}} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_{\text{eq}},$$

$$\mathbf{lb} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{ub},$$

`[x,fval,exitflag,output,lambda] = quadprog(H,f,A,b,Aeq,beq,lb,ub)`

../programi/ed\_3.m

```
1 function ees = ed_3()
2 ees.PP = 1300;
3 ees.generatori = [
4 % broj Pmin(MW) Pmax(MW) a(E/h) b(E/MWh) c(E/MWh^2)
5 1 200 600 2311 41 0.0027
6 2 200 500 2500 42 0.0030
7 3 100 300 2417 43 0.0028
8 ];
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

22 / 33

## Задавање на функцијата и ограничувањата

$$\mathbf{H} = 2 \cdot \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \mathbf{P}_G$$

$$\frac{1}{2} \mathbf{P}_G^T \mathbf{H} \mathbf{P}_G + \mathbf{f}^T \mathbf{P}_G = c_1 P_{G1}^2 + c_2 P_{G2}^2 + c_3 P_{G3}^2 + b_1 P_{G1} + b_2 P_{G2} + b_3 P_{G3}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}_G = P_P$$

../programi/ek\_disp.m

```
1 function [PG,F,exitflag,output,lambda] = ek_disp(datoteka)
2 if isstruct(datoteka)
3     ees = datoteka;
4 else
5     ees = feval(datoteka);
6 end
7 G = ees.generatori; NG = size(G,1);
8 [PGmin,PGmax,a,b,c] = deal(G(:,2),G(:,3),G(:,4),G(:,5),G(:,6));
9 [PG,F,exitflag,output,lambda] = ...
10 quadprog(2*diag(c),b,[],[],ones(1,NG),ees.PP,PGmin,PGmax);
11 F = F + sum(a);
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

23 / 33

```
[PG,F,exitflag,output,lambda] = ek_disp('ed_3')
```

```
PG =
    600.0000
    424.1379
    275.8621
F =
    6.3229e+004
exitflag =
     1
lambda.eqlin
   -44.5448
```

бидејќи е `exitflag = 1` процесот конвергирал кон оптималното решение

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

24 / 33



## Пример 5

Во табелата се дадени податоци за карактеристиките на генераторите во еден ЕЕС кој се состои од 3 генератори. Со примена на квадратно програмирање да се одредат моќностите на генераторите така што вкупните трошоци во системот да бидат минимални, а потоа да се пресметаат трошоците за три различни вредности на моќноста на потрошувачите 900 MW, 1100 MW и 1300 MW.

Бр.	$P_G^{\min}$ (MW)	$P_G^{\max}$ (MW)	$a$ (€/h)	$b$ (€/MWh)	$c$ (€/MW <sup>2</sup> h)
1	200	700	2300	40	0,0027
2	200	500	2600	42	0,0030
3	100	300	2417	43	0,0028

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 25 / 33

## Пример 5

../programi/ed\_4.m

```

1 function ees = ed_4()
2 ees.PP = 1300;
3 ees.generatori = [
4 % broj Pmin(MW) Pmax(MW) a(E/h) b(E/MWh) c(E/MWh^2)
5 1 200 700 2300 41 0.0027
6 2 200 500 2600 42 0.0030
7 3 100 300 2417 43 0.0028
8 ];

```

../programi/ed\_4\_resenie.m

```

1 PP = [900 1100 1300];
2 PG3 = zeros(3,3);
3 ees = ed_4;
4 for i = 1:3
5     ees.PP = PP(i);
6     [PG,F,exitflag] = ek_disp(ees);
7     PG3(:,i) = PG;
8 end

```

```

PG3 =
497.0906 566.9160 636.7415
280.7149 343.5578 406.4007
122.1945 189.5262 256.8579

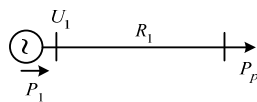
```

MT (ПЕЕС)

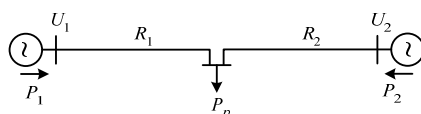
ПЕЕС

Скопје, 2017 26 / 33

## Систем со загуби на моќност во преносот



$$\Delta P = \Delta P_1 = \frac{P_{G1}^2}{U_1^2 \cos^2 \varphi} \cdot R_1 = B_{11} P_{G1}^2$$



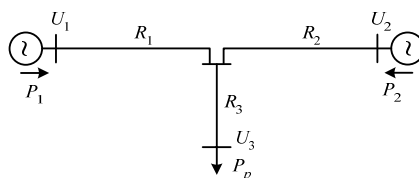
$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = \frac{P_{G1}^2}{U_1^2 \cos^2 \varphi} \cdot R_1 + \frac{P_{G2}^2}{U_2^2 \cos^2 \varphi} \cdot R_2 = B_{11} P_{G1}^2 + B_{22} P_{G2}^2$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 27 / 33

## Систем со загуби на моќност во преносот



$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = \frac{P_{G1}^2}{U_1^2 \cos^2 \varphi} \cdot R_1 + \frac{P_{G2}^2}{U_2^2 \cos^2 \varphi} \cdot R_2 + \frac{P_P^2}{U_3^2 \cos^2 \varphi} \cdot R_3$$

$$P_P = P_{G1} + P_{G2}$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{P_{G1}^2}{U_1^2 \cos^2 \varphi} \cdot R_1 + \frac{P_{G2}^2}{U_2^2 \cos^2 \varphi} \cdot R_2 + \frac{(P_{G1} + P_{G2})^2}{U_3^2 \cos^2 \varphi} \cdot R_3 = \\ &= B_{11} P_{G1}^2 + 2B_{12} P_{G1} P_{G2} + B_{22} P_{G2}^2. \end{aligned}$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

28 / 33

## Систем со загуби на моќност во преносот

Во општ случај загубите се

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{i=1}^n B_{i0} P_{Gi} + B_{00}.$$

За ЕЕС со 3 вода (претходен слајд) се познати следните податоци  $R_1 = 4 \Omega$ ,  $R_2 = 4 \Omega$ ,  $R_3 = 2 \Omega$ ,  $U_1 = 112 \text{ kV}$ ,  $U_2 = 111,9 \text{ kV}$  и  $U_3 = 108,2 \text{ kV}$ . Да се одреди изразот за пресметка на загубите на активна моќност во системот и потоа да се пресметаат загубите за случајот кога е  $P_P = 100 \text{ MW}$ ,  $P_{G1} = 50 \text{ MW}$  и  $P_{G2} = 50 \text{ MW}$ . Да се земе дека факторот на моќност е  $\cos \varphi = 1$ .

$$\Delta P = \frac{P_{G1}^2}{U_1^2} \cdot R_1 + \frac{P_{G2}^2}{U_2^2} \cdot R_2 + \frac{(P_{G1} + P_{G2})^2}{U_3^2} \cdot R_3$$

$$\Delta P = 0,000490 \cdot P_{G1}^2 + 0,000342 \cdot P_{G1} \cdot P_{G2} + 0,000490 \cdot P_{G2}^2.$$

$$\Delta P = 0,000490 \cdot 50^2 + 0,000342 \cdot 50 \cdot 50 + 0,000490 \cdot 50^2 = 3,304 \text{ MW}.$$

Точна вредност  $\Delta P = 3,416 \text{ MW}$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

29 / 33

## Оптимизација во систем со загуби на моќност

$$F = \sum_{i=1}^n f_i = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2),$$

$$P_P + \Delta P - \sum_{i=1}^n P_{Gi} = 0,$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}.$$

Лагранжова функција и нејзини парцијални изводи

$$L = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) + \lambda \left( P_P + \Delta P - \sum_{i=1}^n P_{Gi} \right),$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = b_i + 2c_i P_{Gi} + \lambda \cdot \left( \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Gi}} - 1 \right) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = P_P + \Delta P - \sum_{i=1}^n P_{Gi} = 0.$$

системот равенки е нелинеарни,  $\Delta P = f(P_{G1}, \dots, P_{Gn})$ .

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

30 / 33

## Пример 6

Во табелата се дадени податоци за карактеристиките на два генератори, при што моќноста на сите потрошувачи во системот изнесува  $P_P = 1000$  MW. За пресметување на загубите во системот важи следната релација  $\Delta P = 0,00015 \cdot P_{G1}^2$ . Да се одредат моќностите на генераторите така што вкупните трошоци во системот да бидат минимални.

Бр.	$P_G^{\min}$ (MW)	$P_G^{\max}$ (MW)	$a$ (€/h)	$b$ (€/MWh)	$c$ (€/MW <sup>2</sup> h)
1	200	800	462,3	8,28	0,00053
2	200	800	483,4	8,65	0,00056

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_{G1}} = 0,0003 \cdot P_{G1},$$
$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_{G2}} = 0.$$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

31 / 33

## Пример 6

$$8,28 + 0,00106 \cdot P_{G1} = \lambda \cdot (1 - 0,0003 \cdot P_{G1}),$$
$$8,65 + 0,00112 \cdot P_{G1} = \lambda$$

$$8,28 + 0,00106 \cdot P_{G1} = (8,65 + 0,00112 \cdot P_{G1}) \cdot (1 - 0,0003 \cdot P_{G1})$$

$$P_{G1} + P_{G2} = 1000 + 0,00015 \cdot P_{G1}^2.$$

$P_{G2}$  од втората се заменува во првата равенка, смена  $x = 10^{-3} P_{G1}$

$$x^3 - 10x^2 + 101,4x - 29,56 = 0.$$

`P = [1 -10 101.4 -29.56];`  
`roots(P)`

$$x = 0,30014 \quad P_{G1} = 1000 \cdot x = 300,14 \text{ MW}$$

$$P_{G2} = 1000 - 300,14 + 0,00015 \cdot 300,14^2 = 713,37 \text{ MW}.$$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

32 / 33

## Забелешка

- Примерот 6 не може да се реши со квадратно програмирање (има нелинеарни ограничувањата)
- Примерот 6 може да се реши со нелинеарно програмирање, `fmincon` во Matlab, но тоа тука нема да го разгледуваме од две причини
  - ▶ Понатаму ќе разгледуваме оптимизација на ЕЕС со комплетен модел на преносната мрежа (загуби, напони, оптовареност на гранките),
  - ▶ Кај преносните мрежи многу е поважно да се земат предвид можните проблеми со преоптоварени гранки во мрежите кои во значителна мерка можат да го променат работниот режим, а со тоа и трошоците за работа на системот.

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

33 / 33

# Режими на работа на ЕЕС

## Решавање на преносни електроенергетски мрежи

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи  
Факултет за електротехника и информациски технологии  
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk  
pees.feit.ukim.edu.mk

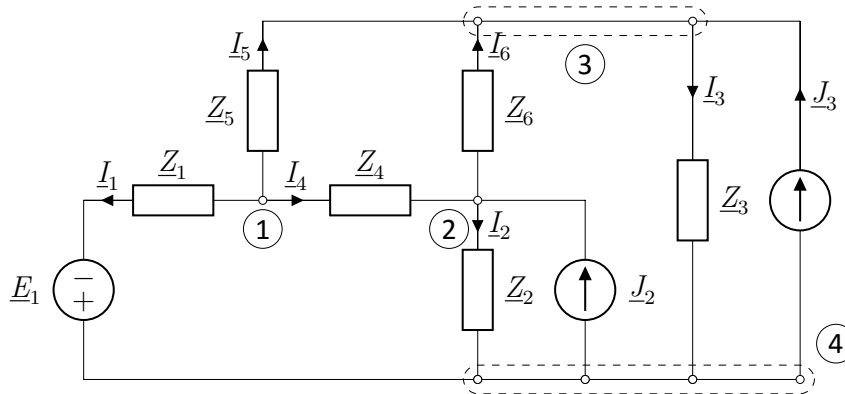
Скопје, 2017

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 1 / 51

### Метод на јазлови потенцијали



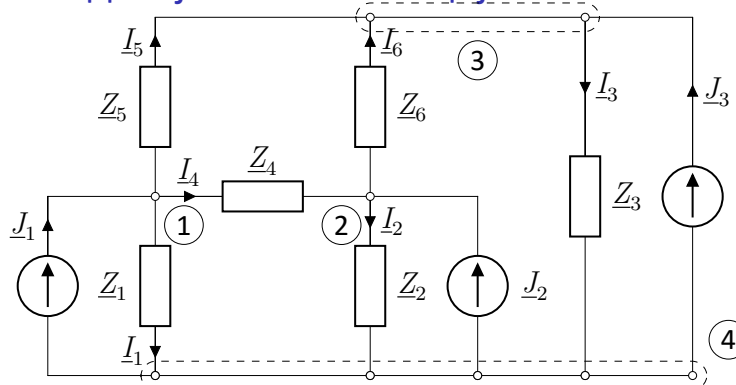
$$J_1 = \frac{E_1}{Z_1},$$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 2 / 51

### Метод на јазлови потенцијали



$$J_1 = I_1 + I_4 + I_5,$$

$$J_2 = I_2 - I_4 + I_6,$$

$$J_3 = I_3 - I_5 - I_6,$$

јазел 4:  $J_1 + J_2 + J_3 = I_1 + I_2 + I_3$  (сума од горните 3)  $\Rightarrow U_4 = 0$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 3 / 51

## Струи изразени преку напони

$$J_1 = \frac{U_1}{Z_1} + \frac{U_1 - U_2}{Z_4} - \frac{U_1 - U_3}{Z_5},$$

$$J_2 = \frac{U_2}{Z_2} - \frac{U_1 - U_2}{Z_4} + \frac{U_2 - U_3}{Z_6},$$

$$J_3 = \frac{U_3}{Z_3} - \frac{U_1 - U_3}{Z_5} - \frac{U_2 - U_3}{Z_6}.$$

$$\left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5} \right) U_1 - \frac{1}{Z_4} U_2 - \frac{1}{Z_5} U_3 = J_1,$$

$$-\frac{1}{Z_4} U_1 + \left( \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_6} \right) U_2 - \frac{1}{Z_6} U_3 = J_2,$$

$$-\frac{1}{Z_5} U_1 - \frac{1}{Z_6} U_2 + \left( \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_6} \right) U_3 = J_3,$$

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{J},$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

4 / 51

## Матрица $\underline{Y}$

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5} & -\frac{1}{Z_4} & -\frac{1}{Z_5} \\ -\frac{1}{Z_4} & \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_6} & -\frac{1}{Z_6} \\ -\frac{1}{Z_5} & -\frac{1}{Z_6} & \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_6} \end{bmatrix},$$

- елементот  $\underline{Y}_{kk}$  е еднаков на сумата на адмитанциите на сите елементи на кои им припаѓа јазелот  $k$ ,
- елементот  $\underline{Y}_{ik}$  е еднаков на сумата на адмитанциите на сите елементи што директно ги поврзуваат јазлите  $i$  и  $k$ , со променет знак.

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

5 / 51

## Метод на јазлови потенцијали – матрично

Кирхофовиот закон за струи за сите јазли одеднаш

$$\underline{J} = \underline{C} \cdot \underline{I} = \underline{C} \cdot [ I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4 \ I_5 \ I_6 ]^T$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix},$$

матрица на инциденција

$$\underline{A} = \underline{C}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

6 / 51

## Метод на јазлови потенцијали – матрично

$$\underline{U}_{GR} = \mathbf{A} \cdot \underline{U},$$

$$\underline{U}_{GR} = \mathbf{A} \cdot \underline{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_1 - U_2 \\ U_1 - U_3 \\ U_2 - U_3 \end{bmatrix},$$

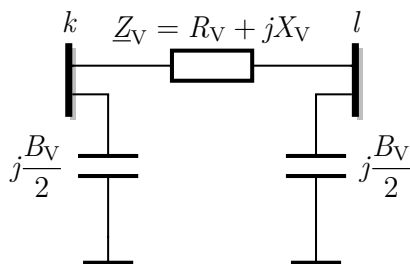
$$\underline{Z}_{GR} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_6 \end{bmatrix},$$

$$\underline{I} = \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \underline{U}_{GR} = \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \underline{U},$$

$$\underline{J} = \mathbf{A}^T \cdot \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \underline{U} \Rightarrow \underline{Y} = \mathbf{A}^T \cdot \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \mathbf{A}$$

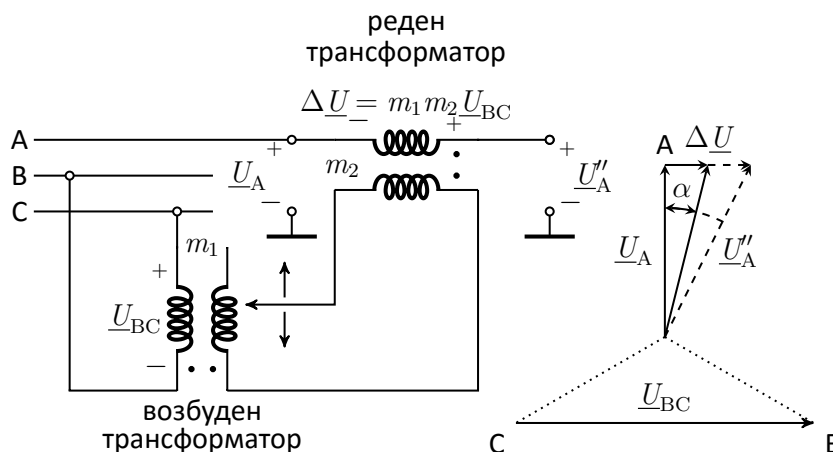
MT (PEEC) PEEC Скопје, 2017 7 / 51

## Надземни водови и кабли



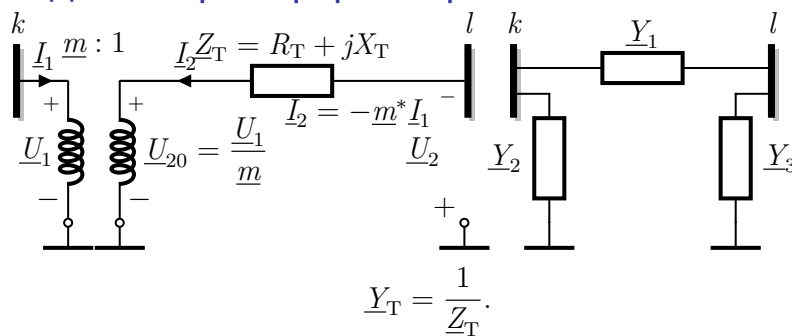
MT (PEEC) PEEC Скопје, 2017 8 / 51

## Трансформатори за изместување на фазниот агол – принципиелна шема



MT (PEEC) PEEC Скопје, 2017 9 / 51

## Модел на трансформатор



$$\underline{Y}_T = \frac{1}{\underline{Z}_T}$$

$$\underline{Y}_1 = \frac{\underline{Y}_T}{m},$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{\underline{Y}_T}{m^2} - \underline{Y}_1 = \frac{1}{m} \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \underline{Y}_T,$$

$$\underline{Y}_3 = \underline{Y}_T - \underline{Y}_1 = \left( 1 - \frac{1}{m} \right) \underline{Y}_T.$$

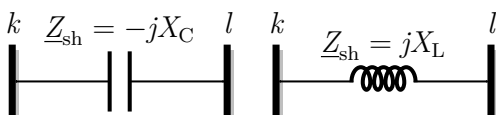
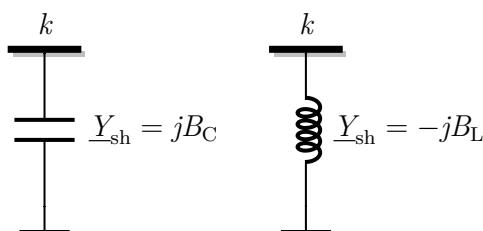
MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

10 / 51

## Напречни и надолжни компензациони елементи



MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

11 / 51

## Единечни вредности

- Надминување на проблемот на сведување на параметрите на мрежите со различни напонски нивоа.
- Единечната големина на една физичка променлива се дефинира како количник од разгледуваната променлива и базна големина која има иста димензија.
- За секоја електрична променлива се избира по една базна големина  $U_B$ ,  $I_B$ ,  $S_B$ ,  $Z_B$  и  $Y_B$ . Притоа, произволно се избираат 2, а останатите 3 се изразуваат преку усвоените нив.
- Се бира базна моќност  $S_B$  (најчесто 100 MVA), единствена за целиот ЕЕС и базен напон  $U_B$  кој се бира да биде еднаков со номиналниот напон на мрежата.

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B}, \quad Z_B = \frac{U_B^2}{S_B}, \quad Y_B = \frac{S_B}{U_B^2}.$$

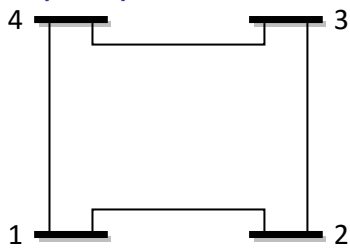
MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

12 / 51

## Формирање на матрицата на $\underline{Y}$



Број	Гранка	$R_V (\Omega)$	$X_V (\Omega)$	$B_V (\mu S)$
1	1 – 2	12,1	24,2	330,5785
2	2 – 3	12,1	36,3	330,5785
3	3 – 4	6,05	18,15	165,2893
3	4 – 1	6,05	18,15	165,2893

$$S_B = 100 \text{ MVA} \quad U_B = 110 \text{ kV}$$

$$Z_B = \frac{110^2}{100} = 121 \Omega$$

MT (ПЕЕС)

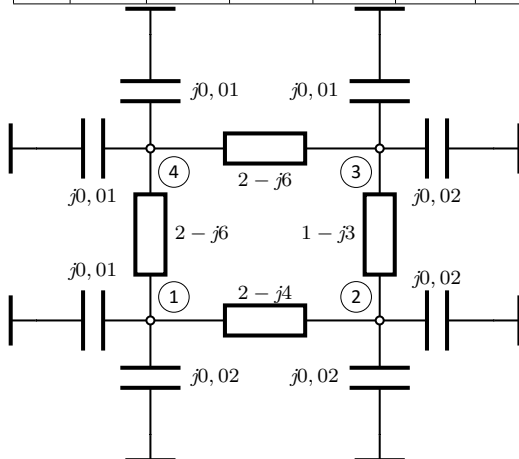
PEEC

Скопје, 2017

13 / 51

## Формирање на матрицата на $\underline{Y}$

Број	Гранка	$R_V (\text{pu})$	$X_V (\text{pu})$	$B_V (\text{pu})$	$Y_1 (\text{pu})$	$Y_2 = Y_3 (\text{pu})$
1	1 – 2	0,1	0,2	0,04	$2 - j4$	$j0,02$
2	2 – 3	0,1	0,3	0,04	$1 - j3$	$j0,02$
3	3 – 4	0,05	0,15	0,02	$2 - j6$	$j0,01$
3	4 – 1	0,05	0,15	0,02	$2 - j6$	$j0,01$



MT (ПЕЕС)

PEEC

Скопје, 2017

14 / 51

## Систем поштар (1)

- Почеток

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- Гранка 1 (јазли 1 и 2)

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} 2 - j3,98 & -2 + j4 & 0 & 0 \\ -2 + j4 & 2 - j3,98 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- Гранка 2 (јазли 2 и 3)

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} 2 - j3,98 & -2 + j4 & 0 & 0 \\ -2 + j4 & 3 - j6,96 & -1 + j3 & 0 \\ 0 & -1 + j3 & 1 - j2,98 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

MT (ПЕЕС)

PEEC

Скопје, 2017

15 / 51



## Систем поштар (2)

- Гранка 3 (јазли 3 и 4)

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} 2 - j3,98 & -2 + j4 & 0 & 0 \\ -2 + j4 & 3 - j6,96 & -1 + j3 & 0 \\ 0 & -1 + j3 & 3 - j8,97 & -2 + j6 \\ 0 & 0 & -2 + j6 & 2 - j5,99 \end{bmatrix}$$

- Гранка 4 (јазли 4 и 1)

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} 4 - j9,97 & -2 + j4 & 0 & -2 + j6 \\ -2 + j4 & 3 - j6,96 & -1 + j3 & 0 \\ 0 & -1 + j3 & 3 - j8,97 & -2 + j6 \\ -2 + j6 & 0 & -2 + j6 & 4 - j11,98 \end{bmatrix}$$

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

16 / 51

## Систем поштар

../programi/maty\_primer\_1a.m

```
1 MREZA = [  
2 1 2 0.1 0.2 0.04  
3 2 3 0.1 0.3 0.04  
4 3 4 0.05 0.15 0.02  
5 4 1 0.05 0.15 0.02  
6 ];  
7 M = size(MREZA, 1);  
8 f = MREZA(:,1); t = MREZA(:,2); N = max(max(f), max(t));  
9 Y1 = 1./(MREZA(:,3) + 1j*MREZA(:,4)); Y2 = 1j*MREZA(:,5)/2; Y3 = Y2;  
10 Y = zeros(N,N);  
11 for i = 1:M  
12 j = f(i); k = t(i);  
13 Y(j,j) = Y(j,j) + Y1(i) + Y2(i);  
14 Y(k,k) = Y(k,k) + Y1(i) + Y3(i);  
15 Y(j,k) = Y(j,k) - Y1(i);  
16 Y(k,j) = Y(k,j) - Y1(i);  
17 end
```

```
Y =  
4.0000 - 9.9700i -2.0000 + 4.0000i 0.0000 + 0.0000i -2.0000 + 6.0000i  
-2.0000 + 4.0000i 3.0000 - 6.9600i -1.0000 + 3.0000i 0.0000 + 0.0000i  
0.0000 + 0.0000i -1.0000 + 3.0000i 3.0000 - 8.9700i -2.0000 + 6.0000i  
-2.0000 + 6.0000i 0.0000 + 0.0000i -2.0000 + 6.0000i 4.0000 -11.9800i
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

17 / 51

## Формирање на матрицата на $\underline{Y}$ – матрично

../programi/maty\_primer\_1b.m

```
1 MREZA = [  
2 1 2 0.1 0.2 0.04  
3 2 3 0.1 0.3 0.04  
4 3 4 0.05 0.15 0.02  
5 4 1 0.05 0.15 0.02  
6 ];  
7 M = size(MREZA, 1);  
8 f = MREZA(:,1); t = MREZA(:,2); N = max(max(f), max(t));  
9 Y1 = 1./(MREZA(:,3) + 1j*MREZA(:,4)); Y2 = 1j*MREZA(:,5)/2; Y3 = Y2;  
10 A = sparse(1:M, f, ones(M,1), M, N) - sparse(1:M, t, ones(M,1), M, N);  
11 Y = A'*sparse(1:M, 1:M, Y1)*A + sparse(f, f, Y2, N, N) + sparse(t, t, Y3, N, N);
```

```
Y =  
(1,1) 4.0000 - 9.9700i  
(2,1) -2.0000 + 4.0000i  
(4,1) -2.0000 + 6.0000i  
(1,2) -2.0000 + 4.0000i  
(2,2) 3.0000 - 6.9600i  
(3,2) -1.0000 + 3.0000i  
(2,3) -1.0000 + 3.0000i  
(3,3) 3.0000 - 8.9700i  
(4,3) -2.0000 + 6.0000i  
(1,4) -2.0000 + 6.0000i  
(3,4) -2.0000 + 6.0000i  
(4,4) 4.0000 -11.9800i
```

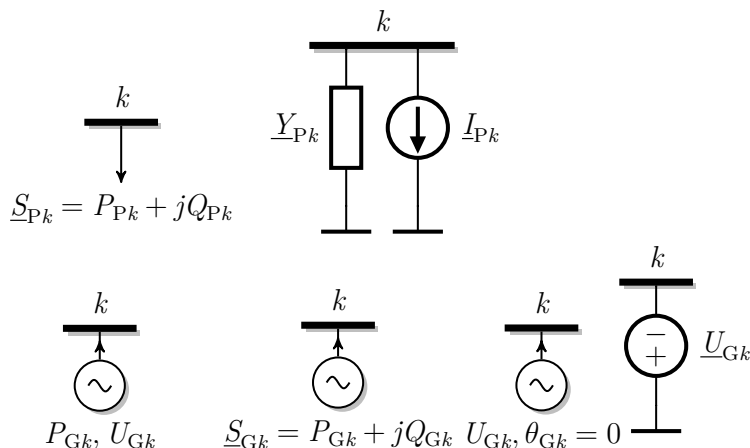
MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

18 / 51

## Потрошувачи и генератори



MT (PEEC)

PEEC

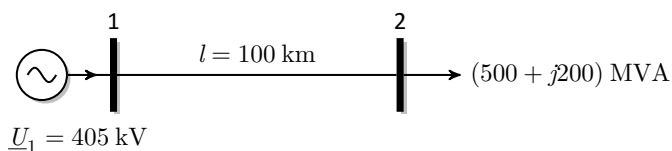
Скопје, 2017

19 / 51

### Пример 1

На сликата е прикажан наједноставен ЕЕС во кој потрошувач е напојуван преку еден 400 kV вод. Водот е со должина  $l = 100$  km, а неговите подолжни параметри се  $r = 0,032 \Omega/\text{km}$ ;  $x = 0,325 \Omega/\text{km}$  и  $b = 3,548 \mu\text{S}/\text{km}$ . Генераторот кој се наоѓа на почетокот на водот го одржува напонот на јазелот 1 на вредност  $U_1 = 405$  kV. Да се пресмета напонот на крајот на водот ако се познати активната и реактивната моќност на потрошувачот  $P_P = 500$  MW и  $Q_P = 200$  Mvar. Ќе ги разгледаме следните два случаја

- потрошувачот е претставен само со константна адмитанција  $Y_P$ ,
- потрошувачот е претставен само со константна струја  $I_P$ ,



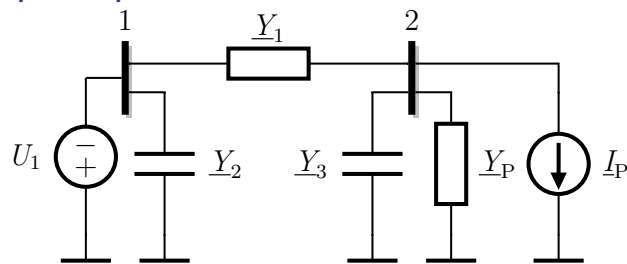
MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

20 / 51

### Пример 1



$$S_B = 100 \text{ MVA}, \quad U_B = 400 \text{ kV}, \quad Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{400^2}{100} = 1600 \Omega,$$

$$Z_V = \frac{(r + jx) \cdot l}{Z_B} = \frac{(0,032 + j0,325) \cdot 100}{1600} = (0,0020 + j0,0203) \text{ pu},$$

$$B_V = \frac{b \cdot l}{Y_B} = b \cdot l \cdot Z_B = 3,548 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 1600 = 0,5677 \text{ pu},$$

$$Y_1 = \frac{1}{Z_V} = \frac{1}{0,0020 + j0,0203} = (4,8008 - j48,7581) \text{ pu},$$

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

21 / 51

## Пример 1 – потрошувач даден со $\underline{Y}_P$

$$S_P = \underline{U}_P I_P^* = \underline{U}_P (Y_P \underline{U}_P)^* = Y_P^* U_P^2,$$

$$\underline{Y}_P = \frac{S_P^*}{U_P^2} = \frac{(5 + j2)^*}{1^2} = (5 - j2) \text{ pu.}$$

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 & -\underline{Y}_1 \\ -\underline{Y}_1 & \underline{Y}_1 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,8008 - j48,4742 & -4,8008 + j48,7581 \\ -4,8008 + j48,7581 & 9,8008 - j50,4742 \end{bmatrix} \text{ pu,}$$

$$\underline{Y}_{21} \underline{U}_1 + \underline{Y}_{22} \underline{U}_2 = 0,$$

$$\underline{U}_2 = -\frac{\underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{22}} \underline{U}_1 = -\frac{-4,8008 + j48,7581}{9,8008 - j50,4742} \cdot 1,0125 = (0,9606 - j0,0902) \text{ pu,}$$

$$U_2 = 0,9648 \text{ pu, } \theta_2 = -5,3653^\circ$$

Оценка на грешката

$$\begin{aligned} S_P &= \underline{Y}_P^* U_2^2 = (5 - j2)^* \cdot 0,9648^2 = \\ &= (4,6540 + j1,8616) \text{ pu} = (465,4 + j186,2) \text{ MVA} \\ S_P &\neq (5 + j2) \text{ pu} \end{aligned}$$

## Пример 1 – потрошувач даден со $\underline{I}_P$

$$\underline{I}_P = \left( \frac{S_P}{U_P} \right)^* = \left( \frac{5 + j2}{1} \right)^* = (5 - j2) \text{ pu.}$$

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 & -\underline{Y}_1 \\ -\underline{Y}_1 & \underline{Y}_1 + \underline{Y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,8008 - j48,4742 & -4,8008 + j48,7581 \\ -4,8008 + j48,7581 & 4,8008 - j48,4742 \end{bmatrix} \text{ pu.}$$

$$\underline{Y}_{21} \underline{U}_1 + \underline{Y}_{22} \underline{U}_2 = -\underline{I}_P,$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 &= -\frac{\underline{I}_P + \underline{Y}_{21} \underline{U}_1}{\underline{Y}_{22}} = -\frac{5 - j2 + (-4,8008 + j48,7581) \cdot 1,0125}{4,8008 - j48,4742} = \\ &= (0,9674 - j0,0987) \text{ pu,} \end{aligned}$$

$$U_2 = 0,9724 \text{ pu, } \theta_2 = -5,8244^\circ$$

Оценка на грешката

$$\begin{aligned} S_P &= \underline{U}_2 \underline{I}_P^* = (0,9674 - j0,0987) \cdot (5 - j2)^* = \\ &= (5,0343 + j1,4414) \text{ pu} = (503,4 + j144,1) \text{ MVA.} \\ S_P &\neq (5 + j2) \text{ pu} \end{aligned}$$

## Пример 1 - инјектирани струи во јазлите

$$\underline{I} = \underline{Y} \cdot \underline{U},$$

$$\underline{S} = \{\underline{U}\} \cdot \underline{I}^* = \{\underline{U}\} \cdot (\underline{Y} \cdot \underline{U})^*,$$

$$\{\underline{U}\} = \begin{bmatrix} \underline{U}_1 & 0 \\ 0 & \underline{U}_2 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \begin{bmatrix} 1,0125 & 0 \\ 0 & 0,9674 - j0,0987 \end{bmatrix} \cdot \left( \underline{Y} \cdot \begin{bmatrix} 1,0125 \\ 0,9674 - j0,0987 \end{bmatrix} \right)^* = \\ &= \begin{bmatrix} 5,0909 + j1,4560 \\ -5,0343 - j1,4414 \end{bmatrix} \text{ pu,} \end{aligned}$$

Точната вредност е  $\underline{U}_2 = (0,9552 - j0,0969) \text{ pu}$

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \begin{bmatrix} 1,0125 & 0 \\ 0 & 0,9552 - j0,0969 \end{bmatrix} \cdot \left( \underline{Y} \cdot \begin{bmatrix} 1,0125 \\ 0,9552 - j0,0969 \end{bmatrix} \right)^* = \\ &= \begin{bmatrix} 5,0608 + j2,0648 \\ -5 - j2 \end{bmatrix} \text{ pu, } \boxed{S_2 = -S_P} \end{aligned}$$

$$\Delta S = 5,0608 + j2,0648 - 5 - j2 = (0,0608 + j0,0648) \text{ pu} = (6,08 + j6,48) \text{ MVA.}$$

## Пример 1 – заклучок

Да се пресметаат напоните на јазлите во една електроенергетска мрежа значи да се одредат такви вредности на напоните со кои ќе се добијат пресметани инјектирани моќности еднакви на зададените. При тоа, зададената инјектирана моќност во еден јазел е дефинирана како разлика од моќноста на генераторите и потрошувачите во тој јазел  $\underline{S}_i = \underline{S}_{Gi} - \underline{S}_{Pi}$ .

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

25 / 51

## Пример 1 – fsolve

$$\underline{Y}_{21} \underline{U}_1 + \underline{Y}_{22} \underline{U}_2 = - \left( \frac{\underline{S}_P}{\underline{U}_2} \right)^*$$

$$(4,8008 - j48,4742) \cdot \underline{U}_2 + (-4,8008 + j48,7581) \cdot 1,0125 = - \frac{5 - j2}{\underline{U}_2^*}$$

$$\underline{U}_2 = U_2 e^{j\theta_2}$$

$$(4,8008 - j48,4742) \cdot U_2^2 + (-4,8608 + j49,3676) \cdot U_2 (\cos \theta_2 - j \sin \theta_2) = -5 + j2.$$

$$4,8008 U_2^2 + U_2 (-4,8608 \cos \theta_2 + 49,3676 \sin \theta_2) + 5 = 0,$$

$$48,4742 U_2^2 + U_2 (-4,8608 \sin \theta_2 - 49,3676 \cos \theta_2) + 2 = 0.$$

$$U_2 = x_1 \text{ и } \theta_2 = x_2.$$

../programi/vod\_1.m

```
1 function f = vod_1(x)
2 f = [
3 4.8008*x(1)^2 + x(1)*(-4.8608*cos(x(2))+49.3676*sin(x(2))) + 5
4 48.4742*x(1)^2 + x(1)*(-4.8608*sin(x(2))-49.3676*cos(x(2))) + 2
5 ];
```

x = fsolve(@vod\_1,[1 0])

x =  
0.9601 -0.1011

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

26 / 51

## Инјектирани моќности во јазлите

$$\begin{aligned} \underline{S}_i &= \underline{U}_i \left( \sum_{k=1}^N \underline{Y}_{ik} \underline{U}_k \right)^* = U_i e^{j\theta_i} \left[ \sum_{k=1}^N (G_{ik} + jB_{ik}) U_k e^{j\theta_k} \right]^* = \\ &= U_i \sum_{k=1}^N (G_{ik} - jB_{ik}) U_k (\cos \theta_{ik} + j \sin \theta_{ik}), \end{aligned}$$

$$P_i = U_i \sum_{k=1}^N U_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}),$$

$$Q_i = U_i \sum_{k=1}^N U_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}).$$

MT (PEEC)

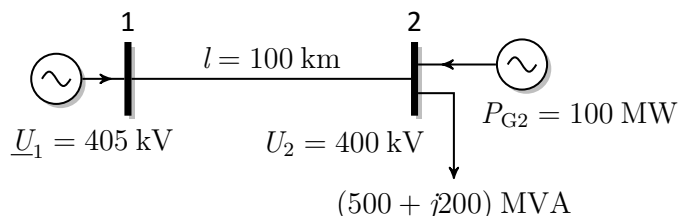
PEEC

Скопје, 2017

27 / 51

## Пример 2

Да се реши примерот 1 така што на крајот од водот, кај јазелот 2, се додава генератор чија активна моќност изнесува 100 MW и кој го одржува напонот на јазелот 2 на вредност од 400 kV. Во дадениот работен режим генераторот во јазелот 2 може да генерира реактивна моќност чија максимална вредност изнесува  $Q_{G2}^{\max} = 200 \text{ Mvar}$ .



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 28 / 51

## Пример 2

Равенка за инјектирана активна моќност во јазелот 2, бидејќи ни е дадено  $P_2 = 100 - 500 = -400 \text{ MW} = -4 \text{ pu}$

$$4,8008 U_2^2 + U_2(-4,8608 \cos \theta_2 + 49,3676 \sin \theta_2) + 4 = 0 \quad U_2 = 1$$

$$-4,8608 \cos \theta_2 + 49,3676 \sin \theta_2 + 8,8008 = 0.$$

```
f = inline('-4.8608*cos(x) + 49.3676*sin(x) + 8.8008');
x = fzero(f,0)
x =
```

-0.0802

$$\underline{U}_2 = 1 \cdot [\cos(-0,0802) + j \sin(-0,0802)] = (0,9968 - j0,0801) \text{ pu},$$

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} 1,0125 & 0 \\ 0 & 0,9968 - j0,0801 \end{bmatrix} \cdot \left( \underline{Y} \cdot \begin{bmatrix} 1,0125 \\ 0,9968 - j0,0801 \end{bmatrix} \right)^* =$$

$$= \begin{bmatrix} 4,0320 + j0,0954 \\ -4 - j0,3451 \end{bmatrix} \text{ pu}.$$

$$\underline{S}_{G2} = \underline{S}_2 + \underline{S}_{P2} = -4 - j0,3451 + 5 + j2 = (1 + j1,6549) \text{ pu} = (100 + j165,49) \text{ MVA},$$

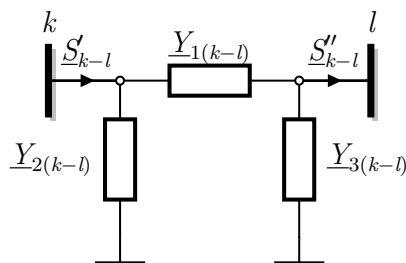
$$Q_{G2} = 165,49 \text{ Mvar} < Q_{G2}^{\max}$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 29 / 51

## Распределба на тековите на моќности



$$\underline{I}_{k-l} = \underline{Y}_{1(k-l)}(\underline{U}_k - \underline{U}_l) + \underline{Y}_{2(k-l)}\underline{U}_k,$$

$$\underline{I}'_{k-l} = \underline{Y}_{1(k-l)}(\underline{U}_k - \underline{U}_l) - \underline{Y}_{3(k-l)}\underline{U}_l,$$

$$\underline{S}'_{k-l} = \underline{U}_k (\underline{I}_{k-l})^* = \underline{U}_k [\underline{Y}_{1(k-l)}(\underline{U}_k - \underline{U}_l) + \underline{Y}_{2(k-l)}\underline{U}_k]^*,$$

$$\underline{S}_{k-l} = \underline{U}_l (\underline{I}'_{k-l})^* = \underline{U}_l [\underline{Y}_{1(k-l)}(\underline{U}_k - \underline{U}_l) - \underline{Y}_{3(k-l)}\underline{U}_l]^*.$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 30 / 51

## Пример 1 – распределба на моќности

$$\underline{Y}_1 = (4,8008 - j48,7581) \text{ pu},$$

$$\underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = j0,2838 \text{ pu},$$

$$\underline{U}_1 = 1,0125 \text{ pu},$$

$$\underline{U}_2 = (0,9552 - j0,0969) \text{ pu}.$$

$$\underline{S}'_{1-2} = 1,0125 \cdot [(4,8008 - j48,7581)(1,0125 - 0,9552 + j0,0969) + j0,2838 \cdot 1,0125]^* = (5,0608 + j2,0648) \text{ pu},$$

$$\underline{S}''_{1-2} = (0,9552 - j0,0969) \cdot [(4,8008 - j48,7581)(1,0125 - 0,9552 + j0,0969) - j0,2838 \cdot (0,9552 - j0,0969)]^* = (5 + j2) \text{ pu},$$

$$\underline{S}'_{1-2} = (506,08 + j206,48) \text{ MVA},$$

$$\underline{S}''_{1-2} = (500 + j200) \text{ MVA}.$$

MT (PEEC) PEEC Скопје, 2017 31 / 51

## Њутн-Рафсонов метод – дефиниција на проблемот

Јазел  $i$  (за  $n$  јазли имаме  $4n$  променливи)

- инјектирана активна моќност  $P_i$ ,
- инјектирана реактивна моќност  $Q_i$ ,
- ефективна вредност на напонот  $U_i$ ,
- фазен агол на напонот  $\theta_i$ .

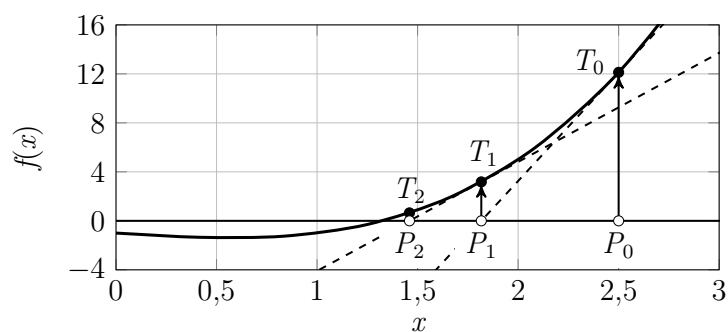
Метод на јазлови потенцијали

- $n$  комплексни равенки, т.е.  $2n$  реални равенки
- на  $2n$  променливи треба да им се зададат вредности
  - ▶ PU јазли: познати се  $P$  и  $U$
  - ▶ PQ јазли: познати се  $P$  и  $Q$  (бројот на PQ јазли е  $q$ )
  - ▶ Балансен јазел: познати се  $U$  и  $\theta$
- број на непознати:  $n - 1$  фазен агол и  $q$  напони
- $n - 1$  равенка за инјектирана активна моќност и  $q$  равенки за инјектирана реактивна моќност

MT (PEEC) PEEC Скопје, 2017 32 / 51

## Функција со една променлива

$$f(x) = x^3 - x - 1$$



$$y - f(x_0) = f'(x_0)(x - x_0), \quad y = 0,$$

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)},$$

MT (PEEC) PEEC Скопје, 2017 33 / 51

## Функција со една променлива

$$f(x) = 0,$$

$$f(x + \Delta x) \approx f(x) + f'(x)\Delta x + \frac{f''(x)}{2}\Delta x^2 + \dots = 0$$

$$\Delta x = -\frac{f(x)}{f'(x)},$$

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x_i = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}.$$

MT (PEEC) PEEC Скопје, 2017 34 / 51

## Функција со една променлива

$$x_{i+1} = x_i - \frac{x_i^3 - x_i - 1}{3x_i^2 - 1}, \quad x_0 = 2,5$$

$$x_1 = 2,5 - \frac{2,5^3 - 2,5 - 1}{3 \cdot 2,5^2 - 1} = 1,816901;$$

$$x_2 = 1,816901 - \frac{1,816901^3 - 1,816901 - 1}{3 \cdot 1,816901^2 - 1} = 1,459630;$$

$$x_3 = 1,459630 - \frac{1,459630^3 - 1,459630 - 1}{3 \cdot 1,459630^2 - 1} = 1,339045;$$

$$x_6 = 1,324718 \quad f(x_6) = 1,399 \cdot 10^{-7} < 10^{-6}$$

../programi/nr\_1dim.m

```
1 x = 2.5; konverg = false; iter = 0;
2 while (~konverg && iter < 100)
3     iter = iter + 1;
4     f = x^3 - x - 1; df = 3*x^2 - 1;
5     x = x - f/df;
6     konverg = f < 1e-6;
7 end
```

MT (PEEC) PEEC Скопје, 2017 35 / 51

## Функции со две и повеќе променливи

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_N) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

$$F_i(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) = F_i(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \Delta x_j + O(\Delta \mathbf{x}^2), \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial x_j},$$

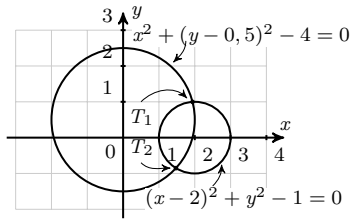
$$\mathbf{F}(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{x} + O(\Delta \mathbf{x}^2) = 0.$$

$$\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{x} = -\mathbf{F},$$

$$\mathbf{x}^{(i+1)} = \mathbf{x}^{(i)} + \Delta \mathbf{x},$$

MT (PEEC) PEEC Скопје, 2017 36 / 51

## Функции со две променливи



$$J = \begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial x_1 & \partial F_1 / \partial x_2 \\ \partial F_2 / \partial x_1 & \partial F_2 / \partial x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2(x_2 - 0,5) \\ 2(x_1 - 2) & 2x_2 \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{x}^{(0)} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$F_1 = 2^2 + (1 - 0,5)^2 - 4 = 0,25;$$

$$F_2 = (2 - 2)^2 + 1^2 - 1 = 0;$$

$$J = \begin{bmatrix} 2 \cdot 2 & 2 \cdot (1 - 0,5) \\ 2 \cdot (2 - 2) & 2 \cdot 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot \Delta \mathbf{x} = - \begin{bmatrix} 0,25 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} -0,0625 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

37 / 51

## Функции со две променливи

$$\mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{x}^{(0)} + \Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,0625 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,9375 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{x}^{(4)} = \begin{bmatrix} 1,937003 \\ 0,998014 \end{bmatrix},$$

../programi/nr\_2dim.m

```

1 x = [2; 1]; konverg = false; iter = 0;
2 while (~konverg && iter < 100)
3     iter = iter + 1;
4     F = [
5         x(1)^2 + (x(2)-0.5)^2 - 4
6         (x(1)-2)^2 + x(2)^2 - 1
7     ];
8     J = [
9         2*x(1)      2*(x(2)-0.5)
10        2*(x(1)-2)  2*x(2)
11     ];
12    x = x - J\F;
13    konverg = max(abs(F)) < 1e-6;
14 end
    
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

38 / 51

## Пресметка на елементите од Јакобијанот

$$\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \{\mathbf{I}^*\} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \boldsymbol{\theta}} + \{\mathbf{U}\} \cdot \frac{\partial \mathbf{I}^*}{\partial \boldsymbol{\theta}}.$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \mathbf{j} \cdot \{\mathbf{U}\}, \quad \frac{\partial \mathbf{I}^*}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{Y} \cdot \{\mathbf{U}\}.$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \boldsymbol{\theta}} &= \{\mathbf{I}^*\} \cdot \mathbf{j} \cdot \{\mathbf{U}\} + \{\mathbf{U}\} \cdot (\mathbf{j} \cdot \mathbf{Y} \cdot \{\mathbf{U}\})^* \\ &= \mathbf{j} \cdot \{\mathbf{U}\} \cdot (\{\mathbf{I}\} - \mathbf{Y} \cdot \{\mathbf{U}\})^* = \\ &= \mathbf{j} \cdot (\{\mathbf{S}\} - \{\mathbf{U}\} \cdot \mathbf{Y}^* \cdot \{\mathbf{U}\}^*). \end{aligned}$$

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

39 / 51



## Пресметка на елементите од Јакобијанот

$$\frac{\partial \underline{S}}{\partial \underline{U}} = \{\underline{I}^*\} \cdot \frac{\partial \underline{U}}{\partial \underline{U}} + \{\underline{U}\} \cdot \frac{\partial \underline{I}^*}{\partial \underline{U}}$$

$$\frac{\partial \underline{U}}{\partial \underline{U}} = \{\underline{U}\} \cdot \{\underline{U}\}^{-1} \quad \frac{\partial \underline{I}^*}{\partial \underline{U}} = \underline{Y} \cdot \{\underline{U}\} \cdot \{\underline{U}\}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \underline{S}}{\partial \underline{U}} &= \{\underline{I}^*\} \cdot \{\underline{U}\} \cdot \{\underline{U}\}^{-1} + \{\underline{U}\} \cdot \underline{Y}^* \cdot \{\underline{U}^*\} \cdot \{\underline{U}\}^{-1} = \\ &= \{\underline{U}\} \cdot (\{\underline{I}^*\} + \underline{Y}^* \cdot \{\underline{U}^*\}) \cdot \{\underline{U}\}^{-1} = \\ &= \{\underline{S}\} \cdot \{\underline{U}\}^{-1} + \{\underline{U}\} \cdot \underline{Y}^* \cdot \{\underline{U}^*\} \cdot \{\underline{U}\}^{-1}. \end{aligned}$$

Navigation icons

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

40 / 51

## Пресметка на елементите од Јакобијанот

$$\underline{S}^{\theta} = \frac{\partial \underline{S}}{\partial \theta} \quad \text{и} \quad \underline{S}^U = \frac{\partial \underline{S}}{\partial U},$$

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\underline{S}_{ww}^{\theta}) & \mathcal{R}(\underline{S}_{wq}^{\theta}) \\ \mathcal{I}(\underline{S}_{qw}^{\theta}) & \mathcal{I}(\underline{S}_{qq}^{\theta}) \end{bmatrix},$$

$q$  е вектор со индекси на PQ јазлите

$v$  е вектор со индекси на PU јазлите

$w$  е унија од индексите на PQ и PU јазлите

$$\underline{w} = \begin{bmatrix} q \\ v \end{bmatrix}$$

Navigation icons

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

41 / 51

## Њутн-Рафсонов метод за примерот 1

../programi/nr\_2dim\_vod\_1a.m

```

1 Y = [
2   4.8008-48.4742i   -4.8008+48.7581i
3   -4.8008+48.7581i    4.8008-48.4742i
4   ];
5 U = [1.0125; 1]; Um = U; Ua = [0; 0];
6 Sdad = [0; -5-2i];
7 konverg = false; iter = 0;
8 while (~konverg && iter < 20)
9     iter = iter + 1;
10    Spres = U .* conj(Y * U);
11    dS = Spres - Sdad;
12    F = [
13        real(dS(2))
14        imag(dS(2))
15    ];
16    konverg = norm(F, inf) < 1e-6;
17    dS_dUa = 1j*(diag(Spres) - diag(U)*conj(Y*diag(U)));
18    dS_dUm = diag(Spres./abs(U)) + diag(U)*conj(Y*diag(U./abs(U)));
19    J = [
20        real(dS_dUa(2,2))   real(dS_dUm(2,2))
21        imag(dS_dUa(2,2))  imag(dS_dUm(2,2))
22    ];
23    dx = -J\F;
24    Ua(2) = Ua(2) + dx(1);
25    Um(2) = Um(2) + dx(2);
26    U = Um .* exp(1j * Ua);
27 end

```

Navigation icons

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

42 / 51

## Податоци за системот од примерот 2

```
../programi/ees_lu.m
1 function ees = ees_lu()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.jazli = [
4 % jazel tip Ub(kV) Pp(MW) Qp(Mvar) Qsh(Mvar) oblast Umin(pu) Umax(pu)
5 1 3 400 0 0 0 1 0.9 1.1
6 2 2 400 500 200 0 1 0.9 1.1
7 ];
8 ees.granki = [
9 % pocetok kraj R(pu) X(pu) B(pu) m(pu) Smax(MVA) status
10 1 2 0.002 0.0203125 0.56768 1.000 1000 1
11 ];
12 ees.generatori = [
13 % jazel Pg(MW) Qg(Mvar) Ug(pu) Pmin(MW) Pmax(MW) Qmin(Mvar) Qmax(Mvar) status
14 1 0 0 1.0125 -1000 1000 -1000 1000 1
15 2 100 0 1 -1000 1000 -1000 1000 1
16 ];
```

MT (PEEC)

PEEC

Ckonje, 2017

43 / 51

## Њутн-Рафсонов метод за општ случај (1)

```
../programi/nr.m
1 function [U, konverg, vreme, iter] = nr(Y, Sdad, U0, pu, pq, epsilon, iter_max)
2 %% inicijalizacija
3 U = U0; % pocetni naponi
4 n = length(U); % broj na jazli
5 iter = 0; % broj na iteraciji
6 Um = abs(U); % modul na naponite
7 Ua = angle(U); % agol na naponite
8 pqp = [pq; pu]; % indeksi na site pq i pu jazli
9 q = length(pqp); % broj na jazli so nepoznati agli na naponite
10 %% proverka na pocetnoto resenie
11 [Spres, F, konverg] = proverka(Y, Sdad, U, pq, pqp, epsilon);
12 %% iteraciji
13 tic
14 while (~konverg && iter < iter_max)
15 iter = iter + 1;
16 %% Jakobijan
17 diagU = sparse(1:n, 1:n, U);
18 diagUnorm = sparse(1:n, 1:n, U./abs(U));
19 diagS = sparse(1:n, 1:n, Spres);
20 diagSnorm = sparse(1:n, 1:n, Spres./abs(U));
21 dS_dUa = 1j*(diagS - diagU*conj(Y*diagU)); % izvodi na S vo odnos na Ua
22 dS_dUm = diagSnorm + diagU*conj(Y*diagUnorm); % izvodi na S vo odnos na Um
23 J = [
24 real(dS_dUa(pqp, pqp)) real(dS_dUm(pqp, pq))
25 imag(dS_dUa(pq, pqp)) imag(dS_dUm(pq, pq))
26 ];
```

MT (PEEC)

PEEC

Ckonje, 2017

44 / 51

## Њутн-Рафсонов метод за општ случај (2)

```
26 ];
27 %% presmetka na prirasti na promenlivite
28 dx = -J\F;
29 % novi vrednosti na promenlivite
30 Ua(pqp) = Ua(pqp) + dx(1:q); % novi agli na naponite kaj pq i pu jazlite
31 if ~isempty(pq)
32 Um(pq) = Um(pq) + dx(q+1:end); % novi moduli na naponite kaj pq jazlite
33 end
34 U = Um .* exp(1j * Ua); % novi kompleksni vrednosti na naponite
35 %% proverka na resenieto
36 [Spres, F, konverg] = proverka(Y, Sdad, U, pq, pqp, epsilon);
37 end
38 vreme = toc;
39 function [Spres, F, konverg] = proverka(Y, Sdad, U, pq, pqp, epsilon)
40 Spres = U .* conj(Y * U); % presmetani injektirani mognosti
41 dS = Spres - Sdad; % razlika vo injektirane mognosti (presmetani minus dadeni)
42 F = [
43 real(dS(pqp)) % razliki vo aktivnite mognosti kaj pq i pu jazlite
44 imag(dS(pq)) % razliki vo reaktivnite mognosti kaj pq jazlite
45 ];
46 konverg = norm(F, inf) < epsilon; % proverka za konvergencija
```

MT (PEEC)

PEEC

Ckonje, 2017

45 / 51

## Формирање на матрицата $Y$

```
../programi/matrica_y.m
1 function [Y, f, t, Y1, Y2, Y3] = matrica_y(Sb, jazli, granki)
2 n = size(jazli,1);
3 ngr = size(granki,1);
4 [f, t, Ygranki, Bgranki, m, status] = ...
5 deal(granki(:,1), granki(:,2), 1./(granki(:,3)+1j*granki(:,4)), ...
6 granki(:,5), granki(:,6), granki(:,8));
7 Y1 = status .* Ygranki./m;
8 Y2 = status .* (1j*Bgranki/2./m.^2 + 1./m .* (1./m - 1) .* Ygranki);
9 Y3 = status .* (1j*Bgranki/2 + (1 - 1./m) .* Ygranki);
10 Ysh = 1j*jazli(:,6)/Sb;
11 A = sparse(1:ngr, f, ones(ngr, 1), ngr, n) ...
12 - sparse(1:ngr, t, ones(ngr, 1), ngr, n);
13 Y = A' * sparse(1:ngr,1:ngr,Y1) * A ...
14 + sparse(f, f, Y2, n, n) ...
15 + sparse(t, t, Y3, n, n) ...
16 + sparse(1:n,1:n,Ysh);
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 46 / 51

## Пример 3

Да се реши примерот 1 со помош на програмата асрф.

```
>> acpf('ees_1');
konverg = 1, iter = 4, vreme = 0.001 sek
-----
ZAGUBI
DP = 6.079 MW, DQ = 6.479 Mvar
-----
NAPONI NA JAZLITE
-----
      MW   Mvar  Mvar(sh)   U(pu)   Teta(o)   U(kV)
1     0.0    0.0      0.0  1.012500    0.000  405.000
2  500.0  200.0      0.0  0.960142   -5.791  384.057
-----
MOKNOSTI NA GENERATORITE
-----
      PG      QG      PGmin  PGmax      QGmin  QGmax
1  506.079  206.479  -1000.0  1000.0  -1000.0  1000.0
-----
MOKNOSTI VO GRANKITE
-----
      MW      Mvar      MW      Mvar      MVA  MVAdoz      %
1  2  506.079  206.479  500.000  200.000  546.580  1000.0  54.7
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 47 / 51

## Пример 4

Да се реши примерот 1 со тоа што активната моќност на потрошувачот во јазелот 2 ќе се зголеми на 600 MW.

```
>> ees = ees_1;
>> ees.jazli(2,4) = 600;
>> acpf(ees);
konverg = 1, iter = 4, vreme = 0.001 sek
-----
ZAGUBI
DP = 8.554 MW, DQ = 31.872 Mvar
-----
NAPONI NA JAZLITE
-----
      MW   Mvar  Mvar(sh)   U(pu)   Teta(o)   U(kV)
1     0.0    0.0      0.0  1.012500    0.000  405.000
2  600.0  200.0      0.0  0.955307   -7.031  382.123
-----
MOKNOSTI NA GENERATORITE
-----
      PG      QG      PGmin  PGmax      QGmin  QGmax
1  608.554  231.872  -1000.0  1000.0  -1000.0  1000.0
-----
MOKNOSTI VO GRANKITE
-----
      MW      Mvar      MW      Mvar      MVA  MVAdoz      %
1  2  608.554  231.872  600.000  200.000  651.231  1000.0  65.1
```

MT (PEEC)

PEEC

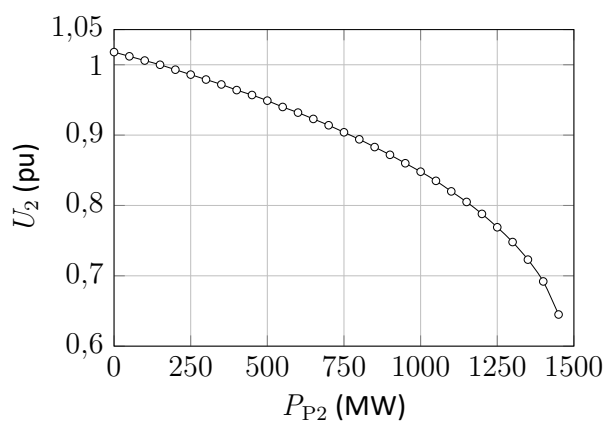
Скопје, 2017 48 / 51

## Пример 5

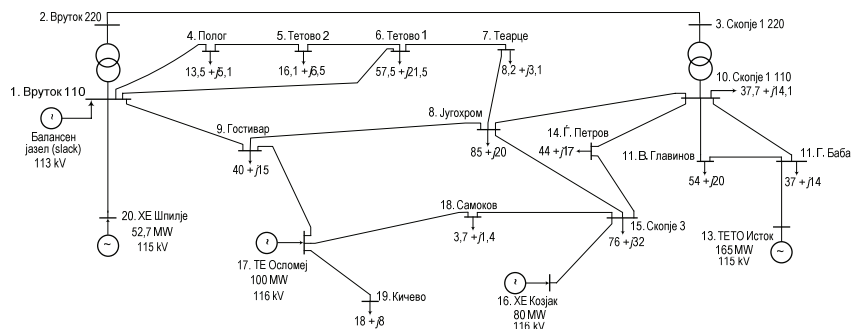
За системот од примерот 1 да се нацрта зависноста на ефективната вредност напонот на јазелот 2 од активната моќност на потрошувачот во тој јазел  $U_2 = f(P_{P2})$ . Моќноста  $P_{P2}$  да се менува од 0 до 1450 MW со чекор од 50 MW, при што реактивната моќност ќе биде  $Q_{P2} = P_{P2}/2$ , што значи дека факторот на моќност изнесува  $\cos \varphi = \cos(\arctg(1/2)) = 0,894$ .

```
ees = ees_1;  
P = 0:50:1450;  
U = zeros(size(P));  
for i = 1:length(P)  
    ees.jazli(2,4:5) = [P(i) P(i)/2];  
    ees = acpf(ees,1e-8,20,false);  
    U(i) = ees.jazli(2,10);  
end  
plot(P,U,'-ok','LineWidth',2); grid;  
xlabel('P_2 (MW)'); ylabel('U_2 (pu)');
```

## Пример 5



## Задачи за вежби (стр. 71–86)



# Режими на работа на ЕЕС

## Еднонасочен модел – DC модел

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи  
Факултет за електротехника и информациски технологии  
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk  
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2017

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 1 / 69

### Упростувања

$$U_i = 1 \text{ pu} \quad \sin \theta_i \approx \theta_i \quad \cos \theta_i \approx 1 \quad \underline{\mathbf{Y}} = j\mathbf{B}$$

$$\underline{U}_i = U_i e^{j\theta_i} = U_i (\cos \theta_i + j \sin \theta_i) = 1 + j\theta_i$$

$$\underline{I}_i = \sum_{k=1}^N \underline{Y}_{ik} \underline{U}_k = \sum_{k=1}^N jB_{ik} (1 + j\theta_k) = j \sum_{k=1}^N B_{ik} - \sum_{k=1}^N B_{ik} \theta_k$$

$$\sum_{k=1}^N B_{ik} = 0 \quad \underline{I}_i = - \sum_{k=1}^N B_{ik} \theta_k$$

$$\underline{S}_i = \underline{U}_i \underline{I}_i^* = (1 + j\theta_i) \left( - \sum_{k=1}^N B_{ik} \theta_k \right)$$

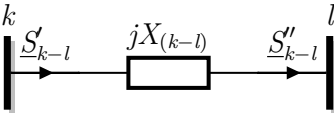
$$P_i = - \sum_{k=1}^N B_{ik} \theta_k \quad \mathbf{P} = -\mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\theta}$$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 2 / 69

### Упростувања



$$\underline{S}'_{k-l} = \underline{U}_k \cdot \underline{I}^* = \underline{U}_k \cdot \left( \frac{\underline{U}_k - \underline{U}_l}{jX_{k-l}} \right)^*$$

$$\underline{U}_k = 1 + j\theta_k \quad \underline{U}_l = 1 + j\theta_l$$

$$\underline{S}'_{k-l} = (1 + j\theta_k) \cdot \left( \frac{1 + j\theta_k - 1 - j\theta_l}{jX_{k-l}} \right)^*$$

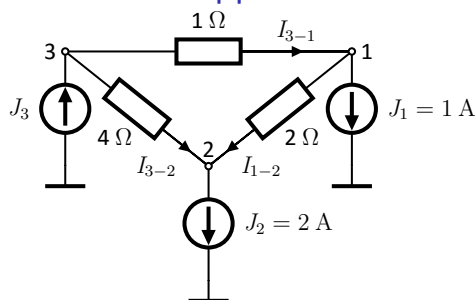
$$P'_{k-l} = \frac{\theta_k - \theta_l}{X_{k-l}}$$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 3 / 69

## Аналогија со коло за еднонасочна струја



$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{J} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} + \frac{1}{4} & -\frac{1}{4} \\ -1 & -\frac{1}{4} & 1 + \frac{1}{4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -2 \\ 3 \end{bmatrix},$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 4 / 69

## Аналогија со коло за еднонасочна струја

$$\mathbf{G}' \cdot \mathbf{U}' = \mathbf{J}' \Rightarrow \begin{bmatrix} 1,5 & -0,5 \\ -0,5 & 0,75 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -2 \end{bmatrix},$$

$$U_1 = -2 \text{ V} \quad U_2 = -4 \text{ V}$$

$$I_{3-1} = \frac{U_3 - U_1}{R_{3-1}} = \frac{0 - (-2)}{1} = 2 \text{ A},$$

$$I_{3-2} = \frac{U_3 - U_2}{R_{3-2}} = \frac{0 - (-4)}{4} = 1 \text{ A},$$

$$I_{1-2} = \frac{U_1 - U_2}{R_{1-2}} = \frac{-2 - (-4)}{2} = 1 \text{ A}.$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 5 / 69

## Аналогија со коло за еднонасочна струја

- активната отпорност од еднонасочното коло да се замени со реактанцијата на гранките од мрежата,
- инјектираните струи во јазлите од еднонасочното коло да се заменат со инјектирани активни моќности во јазлите од мрежата,
- потенцијалите на јазлите од еднонасочното коло да се заменат со фазните агли на напоните на мрежата (во референтниот јазел фазниот агол е еднаков на нула).

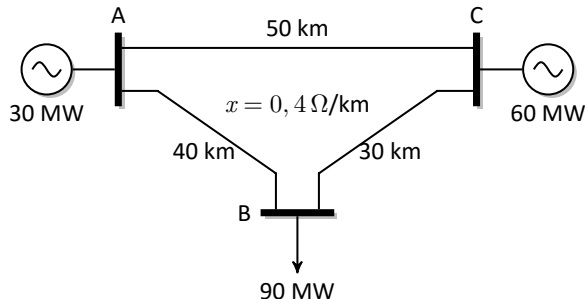
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 6 / 69

## Пример 1

На сликата е даден едноставен ЕЕС во кој што потрошувачот во јазелот В со моќност 90 MW се напојува преку два генератори кои што се наоѓаат во јазелите А и С, при што нивните моќности се 30 MW и 60 MW. Сите водови имаат надолжна реактанција  $x = 0,4 \Omega/\text{km}$ , а нивните должини се дадени на сликата. Со примена на DC-моделот приближно да се пресметаат активните моќности во сите гранки. Да се провери дали некоја гранка е преоптоварена ако е познато дека максималната моќност на сите гранки изнесува 50 MW. Генераторот во јазелот А е балансен генератор.

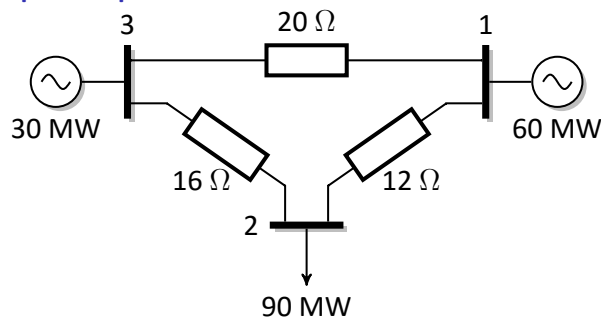


MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 7 / 69

## Пример 1



$$-B = \begin{bmatrix} 1/20 + 1/12 & -1/12 \\ -1/12 & 1/16 + 1/12 \end{bmatrix} \text{ S,}$$

$$X = (-B)^{-1} = \begin{bmatrix} 35/3 & 20/3 \\ 20/3 & 32/3 \end{bmatrix} \Omega.$$

$$P = P_G - P_P = \begin{bmatrix} 60 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 90 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 60 \\ -90 \end{bmatrix} \text{ MW,}$$

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 8 / 69

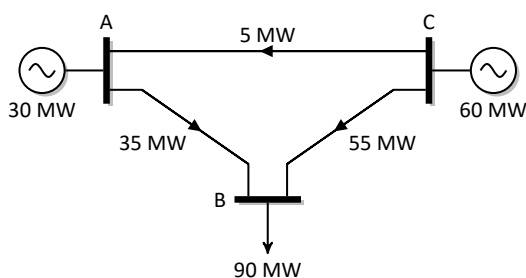
## Пример 1

$$\theta = \begin{bmatrix} 35/3 & 20/3 \\ 20/3 & 32/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 60 \\ -90 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ -560 \end{bmatrix} \text{ MW} \cdot \Omega.$$

$$P_{GR,3-1(A-C)} = \frac{0 - 100}{20} = -5 \text{ MW,}$$

$$P_{GR,3-2(A-B)} = \frac{0 - (-560)}{16} = 35 \text{ MW,}$$

$$P_{GR,1-2(C-B)} = \frac{100 - (-560)}{12} = 55 \text{ MW,}$$

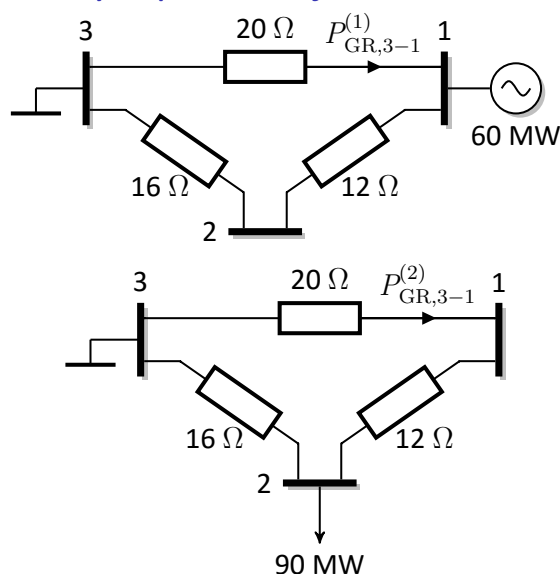


MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 9 / 69

## Пример 1 – суперпозиција



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 10 / 69

## Пример 1 – струен делител

$$P_{GR,3-1}^{(1)} = -60 \cdot \frac{16 + 12}{16 + 12 + 20} = -35 \text{ MW},$$

$$P_{GR,3-2}^{(1)} = -60 \cdot \frac{20}{16 + 12 + 20} = -25 \text{ MW},$$

$$P_{GR,1-2}^{(1)} = -P_{GR,3-2}^{(1)} = 25 \text{ MW},$$

$$P_{GR,3-1}^{(2)} = 90 \cdot \frac{16}{16 + 12 + 20} = 30 \text{ MW},$$

$$P_{GR,3-2}^{(2)} = 90 \cdot \frac{20 + 12}{16 + 12 + 20} = 60 \text{ MW},$$

$$P_{GR,1-2}^{(2)} = P_{GR,3-1}^{(2)} = 30 \text{ MW},$$

$$P_{GR,3-1} = P_{GR,3-1}^{(1)} + P_{GR,3-1}^{(2)} = -35 + 30 = -5 \text{ MW},$$

$$P_{GR,3-2} = P_{GR,3-2}^{(1)} + P_{GR,3-2}^{(2)} = -25 + 60 = 35 \text{ MW},$$

$$P_{GR,1-2} = P_{GR,1-2}^{(1)} + P_{GR,1-2}^{(2)} = 25 + 35 = 55 \text{ MW}.$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 11 / 69

## Пример 2

Да се реши примерот 1 за случајот кога моќностите на генераторите кои што се наоѓаат во јазлите А и С изнесуваат  $P_{GA} = 42 \text{ MW}$  и  $P_{GC} = 48 \text{ MW}$ . Да се провери дали во тој случај има преоптоварени гранки?

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_G - \mathbf{P}_P = \begin{bmatrix} 48 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 90 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 48 \\ -90 \end{bmatrix} \text{ MW},$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} 35/3 & 20/3 \\ 20/3 & 32/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 48 \\ -90 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -40 \\ -640 \end{bmatrix} \text{ MW} \cdot \Omega.$$

$$P_{GR,3-1(A-C)} = \frac{0 - 40}{20} = -2 \text{ MW},$$

$$P_{GR,3-2(A-B)} = \frac{0 - (-640)}{16} = 40 \text{ MW},$$

$$P_{GR,1-2(C-B)} = \frac{-40 - (-640)}{12} = 50 \text{ MW},$$

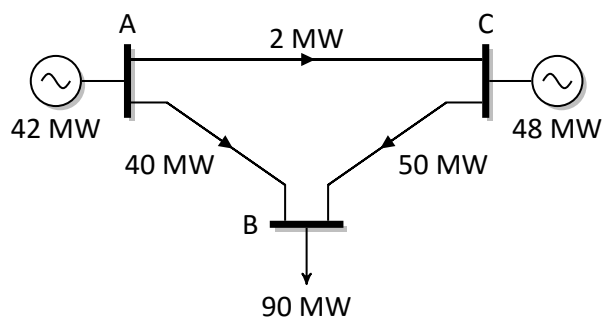
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 12 / 69



## Пример 2



MT (PEEC)

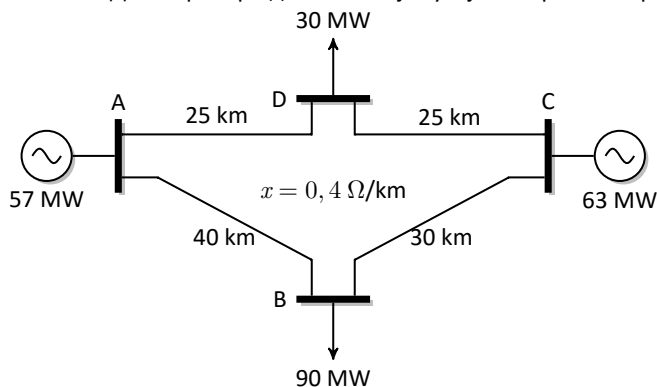
PEEC

Скопје, 2017

13 / 69

## Пример 3

Нека во ЕЕС од примерот 1 се вклучи нов потрошувач во јазелот D со моќност  $P_{PD} = 30 \text{ MW}$  кој се наоѓа точно на половина од гранката A–C, како што тоа е прикажано на сликата. Моќностите на генератори во јазлите A и C изнесуваат  $P_{GA} = 57 \text{ MW}$  и  $P_{GC} = 63 \text{ MW}$ , додека останатите податоци се исти како и во примерот 1. Да се одреди распределбата на моќности во гранките на системот. Да се провери дали во овој случај има преоптоварени гранки?



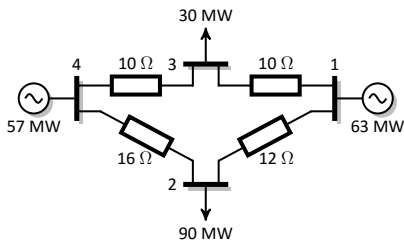
MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

14 / 69

## Пример 3



../programi/primer\_dc\_3.m

```

1 B = [
2   1/10 + 1/12, -1/12, -1/10
3   -1/12, 1/16 + 1/12, 0
4   -1/10, 0, 2/10
5   ];
6 P = [63; -90; -30];
7 teta = B \ P;
8 teta(4) = 0;
9 PGR = [
10  (teta(1) - teta(2)) / 12
11  (teta(1) - teta(3)) / 10
12  (teta(4) - teta(2)) / 16
13  (teta(4) - teta(3)) / 10
14  ]
    
```

MT (PEEC)

PEEC

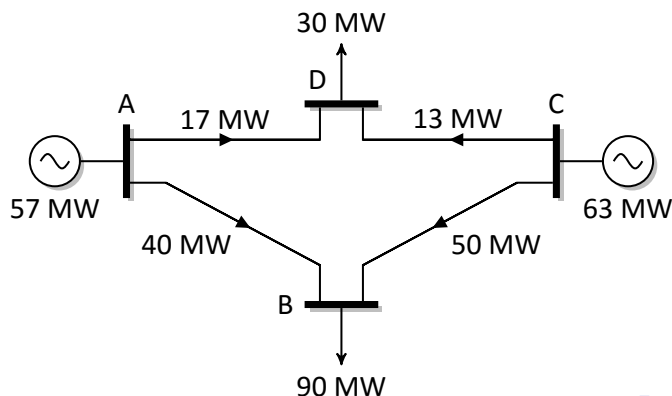
Скопје, 2017

15 / 69

## Пример 3

```
>> primer_dc_3
PGR =
 50.0000
 13.0000
 40.0000
 17.0000

>> find(abs(PGR) > 50)
ans =
Empty matrix: 0-by-1
```



MT (PEEC)

PEEC

Cronje, 2017

16 / 69

## Пример 3 – податоци во Matlab

../programi/ees\_dc4.m

```
1 function ees = ees_dc4()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.jazli = [
4 % jazel tip Pp(MW) oblast
5 1 1 0 1
6 2 1 90 1
7 3 1 30 1
8 4 3 0 1
9 ];
10 ees.granki = [
11 % pocetok kraj X(pu) Pmax(MW) status
12 1 2 12/121 50 1
13 1 3 10/121 50 1
14 4 2 16/121 50 1
15 4 3 10/121 50 1
16 ];
17 ees.generatori = [
18 % jazel Pg(MW) Pmin(MW) Pmax(MW) status
19 1 63 -1000 1000 1
20 4 57 -1000 1000 1
21 ];
```

MT (PEEC)

PEEC

Cronje, 2017

17 / 69

## Еднонасочниот модел – програма во Matlab (1)

../programi/dcpf.m

```
1 function ees = dcpf(datoteka,snimaj)
2 %% citanje na vleznite podatoci
3 if nargin == 1, snimaj = true; end
4 if isstruct(datoteka)
5 ees = datoteka;
6 else
7 ees = feval(datoteka);
8 end
9 n = size(ees.jazli,1); % broj na jazli
10 ngr = size(ees.granki,1); % broj na granki
11 ng = size(ees.generatori,1); % broj na generatori
12 %% matrica B
13 G = ees.granki;
14 [f, t, Bgranki] = deal(G(:,1),G(:,2),1./G(:,3).*G(:,5));
15 A = sparse(1:ngr, f, ones(ngr, 1), ngr, n) ...
16 - sparse(1:ngr, t, ones(ngr, 1), ngr, n);
17 B = A' * sparse(1:ngr,1:ngr,Bgranki) * A;
18 %% zadadeni injektirani mognosti vo jazlite
19 iskl = find(ees.generatori(:,5) == 0); % iskluceni generatori
20 ees.generatori(iskl,2:4) = 0; % nuli kaj isklucenite generatori
21 Pg = ees.generatori(:,2);
22 Pp = ees.jazli(:,3);
23 igen = ees.generatori(:,1);
24 Cg = sparse(igen, (1:ng)', ones(ng,1), n, ng);
25 P = (Cg*Pg - Pp)/ees.Sb;
```

MT (PEEC)

PEEC

Cronje, 2017

18 / 69

## Еднонасочниот модел – програма во Matlab (2)

```

26 %% dc model
27 ref = find(ees.jazli(:,2) == 3);
28 neref = (1:n)'; neref(ref) = [];
29 Ua = zeros(n,1); tic
30 Ua(neref) = B(neref,neref) \ P(neref); ees.vreme = toc;
31 ees.jazli(:,5) = Ua/pi*180;
32 %% moknosti na generatorite
33 P = B * Ua;
34 Pg = P(igen) * ees.Sb + Pp(igen);
35 ees.generatori(:,2) = Pg;
36 ees.generatori(iskl,2) = 0;
37 %% tekovi na moknost vo grankite
38 Pgr = (Ua(f) - Ua(t)) .* Bgranki * ees.Sb;
39 ees.granki(:,6) = Pgr;
40 ees.granki(:,7) = abs(Pgr) ./ ees.granki(:,4) * 100;
41 %% snimanje na rezultatite
42 if snimaj; snimi_dcpf(ees); type('dcpf.txt'); end

```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

19 / 69

## Пример 3 – решение со dcpf

```
>> dcpf('ees_dc4');
```

vreme = 0.000 sek

### NAPONI NA JAZLITE

	MW	Teta(o)
1	0.0	-0.189
2	90.0	-3.031
3	30.0	-0.805
4	0.0	0.000

### MOKNOSTI NA GENERATORITE

	PG	PGmin	PGmax
1	63.0	-1000.0	1000.0
4	57.0	-1000.0	1000.0

### MOKNOSTI VO GRANKITE

		MW	MWdoz	%
1	2	50.000	50.0	100.0
1	3	13.000	50.0	26.0
4	2	40.000	50.0	80.0
4	3	17.000	50.0	34.0

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

20 / 69

## Пример 4 (1)

За тест мрежата на северозападниот дел на ЕЕС на Македонија да се направи приближна пресметка на тековите на активни моќности во гранките и резултатите да се споредат со точните вредности добиени со помош на програмата `acrf`. За двата краја од секоја гранка да се одредат грешките на приближно пресметаните моќности.

```
../programi/sz_acdc.m
```

```

1 ees = sz;
2 ac = acpf(ees);
3 dc = dcpf(acdc(ees));
4 PGR = [ac.granki(:,9 11)] dc.granki(:,6);
5 greska = [(PGR(:,3) ./ PGR(:,1) - 1) * 100 (PGR(:,3) ./ PGR(:,2) - 1) * 100];

```

Гранка	$P'_{GR}$ (MW)	$P''_{GR}$ (MW)	$P_{GR}$ (MW)	$G'$ (%)	$G''$ (%)
1	55,5	55,0	54,3	-2,1	-1,3
2	41,5	41,2	40,8	-1,7	-1,1
3	25,1	25,1	24,7	-1,7	-1,7
4	12,2	12,2	11,5	-6,4	-6,2
5	4,0	4,0	3,3	-18,9	-18,8
6	45,3	44,6	44,2	-2,3	-0,8
7	35,7	35,6	32,9	-7,7	-7,4

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

21 / 69

## Пример 4 (2)

8	39,8	39,2	38,7	-2,7	-1,3
9	-44,2	-44,9	-45,7	3,5	1,8
10	18,1	18,0	18,0	-0,3	0
11	37,0	36,8	36,3	-2,1	-1,4
12	33,1	32,6	32,6	-1,6	0
13	-20,9	-21,1	-22,0	5,2	4,3
14	-20,9	-21,1	-21,1	0,9	-0,3
15	30,6	30,4	29,4	-3,8	-3,3
16	-13,6	-13,6	-14,6	7,4	7,1
17	-78,1	-80,0	-80,0	2,4	0
18	-13,2	-13,2	-13,6	2,7	2,7
19	-60,0	-60,2	-60,4	0,8	0,4
20	-67,2	-67,4	-67,6	0,5	0,2
21	165,0	164,6	165,0	0	0,2
22	52,7	52,0	52,7	0	1,4
23	16,3	16,2	14,2	-12,7	-12,6
24	-16,3	-16,3	-14,2	-12,7	-12,7
25	16,2	16,2	14,2	-12,6	-12,5

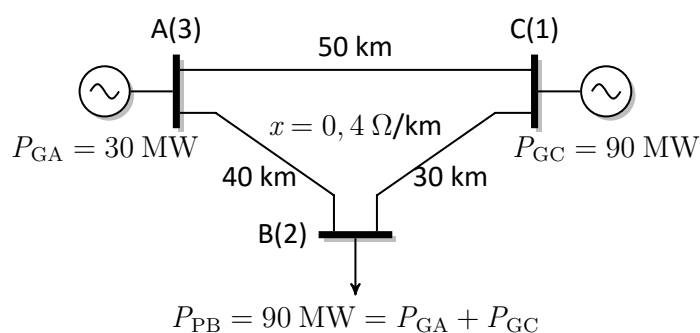
Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 22 / 69

## Врска помеѓу моќностите на гранките и моќностите на генераторите



$$\theta = \begin{bmatrix} 35/3 & 20/3 \\ 20/3 & 32/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{GC} \\ -P_{GC} - P_{GA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \cdot P_{GC} - 20/3 \cdot P_{GA} \\ -4 \cdot P_{GC} - 32/3 \cdot P_{GA} \end{bmatrix}$$

Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 23 / 69

## Врска помеѓу моќностите на гранките и моќностите на генераторите

$$P_{GR,3-1(A-C)} = \frac{0 - (5 \cdot P_{GC} - 20/3 \cdot P_{GA})}{20} = -1/4 \cdot P_{GC} + 1/3 \cdot P_{GA},$$

$$P_{GR,3-2(A-B)} = \frac{0 - (-4 \cdot P_{GC} - 32/3 \cdot P_{GA})}{16} = 1/4 \cdot P_{GC} + 2/3 \cdot P_{GA},$$

$$P_{GR,1-2(C-B)} = \frac{5 \cdot P_{GC} - 20/3 \cdot P_{GA} - (-4 \cdot P_{GC} - 32/3 \cdot P_{GA})}{12} = 3/4 \cdot P_{GC} + 1/3 \cdot P_{GA},$$

$$\begin{bmatrix} P_{GR,3-1(A-C)} \\ P_{GR,3-2(A-B)} \\ P_{GR,1-2(C-B)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/4 & 1/3 \\ 1/4 & 2/3 \\ 3/4 & 1/3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{GC} \\ P_{GA} \end{bmatrix},$$

$$P_{GR} = H \cdot P_G,$$

Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 24 / 69

## Врска помеѓу моќностите на гранките и моќностите на генераторите

$$H = \begin{bmatrix} -0,25 & 0,33333 \\ 0,25 & 0,66667 \\ 0,75 & 0,33333 \end{bmatrix}.$$

Пример 1

$$P_{GR} = \begin{bmatrix} -0,25 & 0,33333 \\ 0,25 & 0,66667 \\ 0,75 & 0,33333 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 60 \\ 30 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5 \\ 35 \\ 55 \end{bmatrix} \text{ MW},$$

Пример 2

$$P_{GR} = \begin{bmatrix} -0,25 & 0,33333 \\ 0,25 & 0,66667 \\ 0,75 & 0,33333 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 42 \\ 48 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 40 \\ 50 \end{bmatrix} \text{ MW}.$$

## Одредување на матрицата $H$

$$\begin{bmatrix} P_{GR1} \\ P_{GR2} \\ \vdots \\ P_{GRi} \\ \vdots \\ P_{GRm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1i} & \cdots & H_{1n_G} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2i} & \cdots & H_{2n_G} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ H_{i1} & H_{i2} & \cdots & H_{ii} & \cdots & H_{in_G} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ H_{m1} & H_{m2} & \cdots & H_{mi} & \cdots & H_{mn_G} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ \vdots \\ P_{Gi} \\ \vdots \\ P_{Gn_G} \end{bmatrix}$$

$$P_G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

## Одредување на матрицата $H$

$$\begin{bmatrix} P_{GR1} \\ P_{GR2} \\ \vdots \\ P_{GRi} \\ \vdots \\ P_{GRm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{1i} \\ H_{2i} \\ \vdots \\ H_{ii} \\ \vdots \\ H_{mi} \end{bmatrix}$$

$P_{Gj} = 0; j = 1, 2, \dots, n_G; j \neq i,$   
 $P_{Gi} = 1 \text{ MW}.$

релативна моќност на потрошувачите

$$\alpha_i = \frac{P_{Pi}}{P_{P\Sigma}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$$

$$P_{P\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{Pi}.$$

## Пример 5

Да се одреди матрицата  $H$  за ЕЕС од примерот 1.

$$\alpha_2 = \frac{P_{P2}}{P_{P\Sigma}} = \frac{90}{90} = 1,$$

$$P = P_G - P_P = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \text{ MW},$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 35/3 & 20/3 \\ 20/3 & 32/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ -4 \end{bmatrix} \text{ MW} \cdot \Omega.$$

$$P_{GR,3-1(A-C)} = \frac{0 - 5}{20} = -0,25 \text{ MW},$$

$$P_{GR,3-2(A-B)} = \frac{0 - (-4)}{16} = 0,25 \text{ MW},$$

$$P_{GR,1-2(C-B)} = \frac{5 - (-4)}{12} = 0,75 \text{ MW},$$

$$\begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{21} \\ H_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,25 \\ 0,25 \\ 0,75 \end{bmatrix}.$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

28 / 69

## Пример 5

$$P = P_G - P_P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \text{ MW},$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 35/3 & 20/3 \\ 20/3 & 32/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -20/3 \\ -32/3 \end{bmatrix} \text{ MW} \cdot \Omega,$$

$$P_{GR,3-1(A-C)} = \frac{0 - (-20/3)}{20} = 0,33333 \text{ MW},$$

$$P_{GR,3-2(A-B)} = \frac{0 - (-32/3)}{16} = 0,66667 \text{ MW},$$

$$P_{GR,1-2(C-B)} = \frac{-20/3 - (-32/3)}{12} = 0,33333 \text{ MW},$$

$$\begin{bmatrix} H_{12} \\ H_{22} \\ H_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,33333 \\ 0,66667 \\ 0,33333 \end{bmatrix},$$

MT (ПЕЕС)

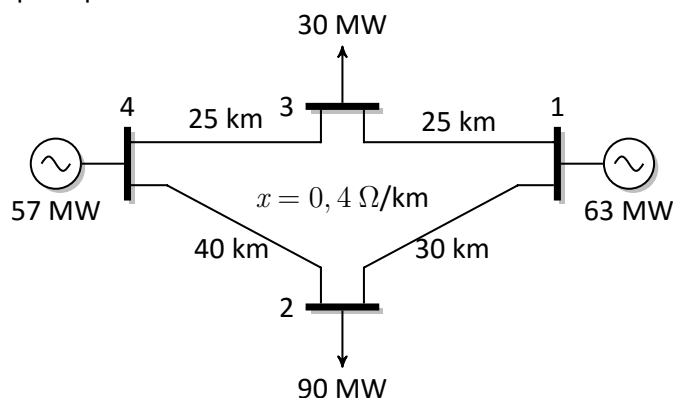
ПЕЕС

Скопје, 2017

29 / 69

## Пример 6

Со помош на Matlab да се одреди матрицата  $H$  за ЕЕС од примерот 3.



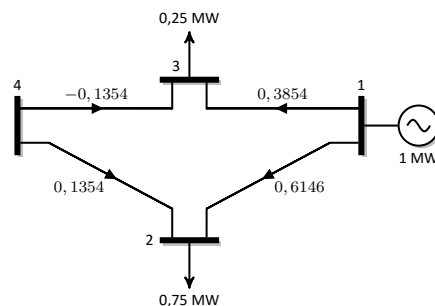
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

30 / 69

## Пример 6



$$\alpha = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,75 \\ 0,25 \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} 1 \\ -\alpha_2 \\ -\alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -0,75 \\ -0,25 \end{bmatrix} \text{ MW} \quad \theta = \begin{bmatrix} 5,2083 \\ -2,1667 \\ 1,3542 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ MW} \cdot \Omega$$

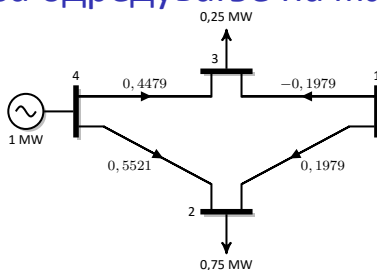
$$H^{(1)} = \begin{bmatrix} (\theta_1 - \theta_2)/12 \\ (\theta_1 - \theta_3)/10 \\ (\theta_4 - \theta_2)/16 \\ (\theta_4 - \theta_3)/10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,6146 \\ 0,3854 \\ 0,1354 \\ -0,1354 \end{bmatrix} \text{ MW.}$$

MT (PEEC)

PEEC

Konje, 2017 31 / 69

## Програмата за одредување на матрицата $H$



../programi/ees\_dc4\_h.m

```

1 f = [ 1; 1; 4; 4];
2 t = [ 2; 3; 2; 3];
3 XGR = [12; 10; 16; 10];
4 A = sparse(1:4,f,ones(4,1),4,4) - sparse(1:4,t,ones(4,1),4,4);
5 B = A' * sparse(1:4,1:4,1./XGR) * A;
6 PP = [0; 90; 30];
7 alfa = PP / sum(PP);
8 H = zeros(4,2);
9 P = [1; -alfa(2); -alfa(3)];
10 teta = B(1:3,1:3) \ P; teta(4) = 0;
11 H(:,1) = (teta(f) - teta(t))./XGR;
12 P = [0; -alfa(2); -alfa(3)];
13 teta = B(1:3,1:3) \ P; teta(4) = 0;
14 H(:,2) = (teta(f) - teta(t))./XGR

```

MT (PEEC)

PEEC

Konje, 2017 32 / 69

## Пример 6

../programi/matrica\_h.m

```

1 function H = matrica_h(datoteka)
2 if isstruct(datoteka)
3     ees = datoteka;
4 else
5     ees = feval(datoteka);
6 end
7 iskl = ees.generatori(:,5) == 0;
8 ees.generatori(iskl,:) = [];
9 ngr = size(ees.granki,1);
10 ng = size(ees.generatori,1);
11 ees.jazli(:,3) = ees.jazli(:,3)/sum(ees.jazli(:,3));
12 H = zeros(ngr,ng);
13 for i = 1:ng
14     PG = zeros(ng,1); PG(i) = 1;
15     ees.generatori(:,2) = PG;
16     ees = dcpf(ees,false);
17     H(:,i) = ees.granki(:,6);
18 end

```

>> H = matrica\_h('ees\_dc4')

```

H =
    0.6146    0.1979
    0.3854   -0.1979
    0.1354    0.5521
   -0.1354    0.4479

```

MT (PEEC)

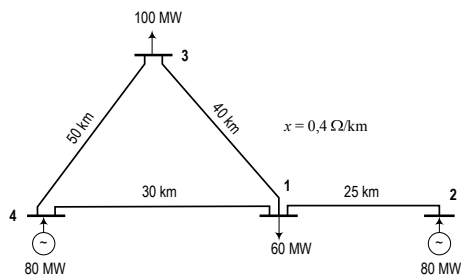
PEEC

Konje, 2017 33 / 69

## Пример 7

Го разгледуваме системот прикажан на сликата каде што се дадени само податоците неопходни за пресметки според DC-моделот. Да се одреди матрицата  $H$  за системот и со нејзина помош да се пресметаат моќностите во гранките за следните два случаја

- $P_{G2} = 80 \text{ MW}$ ,  $P_{G4} = 80 \text{ MW}$ ,
- $P_{G2} = 70 \text{ MW}$ ,  $P_{G4} = 90 \text{ MW}$ .



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

34 / 69

## Пример 7

```
../programi/ees_dc4rad.m
1 function ees = ees_dc4rad()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.jazli = [
4 % jazel tip Pp(MW) oblast
5     1 1 60 1
6     2 1 0 1
7     3 1 100 1
8     4 3 0 1
9 ];
10 ees.granki = [
11 % pocetok kraj L(km) Pmax(MW) status
12     4 1 30 50 1
13     4 3 50 50 1
14     1 3 40 50 1
15     2 1 25 50 1
16 ];
17 ees.generatori = [
18 % jazel Pg(MW) Pmin(MW) Pmax(MW) status
19     2 80 -1000 1000 1
20     4 80 -1000 1000 1
21 ];

>> H = matrica_h('ees_dc4rad')
H =
-0.2083    0.5417
 0.2083    0.4583
 0.4167    0.1667
 1.0000   -0.0000
```

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

35 / 69

## Пример 7

```
>> PGR = H * [80; 80]
PGR =
 26.6667
 53.3333
 46.6667
 80.0000

>> PGR = H * [70; 90]
PGR =
 34.1667
 55.8333
 44.1667
 70.0000
```

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

36 / 69



## Пример 8

За мрежата од примерот 1 е познато дека матрицата  $\mathbf{H}$  изнесува

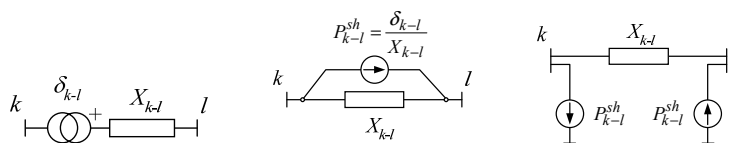
$$\mathbf{H} = \begin{array}{cc} & \begin{array}{c} \text{C} \\ \text{A} \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{A} - \text{C} \\ \text{A} - \text{B} \\ \text{C} - \text{B} \end{array} & \begin{bmatrix} -0,25 & 0,33333 \\ 0,25 & 0,66667 \\ 0,75 & 0,33333 \end{bmatrix} \end{array}$$

каде што редиците и колоните се означени со гранките, односно генераторите, за кои се однесуваат. Да се одредат моќностите на генераторите така што моќноста на гранката C-B ќе изнесува 50 MW.

## Пример 8

$$\begin{aligned} 0,75 \cdot P_{GC} + 0,33333 \cdot P_{GA} &= 50, \\ P_{GA} + P_{GC} &= 90, \\ P_{GC} &= 90 - P_{GA}, \\ 0,75 \cdot (90 - P_{GA}) + 0,33333 \cdot P_{GA} &= 50, \\ P_{GA} &= \frac{0,75 \cdot 90 - 50}{0,75 - 0,33333} = 42 \text{ MW}, \\ P_{GC} &= 90 - P_{GA} = 90 - 42 = 48 \text{ MW}. \end{aligned}$$

## Трансформатори за изместување на фазниот агол во еднонасочниот модел



$$\begin{aligned} P_{k-l}^{sh} &= \frac{\delta_{k-l}}{X_{k-l}} \\ P_{k-l} &= \frac{\theta_k - \theta_l + \delta_{k-l}}{X_{k-l}} \end{aligned}$$

## Пример 9

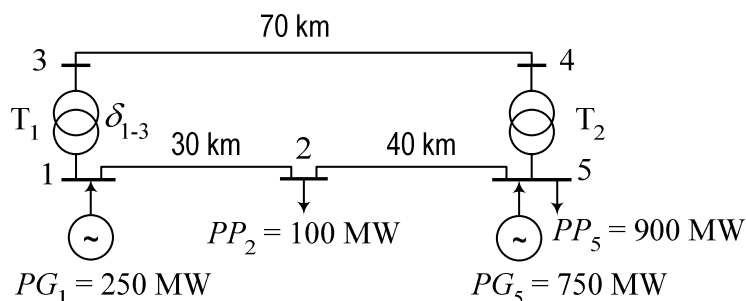
110 kV водови (1–2 и 2–5) имаат  $x = 0,41 \Omega/\text{km}$ ;  $P_{\max} = 110 \text{ MW}$

220 kV вод (3–4) има  $x = 0,42 \Omega/\text{km}$ ;  $P_{\max} = 330 \text{ MW}$

Трансформатори 231/115 kV/kV, 150 MVA,  $u_k = 11\%$

Да се одреди распределбата на моќности во системот за следните случаи

- Двата трансформатора се без можност за изместување на фазниот агол,
- Трансформаторот  $T_1$  има можност за изместување на фазниот агол при што треба да се испитаат случаите со  $\delta_{1-3} = 5^\circ$ ,  $\delta_{1-3} = 10^\circ$  и  $\delta_{1-3} = 15^\circ$ .



MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

40 / 69

## Пример 9а

../programi/dc\_kontura\_a.m

```

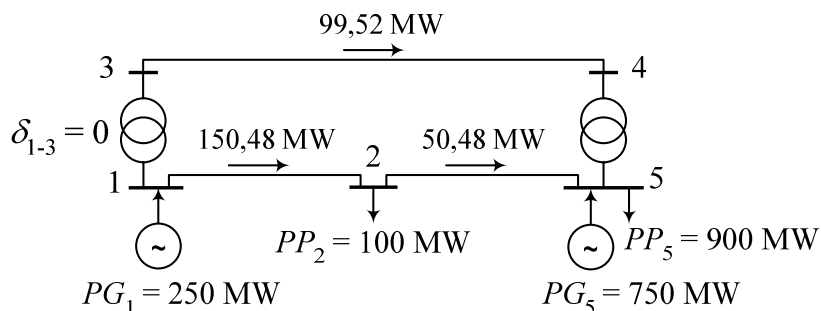
1 X12 = 0.41*30/121;
2 X25 = 0.41*40/121;
3 X34 = 0.42*70/484;
4 XT = 0.11*231^2/150/484;
5 B = [
6     1/X12 + 1/XT,    -1/X12,    -1/XT,    0
7     -1/X12, 1/X12 + 1/X25,    0,    0
8     -1/XT,    0, 1/XT + 1/X34,    -1/X34
9     0,    0,    -1/X34, 1/X34 + 1/XT];
10 P = [2.5; -1; 0; 0];
11 teta = B \ P; teta(5) = 0;
12 PGR = [
13     (teta(1) - teta(2)) / X12
14     (teta(2) - teta(5)) / X25
15     (teta(3) - teta(4)) / X34
16     (teta(1) - teta(3)) / XT
17     (teta(4) - teta(5)) / XT
18 ] * 100
    
```

PGR =  
150.4777  
50.4777  
99.5223  
99.5223  
99.5223

Скопје, 2017

41 / 69

## Пример 9а



MT (PEEC)

PEEC

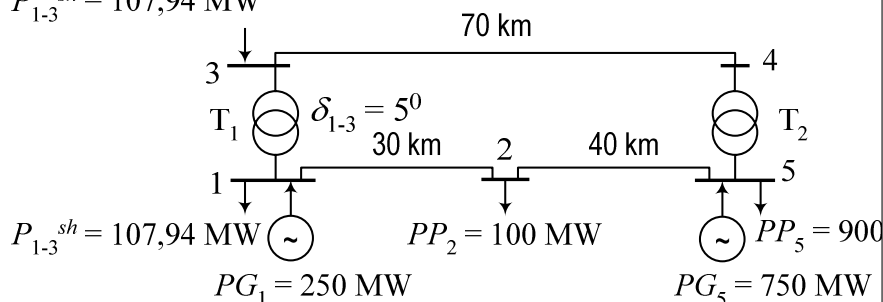
Скопје, 2017

42 / 69

## Пример 9б

$$P_{1-3}^{sh} = \frac{\delta_{1-3}}{X_{1-3}} = \frac{5 \cdot \frac{\pi}{180}}{0,0809} = 1,0794 \text{ pu} = 107,94 \text{ MW}.$$

$$P_{1-3}^{sh} = 107,94 \text{ MW}$$

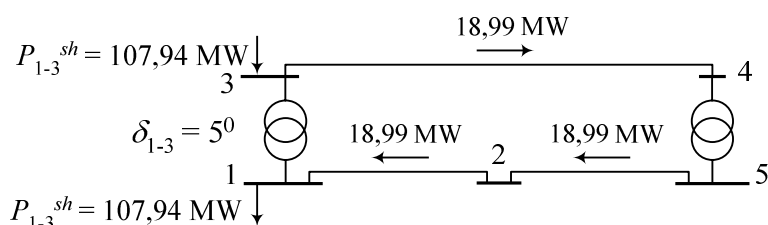


MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017 43 / 69

## Пример 9б



$$P_{\text{контура}} = \frac{\delta_{1-3}}{X_{1-2} + X_{2-5} + X_{3-4} + 2X_T} = \frac{5 \cdot \frac{\pi}{180}}{0,4596} = 0,1899 \text{ pu} = 18,99 \text{ MW}.$$

MT (PEEC)

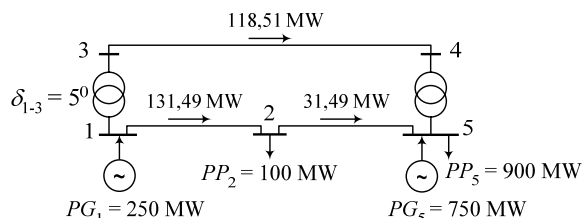
PEEC

Kronje, 2017 44 / 69

## Пример 9б

```

../programi/dc_kontura_b.m
1 % bez transformator za izmestuvanje na aglite
2 dc_kontura_a
3 % samo so transformatorot za izmestuvanje na aglite
4 delta13 = 5/180*pi;
5 P_sh = delta13 / XT;
6 P = [-P_sh; 0; P_sh; 0];
7 teta = B \ P; teta(5) = 0;
8 PGR_sh = [
9     (teta(1) - teta(2)) / X12
10    (teta(2) - teta(5)) / X25
11    (teta(3) - teta(4)) / X34
12    (teta(1) - teta(3) + delta13) / XT
13    (teta(4) - teta(5)) / XT
14    ] * 100;
15 % vkupno resenie
16 PGR = PGR + PGR_sh
    
```

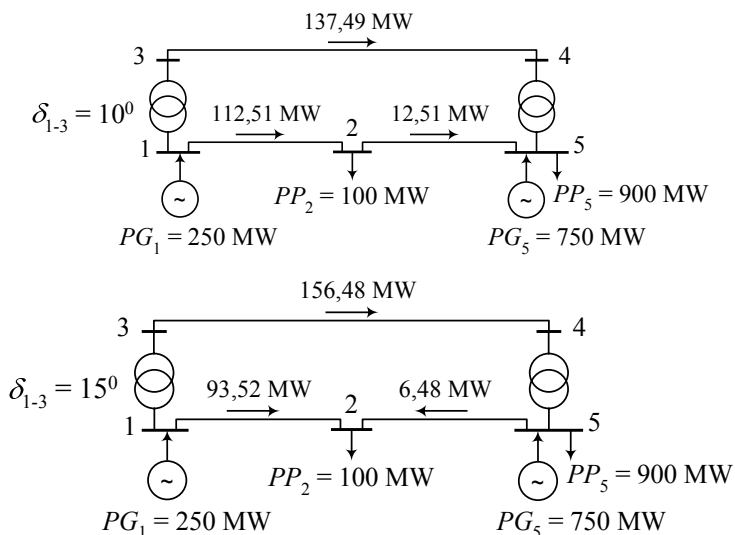


MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017 45 / 69

## Пример 9б



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 46 / 69

## DC модел со трансформатори за изместување на аголот

Примена на принципот на суперпозиција

$$P_{GR} = H \cdot P_G + P_{GR}^{sh}$$

- првиот член  $P_{GR} = H \cdot P_G$  е основниот DC модел
- вториот член  $P_{GR}^{sh}$  е поради дополнителните инјекции кои зависат само од фазните агли на трансформаторите и конфигурацијата на мрежата

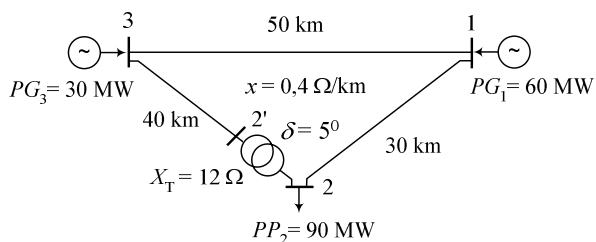
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 47 / 69

## Пример 10

Го разгледуваме системот од примерот 1 во кој сервиски со гранката 3-2 е додаден трансформатор за изместување на фазниот агол на напонот. Неговата реактанција е  $X_T = 12 \Omega$ , а фазното изместување на аголот изнесува  $\delta = 5^\circ$ .



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 48 / 69

## Пример 10

$$-B = \begin{bmatrix} 1/20 + 1/12 & -1/12 \\ -1/12 & 1/28 + 1/12 \end{bmatrix} S \quad X = (-B)^{-1} = \begin{bmatrix} 13,3333 & 9,3333 \\ 9,3333 & 14,9333 \end{bmatrix} \Omega$$

$$P = P_G - P_P = \begin{bmatrix} 60 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 90 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 60 \\ -90 \end{bmatrix} \text{ MW},$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 13,3333 & 9,3333 \\ 9,3333 & 14,9333 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 60 \\ -90 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -40 \\ -784 \end{bmatrix} \text{ MW} \cdot \Omega.$$

$$P_{GR,3-1}^{(1)} = \frac{0 - (-40)}{20} = 2 \text{ MW},$$

$$P_{GR,3-2}^{(1)} = \frac{0 - (-784)}{28} = 28 \text{ MW},$$

$$P_{GR,1-2}^{(1)} = \frac{-40 - (-784)}{12} = 62 \text{ MW}.$$

$$P_{\text{контура}} = \frac{\delta}{X_{3-1} + X_{3-2} + X_{1-2} + X_T} = \frac{5 \cdot \pi / 180}{(120 \cdot 0,4 + 12) / 121} = 0,176 \text{ pu} = 17,6 \text{ MW}.$$

$$P_{GR,3-1}^{(2)} = -P_{\text{контура}} = -17,6 \text{ MW},$$

$$P_{GR,3-2}^{(2)} = P_{\text{контура}} = 17,6 \text{ MW},$$

$$P_{GR,1-2}^{(2)} = -P_{\text{контура}} = -17,6 \text{ MW}.$$

MT (ПЕЕС)

РЕЕС

Скопје, 2017

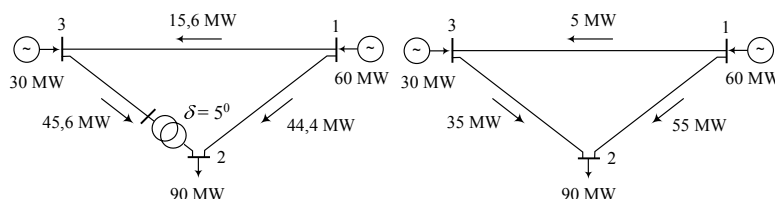
49 / 69

## Пример 10

$$P_{GR,3-1} = P_{GR,3-1}^{(1)} + P_{GR,3-1}^{(2)} = -15,6 \text{ MW},$$

$$P_{GR,3-2} = P_{GR,3-2}^{(1)} + P_{GR,3-2}^{(2)} = 45,6 \text{ MW},$$

$$P_{GR,1-2} = P_{GR,1-2}^{(1)} + P_{GR,1-2}^{(2)} = 44,4 \text{ MW}.$$



MT (ПЕЕС)

РЕЕС

Скопје, 2017

50 / 69

## Дистрибутивни фактори на текови на моќности

Дистрибутивниот фактор на текот на моќност (Power Transfer Distribution Factor, PTDF) во една гранка (вод или трансформатор) е дефиниран како коефициент на осетливост на моќноста во гранката во однос на промена на инјектираната моќности во некој јазел од мрежата.

$$P_{GR} = \hat{H} \cdot P$$

- $\hat{H}$  е со димензии  $m \times n$ 
  - ▶  $m$  број на гранки
  - ▶  $n$  број на јазли
- $\hat{H}$  се формира при одреден избор на референтен (балансен) јазел
- колоната која се однесува на референтниот јазел содржи само нули

MT (ПЕЕС)

РЕЕС

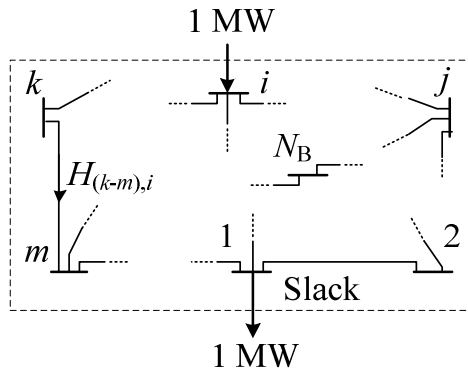
Скопје, 2017

51 / 69

## Формирање на матрицата $\hat{H}$

$$P_k = \begin{cases} 0, & k = 1, 2, \dots, n, k \neq i, k \neq s, \\ 1, & k = i, \\ -1, & k = s, \end{cases}$$

каде што со  $s$  е означен референтниот јазел



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 52 / 69

## Формирање на матрицата $H$ (1)

Пермутација на колоните од  $\hat{H}$ , прво колоните кои одговараат на јазлите со генератори, а потоа колоните кои одговараат на јазлите со потрошувачи

$$P_{GR} = [H_1 \ H_2] \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ -P_2 \end{bmatrix} = H_1 \cdot P_1 - H_2 \cdot P_2,$$

$$P_{GR} = H \cdot P_1.$$

$$H \cdot P_1 = H_1 \cdot P_1 - H_2 \cdot P_2,$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ P_{P\Sigma} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ n_G \end{matrix}$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 53 / 69

## Формирање на матрицата $H$ (2)

$$P_{P\Sigma} \cdot H^{(i)} = P_{P\Sigma} \cdot H_1^{(i)} - H_2 \cdot P_2,$$

$$H^{(i)} = H_1^{(i)} - H_2 \cdot \alpha.$$

$$H = H_1 - H_2 \cdot \alpha \cdot I_G,$$

$I_G$  е редица со  $n_G$  елементи кои се еднакви на 1.

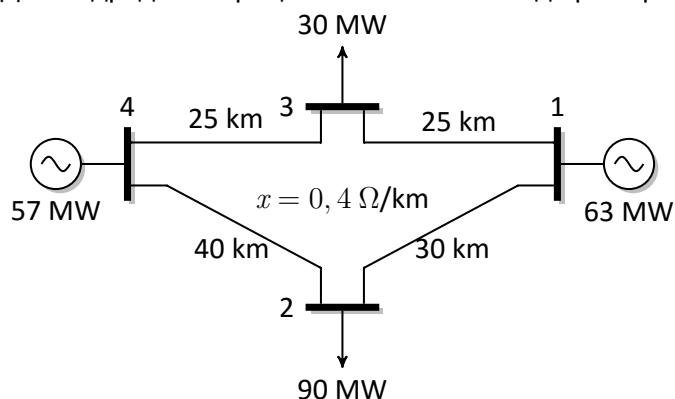
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

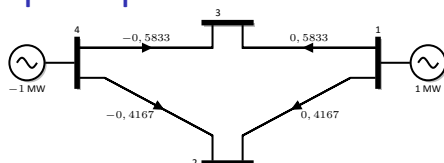
Скопје, 2017 54 / 69

## Пример 11

Да се одредат матриците  $\hat{H}$  и  $H$  за ЕЕС од примерот 3.



## Пример 11



$$P_{1-2} = \frac{25 + 25}{25 + 25 + 30 + 40} \cdot 1 = 0,4167 \text{ MW} \quad P_{1-3} = 1 - P_{1-2} = 1 - 0,4167 = 0,5833 \text{ MW}$$

../programi/matrica\_ptdf.m

```

1 function H = matrica_ptdf(datoteka)
2 if isstruct(datoteka)
3     ees = datoteka;
4 else
5     ees = feval(datoteka);
6 end
7 m = size(ees.granki,1);
8 n = size(ees.jazli,1);
9 H = zeros(m,n);
10 ees.generatori(:,2) = 0;
11 for i = 1:n
12     ees.jazli(:,3) = 0;
13     ees.jazli(i,3) = -1;
14     ees = dcpf(ees,false);
15     H(:,i) = ees.granki(:,6);
16 end
    
```

## Пример 11

```
>> Hh = matrica_ptdf('ees_dc4')
```

```

Hh =
    0.4167    -0.3333    0.2083     0
    0.5833    0.3333   -0.2083     0
   -0.4167   -0.6667   -0.2083     0
   -0.5833   -0.3333   -0.7917     0
    
```

../programi/ptdf\_1.m

```

1 ees = ees_dc4;
2 Hh = matrica_ptdf(ees)
3 igen = ees.generatori(:,1);
4 ipot = ees.jazli(:,1); ipot(igen) = [];
5 alfa = ees.jazli(ipot,3)/sum(ees.jazli(ipot,3));
6 H = Hh(:,igen) - Hh(:,ipot) * alfa * ones(1,length(igen))
    
```

```

H =
    0.6146    0.1979
    0.3854   -0.1979
    0.1354    0.5521
   -0.1354    0.4479
    
```

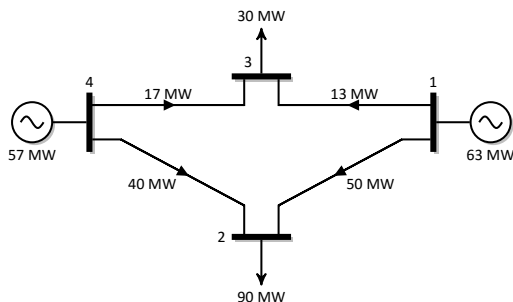
исто се доби во примерот 3 со командата

```
>> H = matrica_h('ees_dc4')
```

## Пример 12

Го разгледуваме основното сценарио за ЕЕС од примерот 3 кое е прикажано на сликата.

- Да се одредат дистрибутивните фактори на тековите на моќности (PTDF) за гранките 4–2 и 1–2 во однос на моќноста на генераторот во јазелот 1;
- Да се пресметаат промените на тековите на моќност во гранките 4–2 и 1–2 ако моќноста на генераторот во јазелот 1 се зголеми за 5 MW, а моќноста на генераторот во јазелот 4 се намали за 5 MW;
- Да се пресметаат моќностите во сите гранки ако дојде до испад на генераторот во јазелот 1.
- Да се пресметаат моќностите во сите гранки ако дојде до зголемување на моќност на потрошувачот во јазелот 2 за 10 MW.



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 58 / 69

## Пример 12а

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0,4167 & -0,3333 & 0,2083 & 0 \\ 0,5833 & 0,3333 & -0,2083 & 0 \\ -0,4167 & -0,6667 & -0,2083 & 0 \\ -0,5833 & -0,3333 & -0,7917 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1-2 \\ 1-3 \\ 4-2 \\ 4-3 \end{matrix} \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 4 \\ 0,6146 & 0,1979 \\ 0,3854 & -0,1979 \\ 0,1354 & 0,5521 \\ -0,1354 & 0,4479 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1-2 \\ 1-3 \\ 4-2 \\ 4-3 \end{matrix}$$

$$PTDF_{4-2,1} = \hat{H}_{31} = -0,4167;$$

$$PTDF_{1-2,1} = \hat{H}_{11} = 0,4167;$$

$$PTDF_{4-2,1} = H_{31} - H_{32} = 0,1345 - 0,5521 = -0,4167;$$

$$PTDF_{1-2,1} = H_{11} - H_{12} = 0,6146 - 0,1979 = 0,4167;$$

MT (ПЕЕС)

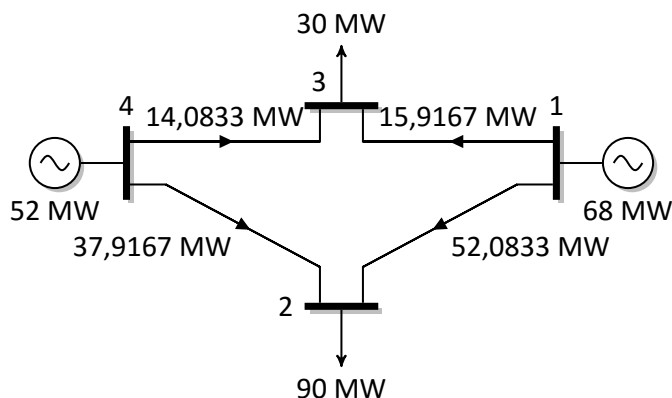
ПЕЕС

Скопје, 2017 59 / 69

## Пример 12б

$$\Delta P_{GR,4-2} = PTDF_{4-2,1} \cdot 5 = -0,4167 \cdot 5 = -2,0835 \text{ MW};$$

$$\Delta P_{GR,1-2} = PTDF_{1-2,1} \cdot 5 = 0,4167 \cdot 5 = 2,0835 \text{ MW};$$



MT (ПЕЕС)

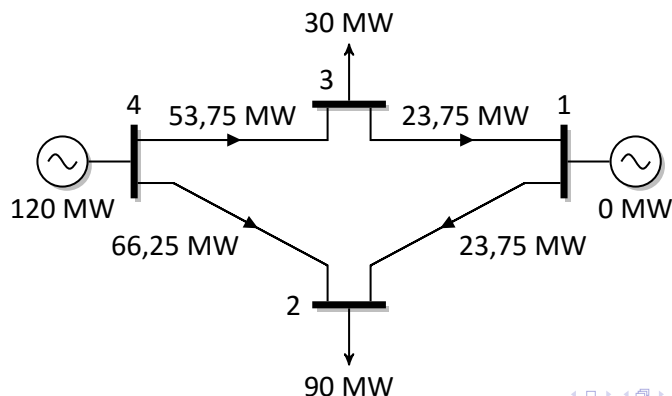
ПЕЕС

Скопје, 2017 60 / 69



## Пример 12в

$$P_{GR} = \begin{bmatrix} 50 \\ 13 \\ 40 \\ 17 \end{bmatrix} - 63 \cdot \begin{bmatrix} 0,4167 \\ 0,5833 \\ -0,4167 \\ -0,5833 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23,75 \\ -23,75 \\ 66,25 \\ 53,75 \end{bmatrix} \text{ MW.}$$



MT (ПЕЕС)

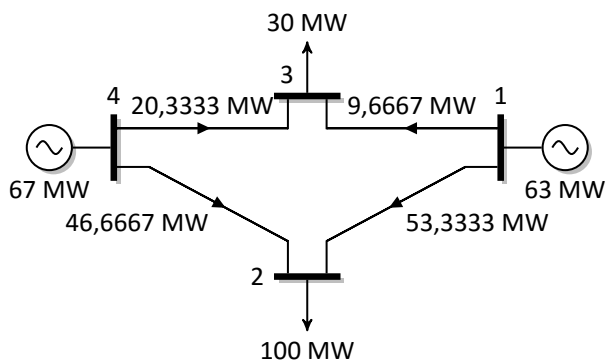
ПЕЕС

Скопје, 2017

61 / 69

## Пример 12г

$$P_{GR} = \begin{bmatrix} 50 \\ 13 \\ 40 \\ 17 \end{bmatrix} - 10 \cdot \begin{bmatrix} -0,3333 \\ 0,3333 \\ -0,6667 \\ -0,3333 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 53,3333 \\ 9,6667 \\ 46,6667 \\ 20,3333 \end{bmatrix} \text{ MW.}$$



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

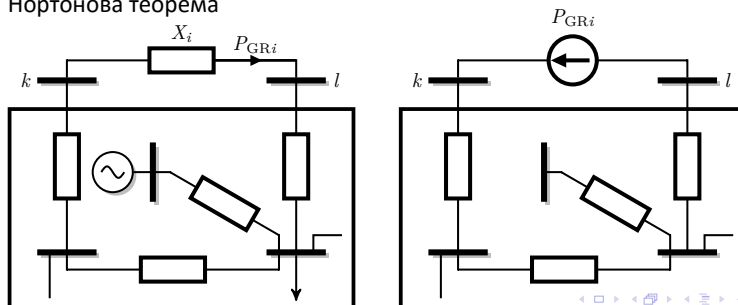
62 / 69

## Дистрибутивни фактори на испади на елементи од мрежата

Во случај на испад на одреден елемент од мрежата (вод или трансформатор) тековите на моќности низ сите елементи од мрежата ќе се променат. Дистрибутивниот фактор на испад на елемент од мрежата (Line Outage Distribution Factor, LODF) претставува мерка за наведената промена на моќноста во елементите од мрежата и може да се искористи при проверка на критериумот  $N - 1$ .

$$\Delta P_{ji} = L_{ji} \cdot P_{GRi}$$

Нортонова теорема



MT (ПЕЕС)

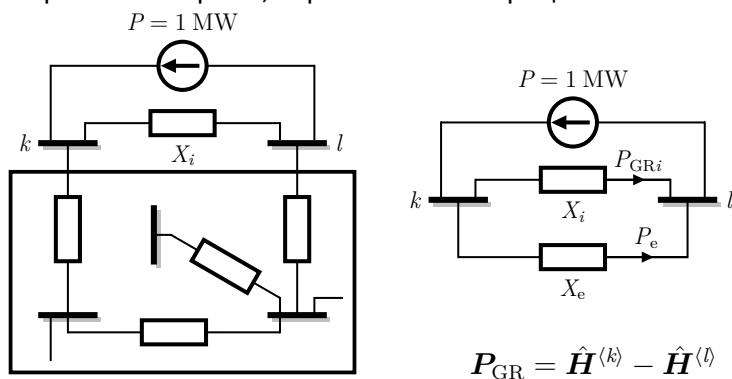
ПЕЕС

Скопје, 2017

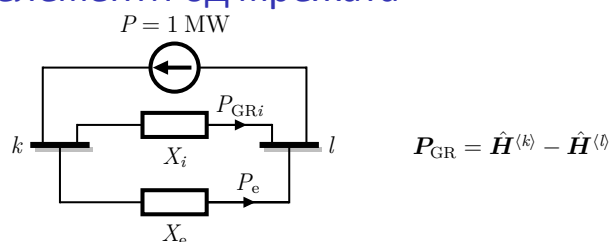
63 / 69

## Дистрибутивни фактори на испади на елементи од мрежата

Нортонова теорема, користење на матрицата  $\hat{H}$



## Дистрибутивни фактори на испади на елементи од мрежата



Во реактанцијата  $X_e$  тече моќност еднаква на  $1 - P_{GRi}$ , а доколку ја немаше реактанцијата  $X_i$  ќе течеше моќност од 1 MW. Затоа множиме со коефициент  $a = 1/(1 - P_{GRi})$ .

$$L^{(i)} = \frac{\hat{H}^{(k)} - \hat{H}^{(l)}}{1 - P_{GRi}} = \frac{\hat{H}^{(k)} - \hat{H}^{(l)}}{1 - (\hat{H}_{ik} - \hat{H}_{il})}$$

$$L_{ii} = -1$$

## Одредување на матрицата $L$

```

../programi/matrica_lodf.m
1 function L = matrica_lodf(granki,H)
2 [f, t] = deal(granki(:,1),granki(:,2));
3 m = length(f); L = zeros(m,m);
4 for i = 1:m
5     Pgr = H(:,f(i)) - H(:,t(i));
6     Pgr = Pgr / (1 - Pgr(i));
7     Pgr(i) = -1;
8     L(:,i) = Pgr;
9 end
    
```

## Пример 13

За ЕЕС од примерот 2 да се одредат дистрибутивните фактори на испад на елемент од мрежата во случајот кога испаднатиот елемент е гранката 1–3. Користејќи ги пресметаните фактори да се одредат моќностите во останатите гранки при испад на гранката 1–3.

$$1 - (\hat{H}_{ik} - \hat{H}_{il}) = 1 - (\hat{H}_{21} - \hat{H}_{23}) = 1 - [0,5833 - (-0,2083)] = 0,2084;$$

$$L^{(3)} = \frac{1}{0,2084} \left( \begin{bmatrix} 0,4167 \\ 0,5833 \\ -0,4167 \\ -0,5833 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,2083 \\ -0,2083 \\ -0,2083 \\ -0,7917 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 1 \\ 3,8 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

$$L_2^{(3)} = -1$$

$$L^{(3)} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

MT (PEEC)

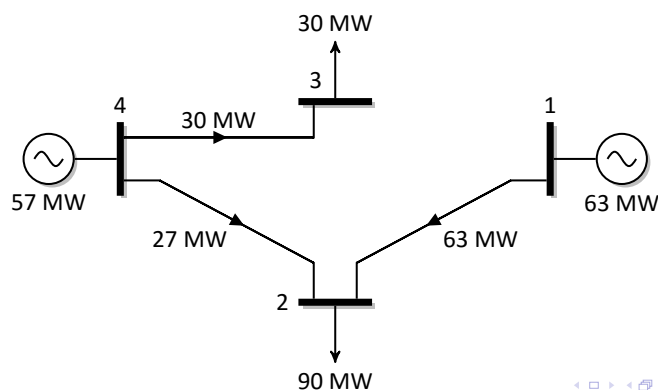
PEEC

Скопје, 2017 67 / 69

## Пример 13

$$P_{GR} = P_{GR}^{(0)} + P_{GR2}^{(0)} \cdot L^{(3)}$$

$$P_{GR} = \begin{bmatrix} 50 \\ 13 \\ 40 \\ 17 \end{bmatrix} + 13 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63 \\ 0 \\ 27 \\ 30 \end{bmatrix} \text{ MW.}$$



MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 68 / 69

## Пример 13

../programi/lodf\_1.m

```
1 ees = ees_dc4;
2 H = matrica_ptdf(ees);
3 L = matrica_lodf(ees.granki,H)
```

>> lodf\_1

```
L =
-1.0000  1.0000  1.0000 -1.0000
 1.0000 -1.0000 -1.0000  1.0000
 1.0000 -1.0000 -1.0000  1.0000
-1.0000  1.0000  1.0000 -1.0000
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 69 / 69

# Режими на работа на ЕЕС

## Оптимална работа на ЕЕС составен од термоцентрали и преносна мрежа моделирана со DC моделот

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи  
Факултет за електротехника и информациски технологии  
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk  
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2017

МТ (ПЕЕС)

PEEC

Скопје, 2017

1 / 55

### Дефиниција на проблемот (1)

Минимум на сумата од вкупните трошоци на сите генератори

$$F = \sum_{i=1}^{N_G} f_i = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2)$$

ограничување за билансот на моќности

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} = P_P$$

техничките ограничувања за моќностите на генераторите

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_G$$

ограничувањата за максималните моќности на гранките

$$|P_{GRi}| \leq P_{GRi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

МТ (ПЕЕС)

PEEC

Скопје, 2017

2 / 55

### Дефиниција на проблемот (2)

$$P_{GRi} \leq P_{GRi}^{\max},$$
$$P_{GRi} \geq -P_{GRi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

$$P_{GRi} \leq P_{GRi}^{\max},$$
$$-P_{GRi} \leq P_{GRi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

$$H \cdot P_G \leq P_{GR}^{\max},$$
$$-H \cdot P_G \leq P_{GR}^{\max},$$

$$\begin{bmatrix} H \\ -H \end{bmatrix} \cdot P_G = \begin{bmatrix} P_{GR}^{\max} \\ P_{GR}^{\max} \end{bmatrix}$$

За решавање на горенаведениот проблем ќе ја користиме функцијата quadprog од Matlab.

МТ (ПЕЕС)

PEEC

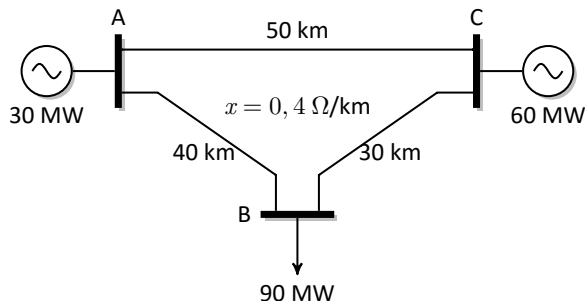
Скопје, 2017

3 / 55

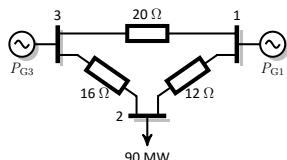
## Пример 1

Да се одредат оптималните вредности на моќностите на генераторите така што вкупните трошоци за работа да бидат минимални и да бидат исполнети сите ограничувања во системот. Максималната моќност на гранките е 50 MW.

Јазел	$P_G^{\min}$ (MW)	$P_G^{\max}$ (MW)	$a$ (€/MW <sup>2</sup> h)	$b$ (€/MWh)	$c$ (€/h)
A	30	100	100	20	0,10
C	30	100	100	15	0,12



## Пример 1



```

../programi/ees_dc3.m
1 function ees = ees_dc3()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.jazli = [
4 % jazel tip Pp(MW) oblast
5 1 1 0 1
6 2 1 90 1
7 3 3 0 1
8 ];
9
10 ees.granki = [
11 % pocetok kraj X(pu) Pmax(MW) status
12 3 1 20/121 50 1
13 3 2 16/121 50 1
14 1 2 12/121 50 1
15 ];
16 ees.generatori = [
17 % jazel P0(MW) Pmin(MW) Pmax(MW) status
18 1 60 30 100 1
19 3 30 30 100 1
20 ];
21 ees.trosoci = [
22 % jazel a(E/h) b(E/MWh) c(E/MWh^2)
23 1 100 15 0.12
24 3 100 20 0.10
25 ];

```

## Програма dcof<sup>1</sup>

```

../programi/dcof.m
1 function [ees,exitflag,output,lambda] = dcof(datoteka,snimaj)
2 if nargin == 1, snimaj = true; end
3 if isstruct(datoteka)
4 ees = datoteka;
5 else
6 ees = feval(datoteka);
7 end
8 G = ees.generatori; [PGmin,PGmax] = deal(G(:,3),G(:,4)); NG = size(G,1);
9 T = ees.trosoci; [a,b,c] = deal(T(:,2),T(:,3),T(:,4));
10 H = matrica_h(ees); PGRmax = ees.granki(:,4);
11 PP = sum(ees.jazli(:,3));
12 tic; [PG,F,exitflag,output,lambda] = ...
13 quadprog(2*diag(c),b,[H; -H],[PGRmax; PGRmax],ones(1,NG),PP,PGmin,PGmax);
14 ees.F = F + sum(a); ees.vreme = toc;
15 ees.generatori(:,2) = PG; ees = dcof(ees,false);
16 if snimaj; snimi_dcof(ees); type('dcof.txt'); end

```

<sup>1</sup>Верзијата во GNU Octave е дадена во programi/dcof\_oct.m

## Пример 1

```
>> ees = dcopf('ees_dc3');  
vreme = 0.000 sek  
F = 2212.88
```

### NAPONI NA JAZLITE

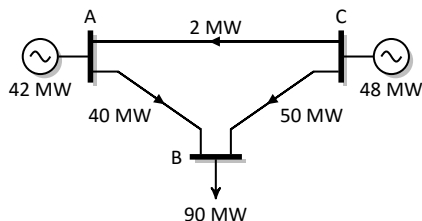
	MW	Teta(o)
1	0.0	-0.189
2	90.0	-3.031
3	0.0	0.000

### MOKNOSTI NA GENERATORITE

	PG	PGmin	PGmax
1	48.0	30.0	100.0
3	42.0	30.0	100.0

### MOKNOSTI VO GRANKITE

		MW	MWdoz	%
3	1	2.000	50.0	4.0
3	2	40.000	50.0	80.0
1	2	50.000	50.0	100.0 +



## Пример 2

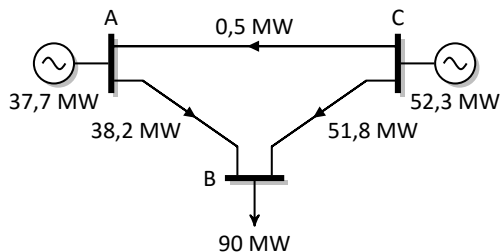
Да се реши примерот 1 без да се води сметка за ограничувањето на моќностите во гранките.

```
../programi/dcopf_2.m
```

```
1 ees = ees_dc3;  
2 ees.granki(:,4) = 500;  
3 ees = dcopf(ees);
```

Вкупните трошоци изнесуваат 2208,86 €/h

Вкупните трошоци во примерот 1 изнесуваа 2218,88 €/h



## Пример 3

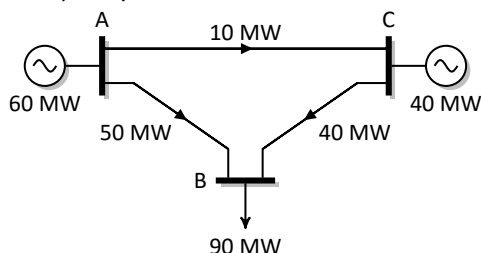
Да се реши примерот 1 за случајот кога моќност на потрошувачот во јазелот B изнесува 100 MW.

```
../programi/dcopf_3.m
```

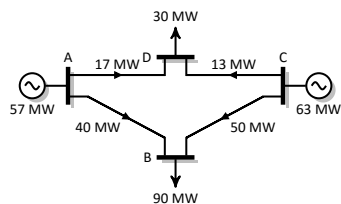
```
1 ees = ees_dc3;  
2 ees.jazli(2,3) = 100;  
3 ees = dcopf(ees);
```

Вкупните трошоци 2252,00 €/h Ако ги занемариме

ограничувањата на моќностите во гранките вкупните трошоци се 2489,77 €/h



## Пример 4



$$F = 3086,18 \text{ €/h}$$

../programi/ees\_dc4t.m

```

1 function ees = ees_dc4t()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.jazli = [
4 % jazel tip Pp(MW) oblast
5 1 1 0 1
6 2 1 90 1
7 3 1 30 1
8 4 3 0 1
9 ];
10 ees.granki = [
11 % pocetok kra] X(pu) Pmax(MW) status
12 1 2 12/121 50 1
13 1 3 10/121 50 1
14 4 2 16/121 50 1
15 4 3 10/121 50 1
16 ];
17 ees.generatori = [
18 % jazel Pg(MW) Pmin(MW) Pmax(MW) status
19 1 63 -1000 1000 1
20 4 57 -1000 1000 1
21 ];
22 ees.trosoci = [
23 % jazel a(E/h) b(E/MWh) c(E/MWh^2)
24 1 100 15 0.12
25 4 100 20 0.10
26 ];
    
```

MT (ПЕЕС)

PEEC

Скопје, 2017

10 / 55

## Можност за испорака на моќност (Load Supplying Capability, LSC)

- Во ситуации со испади во мрежата или испади на генераторски единици, доаѓа до смалување на производно-преносните капацитети на ЕЕС и се напушта економскиот начин на работа на системот
- Во таа ситуација се применува модел кој ќе овозможи минимизација на штетите кај потрошувачите поради неиспорачаната моќност и енергија
- Капацитетот на производниот дел од системот претставува сума од максималните моќности на сите расположиви генераторски единици во системот
- Преносната моќ на мрежата не може да се пресмета со просто сумирање на преносните капацитети на сите постојни водови и трансформатори

MT (ПЕЕС)

PEEC

Скопје, 2017

11 / 55

## Формулација на LSC

$$\max LSC = \sum_{i=1}^{NG} P_{Gi}$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_G$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ -\mathbf{H} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}_G = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{GR}^{\max} \\ \mathbf{P}_{GR}^{\max} \end{bmatrix}$$

$$LSC = \sum_{i=1}^{NG} P_{Gi} = \sum_{i=1}^N P_{Pi}$$

Претпоставуваме константни коефициенти на учество  $\alpha_i = \text{const.}$   
( $i = 1, 2, \dots, N$ )

MT (ПЕЕС)

PEEC

Скопје, 2017

12 / 55

## Линеарно програмирање во Matlab

- Минимизација на една линеарна функција од повеќе променливи
- Линеарни ограничувања во форма на равенки или неравенки
- Линеарното програмирање во Matlab е дадено во функцијата `linprog`

$$\min_x \mathbf{f}^T \mathbf{x}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} &\leq \mathbf{b}, \\ \mathbf{A}_{\text{eq}} \cdot \mathbf{x} &= \mathbf{b}_{\text{eq}}, \\ \mathbf{lb} &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{ub}, \end{aligned}$$

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

13 / 55

### Пример 5

Да се одреди минимумот на функцијата

$$y = -5x_1 - 4x_2 - 6x_3,$$

со следните ограничувања

$$\begin{aligned} x_1 - x_2 + x_3 &\leq 20, \\ 3x_1 + 2x_2 + 4x_3 &\leq 42, \\ 3x_1 + 2x_2 &\leq 30, \\ x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0, \quad x_3 \geq 0. \end{aligned}$$

../programi/lp\_1.m

```
1 f = [-5; -4; -6];
2 A = [1 -1 1; 3 2 4; 3 2 0];
3 b = [20; 42; 30];
4 lb = [0; 0; 0];
5 [x,fval,exitflag] = linprog(f,A,b,[],[],lb)
```

Optimization terminated.

```
x =
    0.0000
   15.0000
    3.0000
fval =
  -78.0000
exitflag =
     1
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

14 / 55

### Пример 6

Да се одреди минимумот на функцијата

$$y = -5x_1 - 4x_2 - 6x_3,$$

со следните ограничувања

$$\begin{aligned} x_1 - x_2 + x_3 &\leq 20, \\ 3x_1 + 2x_2 + 4x_3 &\leq 42, \\ 3x_1 + 2x_2 &\geq 30, \\ x_1 + x_2 &= 20, \\ x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0, \quad x_3 \geq 0, \quad x_2 \leq 18. \end{aligned}$$

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

15 / 55



## Пример 6

$$\begin{aligned}3x_1 + 2x_2 &\geq 30 \\ -3x_1 - 2x_2 &\leq -30\end{aligned}$$

```
../programi/lp_2.m
1 f = [-5; -4; -6];
2 A = [1 -1 1; 3 2 4; -3 -2 0];
3 b = [20; 42; -30];
4 Aeq = [1 1 0];
5 beq = 20;
6 lb = [0; 0; 0];
7 ub = [inf; 18; inf];
8 [x,fval,exitflag] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub)
```

Optimization terminated.

```
x =
    2.0000
   18.0000
    0.0000
fval =
  -82.0000
exitflag =
     1
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

16 / 55

## Пример 7

Некој оператор на пазарот на електрична енергија треба да набави вкупно 300 MW од тројца продавачи на електрична енергија. Првиот продавач ја нуди својата електрична енергија по цена од 70 €/MWh и нуди моќност во опсегот од 70 до 200 MW. Понудената цена на вториот продавач изнесува 75 €/MWh и тој нуди моќност во опсегот од 50 до 150 MW. Третиот продавач нуди електрична енергија по цена од 65 €/MWh во опсегот од 30 до 100 MW. Да се одреди колкава моќност треба да се земе од секој продавач за да се постигне минимална вредност на трошоците.

$$\begin{aligned}F &= 70 \cdot P_1 + 75 \cdot P_2 + 65 \cdot P_3, \\ P_1 + P_2 + P_3 &= 300, \\ 70 &\leq P_1 \leq 200, \\ 50 &\leq P_2 \leq 150, \\ 30 &\leq P_3 \leq 100.\end{aligned}$$

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

17 / 55

## Пример 7

```
../programi/lp_3.m
1 C = [70; 75; 65];
2 Aeq = [1 1 1];
3 beq = 300;
4 lb = [70; 50; 30];
5 ub = [200; 150; 100];
6 [P,F,exitflag] = linprog(C,[],[],Aeq,beq,lb,ub)
```

Optimization terminated.

```
P =
   150.0000
    50.0000
   100.0000
F =
  2.0750e+004
exitflag =
     1
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

18 / 55

## Пример 8

Го разгледуваме проблемот од примерот 7 во кој што поради определени технички проблеми дополнително се бара вкупната купена моќност од првиот и третиот продавач да не надмине 220 MW (вакво ограничување може да се воведе поради ограничените преносни можности на мрежата). Да се одреди колкава моќност треба да се земе од секој продавач во оваа ситуација за да се постигне минимална вредност на трошоците.

$$\begin{aligned}F &= 70 \cdot P_1 + 75 \cdot P_2 + 65 \cdot P_3, \\P_1 + P_2 + P_3 &= 300, \\P_1 + P_3 &\leq 220, \\70 &\leq P_1 \leq 200, \\50 &\leq P_2 \leq 150, \\30 &\leq P_3 \leq 100.\end{aligned}$$

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 19 / 55

## Пример 8

../programi/lp\_4.m

```
1 C = [70; 75; 65];
2 A = [1 0 1];
3 b = 220;
4 Aeq = [1 1 1];
5 beq = 300;
6 lb = [70; 50; 30];
7 ub = [200; 150; 100];
8 [P,F,exitflag] = linprog(C,A,b,Aeq,beq,lb,ub)
```

Optimization terminated.

```
P =
 120.0000
  80.0000
 100.0000
F =
 2.0900e+004
exitflag =
 1
```

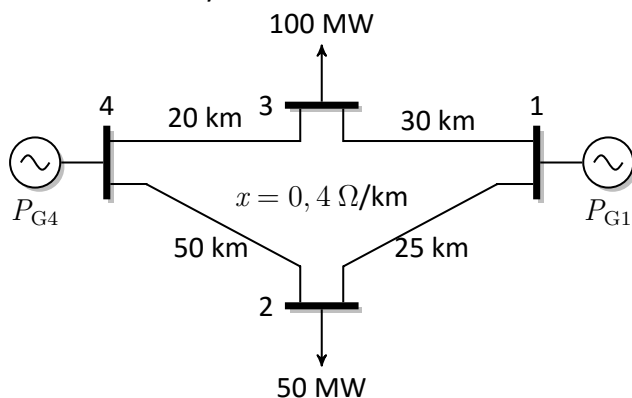
MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 20 / 55

## Пример 9

Да се одреди можност за испорака на моќност во мрежата, односно параметарот  $LSC$  на мрежата. Минималните моќности на двата генератора изнесуваат 30 MW, додека нивните максимални моќности изнесуваат 100 MW.



MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 21 / 55

## Пример 9

```

./programi/ees_dcmx_1.m

1 function ees = ees_dcmx_1()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.jazli = [
4 % jazli tip Pp(MW) oblast
5     1 1 0 1
6     2 1 100 1
7     3 1 50 1
8     4 3 0 1
9 ];
10 ees.granki = [
11 % pocetok kraj X(pu) Pmax(MW) status
12     1 2 10/121 60 1
13     1 3 12/121 60 1
14     4 3 8/121 60 1
15     4 2 20/121 60 1
16 ];
17 ees.generatori = [
18 % jazli Pg(MW) Pmin(MW) Pmax(MW) status
19     1 75 30 100 1
20     4 75 30 100 1
21 ];

```

## Програма dcmx<sup>2</sup>

$$\max LSC = \min(-LSC) = \min \left( - \sum_{i=1}^{NG} P_{Gi} \right),$$

$$\mathbf{f}^T = [ -1 \quad -1 \quad \dots \quad -1 ],$$

```

./programi/dcmx.m

1 function [ees,exitflag,output,lambda] = dcmx(datoteka,snimaj)
2 if nargin == 1, snimaj = true; end
3 if isstruct(datoteka)
4     ees = datoteka;
5 else
6     ees = feval(datoteka);
7 end
8 G = ees.generatori; [PGmin,PGmax] = deal(G(:,3),G(:,4)); NG = size(G,1);
9 H = matrica_h(ees); PGRmax = ees.granki(:,4);
10 tic; [PG,F,exitflag,output,lambda] = ...
11     linprog(-ones(NG,1),[H; -H],[PGRmax; PGRmax],[],[],PGmin,PGmax);
12 F = -F; ees.F = F; ees.vreme = toc;
13 ees.generatori(:,2) = PG; ees.jazli(:,3) = ees.jazli(:,3) * F/sum(ees.jazli(:,3));
14 ees = dcpf(ees,false);
15 if snimaj; snimi_dcpf(ees); type('dcpf.txt'); end

```

<sup>2</sup>Верзијата во GNU Octave е дадена во programi/dcmx\_oct.m

## Пример 9

```

>> ees = dcmx('ees_dcmx_1');
vreme = 0.000 sek
F = 163.04

```

### NAPONI NA JAZLITE

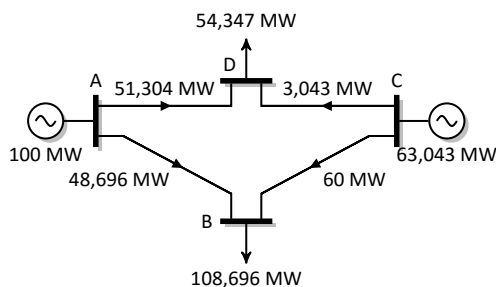
	MW	Teta(o)
1	0.00	-1.771
2	108.70	-4.612
3	54.35	-1.943
4	0.00	0.000

### MOKNOSTI NA GENERATORITE

	PG	PGmin	PGmax
1	63.04	30.0	100.0
4	100.00	30.0	100.0

### MOKNOSTI VO GRANKITE

		MW	MWdoz	%
1	2	60.000	60.0	100.0
1	3	3.043	60.0	5.1
4	3	51.304	60.0	85.5
4	2	48.696	60.0	81.2



LSC = 163,043 MW > 150 MW (8,696% повеќе)

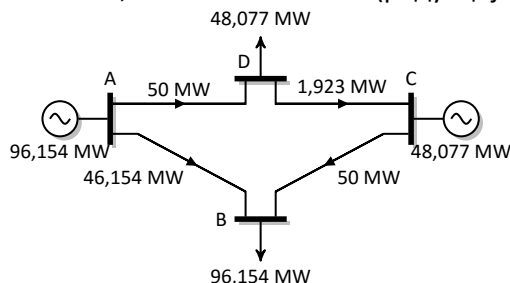
## Пример 10

Да се реши примерот 9 ако максимално дозволените моќности на сите гранки изнесуваат 50 MW.

../program1/dcmx\_2.m

```
1 ees = ees_dcmx_1;
2 ees.granki(:,4) = 50;
3 ees = dcmx(ees);
```

$LSC = 144,231 \text{ MW} < 150 \text{ MW}$  (редукција од 3,846%)



MT (ПЕЕС)

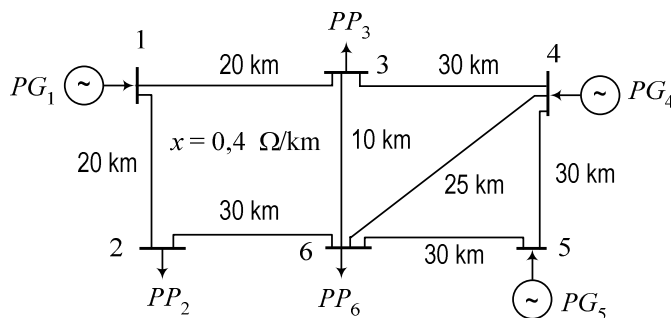
ПЕЕС

Скопје, 2017 25 / 55

## Пример 11

За ЕЕС на сликата сите водови имаат максимално дозволене моќности 60 MW

- Да се пресмета можноста за испорака на моќност во дадениот ЕЕС. Дали ќе биде можно да се задоволат барањата за моќност на сите потрошувачи?
- Колкава ќе биде можноста за испорака на моќност ако се исклучи гранката 3-6?



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 26 / 55

## Пример 11

Минимални и максимални моќности на генераторите

Јазел	$P_G^{\min}$ (MW)	$P_G^{\max}$ (MW)
1	40	100
4	60	120
5	50	80

Моќности на потрошувачите

Јазел	$P_P$ (MW)
2	90
3	100
6	80

MT (ПЕЕС)

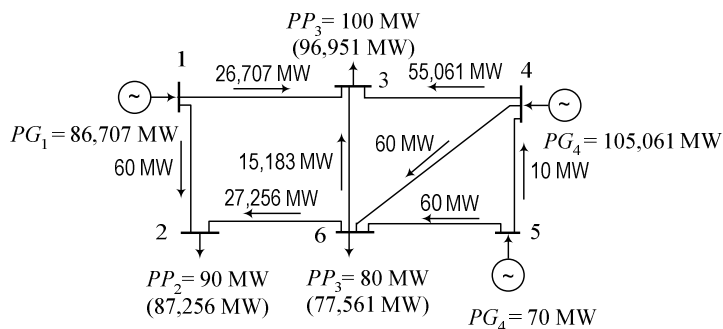
ПЕЕС

Скопје, 2017 27 / 55

## Пример 11а

```
>> ees = dcmx('ees_dcmax_3');
```

LSC = 261,8 MW < 270 MW



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

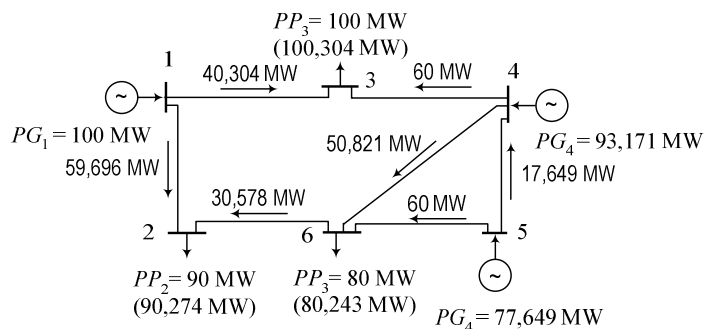
Скопје, 2017 28 / 55

## Пример 11б

```
../programi/dcmax_3.m
```

```
1 ees = ees_dcmax_3;
2 ees.granki(8,5) = 0;
3 ees = dcmx(ees);
```

LSC = 270,8 MW > 270 MW



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 29 / 55

## Интерконекции на ЕЕС



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 30 / 55

## Интерконекции на ЕЕС

Имаме  $K$  меѓусебно поврзани ЕЕС: за секој подсистем  $(1, 2, \dots, K)$  равенка за биланс на моќности

- секој од системите во потполност ги задоволува потребите од моќност на сите свои потрошувачи (размената на моќност со останатите системи е еднаква на нула),
- некои од системите делумно ги задоволуваат потребите од моќност на своите потрошувачи при што остатокот од моќноста го увезуваат од другите системи

## Интерконекции на ЕЕС

$$F = \sum_{i=1}^{N_G} f_i = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2),$$

техничките ограничувања за моќностите на генераторите

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_G$$

ограничувањата за максималните моќности на гранките

$$\begin{bmatrix} H \\ -H \end{bmatrix} \cdot P_G = \begin{bmatrix} P_{GR}^{\max} \\ P_{GR}^{\max} \end{bmatrix}.$$

биланс на моќности без размени

$$\sum_{i \in \alpha_j} P_{Gi} = \sum_{i \in \beta_j} P_{Pi}, \quad j = 1, 2, \dots, K$$

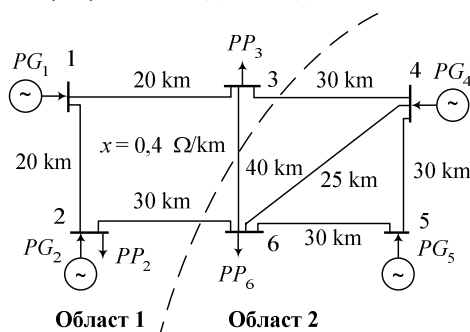
биланс на моќности со размени

$$\sum_{i \in \alpha_j} P_{Gi} = \sum_{i \in \beta_j} P_{Pi} + \Delta P_j, \quad j = 1, 2, \dots, K, \quad \sum_{j=1}^K \Delta P_j = 0.$$

## Пример 12

За ЕЕС на сликата сите водови имаат максимално дозволени моќности 70 MW

- Да се одредат моќностите на генераторите за случајот кога целиот систем ќе се смета како да е еден единствен ЕЕС без да се води сметка за одделните области,
- Да се одредат моќностите на генераторите во одделните области така што да нема размена на моќност (увоз/извоз) помеѓу нив,
- Да се одредат моќностите на генераторите во одделните области така што областа 1 да извезува моќност од 10 MW во областа 2,
- Да се одредат моќностите на генераторите во одделните области така што областа 1 да увезува моќност од 10 MW од областа 2.



## Пример 12

Карактеристики на генераторите

Јазел	$P_G^{\min}$ (MW)	$P_G^{\max}$ (MW)	$a$ (€/h)	$b$ (€/MWh)	$c$ (€/MW <sup>2</sup> h)
1	40	120	110	20	0,10
2	40	110	100	18	0,12
4	60	120	50	12	0,05
6	50	80	60	16	0,07

Моќности на потрошувачите

Јазел	$P_P$ (MW)
2	90
3	100
6	160

## Пример 12 – податоци (1)

../programi/ees\_inter\_1.m

```
1 function ees = ees_inter_1()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.jazli = [
4 % jazel tip Pp(MW) oblast
5     1 3 0 1
6     2 1 90 1
7     3 1 100 1
8     4 1 0 2
9     5 1 0 2
10    6 1 160 2
11 ];
12 ees.granki = [
13 % pocetok kraj X(pu) Pmax(MW) status
14     1 3 8/121 70 1
15     1 2 8/121 70 1
16     2 6 12/121 70 1
17     3 4 12/121 70 1
18     4 5 12/121 70 1
19     4 6 10/121 70 1
20     5 6 12/121 70 1
21     3 6 16/121 70 1
22 ];
23 ees.generatori = [
24 % jazel Pg(MW) Pmin(MW) Pmax(MW) status
25     1 94 40 120 1
26     2 86 40 110 1
```

## Пример 12 – податоци (2)

```
27     4 116 60 120 1
28     5 54 50 80 1
29 ];
30 ees.trosoci = [
31 % jazel a(E/h) b(E/MWh) c(E/MWh^2)
32     1 110 20 0.10
33     2 100 18 0.12
34     4 50 12 0.05
35     5 60 16 0.07
36 ];
37 ees.razmena = [
38 % zona_1 zona_2 P
39     1 2 10
40 ];
41 ees.gen_izvoz = [4 5];
42 ees.gen_uvoz = [1 2];
```

## Програма dcof\_inter (1)

```
./programi/dcof_inter.m
1 function [ees,exitflag,output,lambda] = dcof_inter(datoteka,uvazi_razmeni,snimaj)
2 if nargin == 1, uvazi_razmeni = true; snimaj = true; end
3 if isstruct(datoteka)
4     ees = datoteka;
5 else
6     ees = feval(datoteka);
7 end
8 G = ees.generatori; [PGmin,PGmax] = deal(G(:,3),G(:,4)); NG = size(G,1);
9 T = ees.trosoci; [a,b,c] = deal(T(:,2),T(:,3),T(:,4));
10 H = matrica_h(ees); PGRmax = ees.granki(:,4);
11 PP = ees.jazli(:,3);
12 oblast = ees.jazli(:,4); NO = max(oblast);
13 SumaPP = zeros(NO,1);
14 for i = 1:NO
15     j = oblast == i;
16     SumaPP(i) = sum(PP(j));
17 end
18 [O1,O2,DP] = deal(ees.razmena(:,1),ees.razmena(:,2),ees.razmena(:,3));
19 for i = 1:size(DP,1)
20     SumaPP(O1(i)) = SumaPP(O1(i)) + DP(i);
21     SumaPP(O2(i)) = SumaPP(O2(i)) - DP(i);
22 end
23 if uvazi_razmeni
24     oblastg = oblast(ees.generatori(:,1));
25     SumaG = zeros(NO,NG);
26     for i = 1:NO
```

MT (PEEC)

PEEC

Konje, 2017 37 / 55

## Програма dcof\_inter (2)

```
27     j = oblastg == i;
28     SumaG(i,j) = 1;
29 end
30 tic; [PG,F,exitflag,output,lambda] = ...
31 quadprog(2*diag(c),b,[H; -H],[PGRmax; PGRmax],SumaG,SumaPP,PGmin,PGmax);
32 ees.F = F + sum(a); ees.vreme = toc;
33 else
34     tic; [PG,F,exitflag,output,lambda] = ...
35     quadprog(2*diag(c),b,[H; -H],[PGRmax; PGRmax],ones(1,NG),sum(PP),PGmin,
36     PGmax);
37 ees.F = F + sum(a); ees.vreme = toc;
38 end
39 ees.generatori(:,2) = PG; ees = dcof(ees,false);
40 if snimaj; snimi_dcof(ees); type('dcof.txt'); end
```

MT (PEEC)

PEEC

Konje, 2017 38 / 55

## Пример 12 – биланс

$$\text{SumaG} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{SumaPP} = \begin{bmatrix} 190 \\ 160 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ P_{G3} \\ P_{G4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G1} + P_{G2} \\ P_{G3} + P_{G4} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P_{G1} + P_{G2} \\ P_{G3} + P_{G4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 190 \\ 160 \end{bmatrix}.$$

MT (PEEC)

PEEC

Konje, 2017 39 / 55



## Пример 12 – решение

a)

```
>> ees = dcof_inter('ees_inter_1', false, true);
```

б)

```
../programi/inter_lb.m
1 ees = ees_inter_1;
2 ees.razmena = [1 2 0];
3 ees = dcof_inter(ees);
```

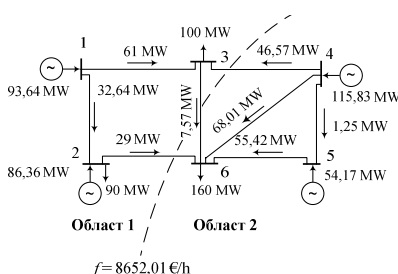
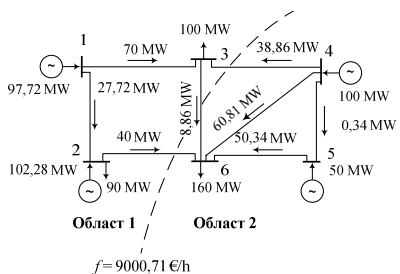
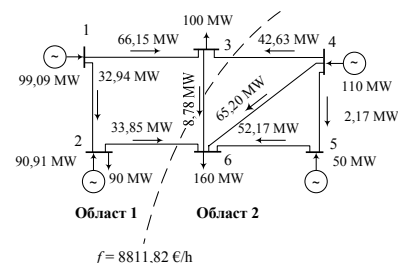
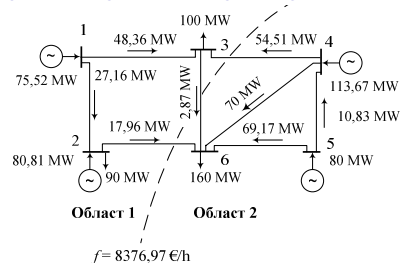
в)

```
>> ees = dcof_inter('ees_inter_1');
```

г)

```
../programi/inter_lg.m
1 ees = ees_inter_1;
2 ees.razmena = [2 1 10];
3 ees = dcof_inter(ees);
```

## Пример 12 – резултати

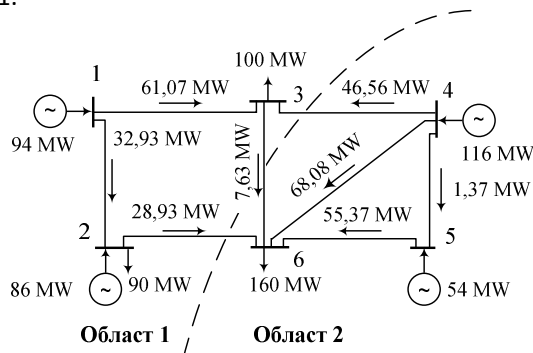


## Проценка на преносните можности на ЕЕС – ТТС и НТС

- Преносните можности на ЕЕС се дефинираат за системи коишто работат паралелно во заедничка интерконекција
- Под преносни можности на еден ЕЕС ќе ја подразбираме неговата способност да остварува пренос на активна моќност од една област во друга преку сите преносни водови меѓу тие две области.
- Преносните можности се добиваат по пат на пресметки коишто ги прави секој оператор на преносниот систем (кај нас тоа е МЕПСО) за областа која тој ја управува појдувајќи од еден зададен работен режим на целиот интерконектиран ЕЕС.
- Заради усогласување на пресметките на одделните оператори организацијата ETSO (European Transmission System Operators) разработила процедура за определување на показателите на преносните можности.

## Пример 13

Се разгледува интерконекцијата од примерот 12 за која што е познат еден работен режим (основно сценарио) прикажан на сликата. Да се одреди размената од областа 2 во областа 1 во основното сценарио која што е позната под името Base Case Exchange (BCE), а потоа да се пресмета колкава максимална моќност која што е позната под името Total Transfer Capacity (TTC) ќе може да се извезе од областа 2 во областа 1.



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

43 / 55

## Дефиниција на проблемот (1)

Генератори кои треба да ја зголемуваат моќноста  $\sigma = [4, 5]$   
 Генератори кои треба да ја намалуваат моќноста  $\omega = [1, 2]$

$$\max F = \sum_{i \in \sigma} P_{Gi},$$

биланс на моќности

$$\sum_{i \in \sigma} P_{Gi} + \sum_{j \in \omega} P_{Gj} = \sum_{i \in \sigma} P_{Gi}^{(0)} + \sum_{j \in \omega} P_{Gj}^{(0)},$$

генераторите коишто учествуваат во зголемувањето/намалувањето на моќностите на крајот од постапката заедно треба да имаат толку моќност колку што заедно имале во основното сценарио

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

44 / 55

## Дефиниција на проблемот (2)

технички ограничувања за моќностите на генераторите

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_G,$$

ограничувањата за максималните моќности на гранките

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ -\mathbf{H} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}_G = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{GR}^{\max} \\ \mathbf{P}_{GR}^{\max} \end{bmatrix}.$$

Генератори кои не учествуваат во размената на моќности

$$P_{Gi}^{\min} = P_{Gi}^{\max} = P_{Gi}^{(0)}, \quad i \notin \{\sigma \cup \omega\}.$$

$$\max F = P_{G4} + P_{G5} = 1 \cdot P_{G4} + 1 \cdot P_{G5} + 0 \cdot P_{G1} + 0 \cdot P_{G2},$$

$$P_{G4} + P_{G5} + P_{G1} + P_{G2} = P_{G4}^{(0)} + P_{G5}^{(0)} + P_{G1}^{(0)} + P_{G2}^{(0)},$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

45 / 55

## Програма dcttc (1)

```

./programi/dcttc.m
1 function [ees,exitflag,output,lambda] = dcttc(datoteka,snimaj)
2 if nargin == 1, snimaj = true; end
3 if isstruct(datoteka)
4     ees = datoteka;
5 else
6     ees = feval(datoteka);
7 end
8 ees = dcpf(ees,false);
9 G = ees.generatori; [PG0,PGmin0,PGmax0] = deal(G(:,2),G(:,3),G(:,4)); NG = length(
    PG0);
10 H = matrica_h(ees); PGRmax = ees.granki(:,4);
11 v1 = multifind(ees.generatori(:,1),ees.gen_izvoz);
12 v2 = multifind(ees.generatori(:,1),ees.gen_uvvoz);
13 v = [v1 v2];
14 PGmin = PG0; PGmin(v) = PGmin0(v);
15 PGmax = PG0; PGmax(v) = PGmax0(v);
16 f = zeros(1,NG); f(v1) = 1;
17 Aeq = zeros(1,NG); Aeq(v) = 1;
18 beq = sum(PG0(v));
19 tic; [PG,F,exitflag,output,lambda] = ...
20     linprog(-f,[H; -H],[PGRmax; PGRmax],Aeq,beq,PGmin,PGmax);
21 ees.F = -F; ees.vreme = toc;
22 ees.DE = sum(PG(v1)-PG0(v1));
23 ees.TTC = [ees.generatori(v,1) PG(v) PG0(v)];
24 ees.generatori(:,2) = PG; ees = dcpf(ees,false);

```

MT (PEEC)

PEEC

Konje, 2017 46 / 55

## Програма dcttc (2)

```

25 if snimaj; snimi_dcpf(ees); type('dcpf.txt'); end
26
27 function v = multifind(u,v)
28 for i = 1:length(v)
29     j = find(u == v(i));
30     v(i) = j;
31 end

```

MT (PEEC)

PEEC

Konje, 2017 47 / 55

## Пример 13

```
>> ees = dcttc('ees_inter_1');
```

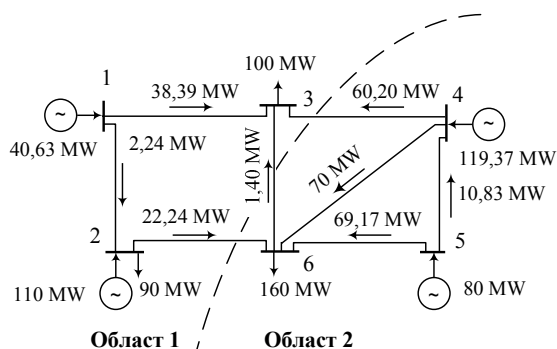
```

ees.DE =
    29.3699
ees.TTC =
     4 119.3699 116.0000
     5  80.0000  54.0000
     1  40.6301  94.0000
     2 110.0000  86.0000

```

$\Delta E = 29,3699 \text{ MW}$

$$TTC = BCE + \Delta E = 10 + 29,3699 = 39,3699 \text{ MW}.$$



MT (PEEC)

PEEC

Konje, 2017 48 / 55

## Пример 13

$$NTC = TTC - TRM$$

$$TRM = 0,1 \cdot TTC$$

$$NTC = 0,9 \cdot TTC = 0,9 \cdot 39,3699 = 35,4329 \text{ MW.}$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

49 / 55

## Пример 14

Да се реши примерот 13 на таков начин што нема да се дозволи генераторот 2 да ја зголеми својата моќност.

../programi/dcttc\_2.m

```
1 ees = ees_inter_1;  
2 ees.generatori(2,4) = 86;  
3 ees = dcttc(ees);
```

```
ees.DE =          ees.TTC =  
24.6870          4 114.6870 116.0000  
                5  80.0000  54.0000  
                1  69.3130  94.0000  
                2  86.0000  86.0000
```

$$TTC = BCE + \Delta E = 10 + 24,687 = 34,687 \text{ MW,}$$

$$NTC = 0,9 \cdot TTC = 0,9 \cdot 34,687 = 31,218 \text{ MW,}$$

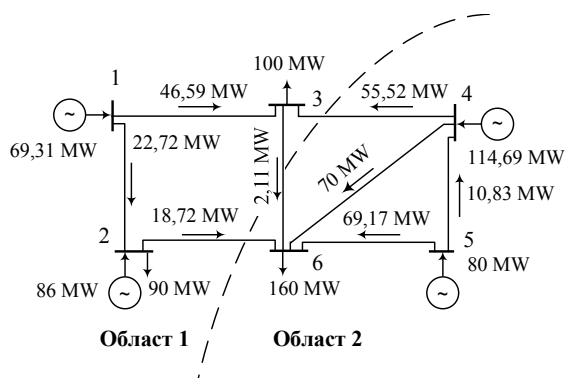
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

50 / 55

## Пример 14



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

51 / 55

## Пример 15

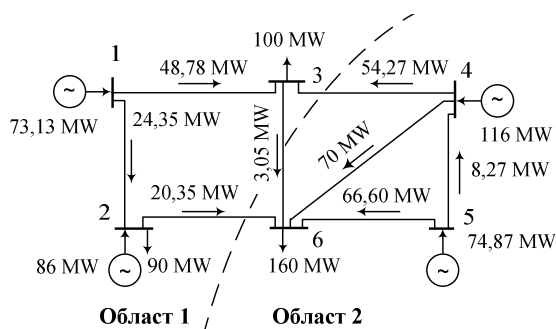
Да се реши примерот 13 за случајот кога е дозволено зголемување на моќноста само на генераторот во јазелот 5 од областа 2 и намалување на моќноста само на генераторот во јазелот 1 од областа 1.

```
../programi/dcttc_3.m  
1 ees = ees_inter_1;  
2 ees.gen_izvoz = 5;  
3 ees.gen_uvoz = 1;  
4 ees = dcttc(ees);  
  
ees.DE =          ees.TTC =  
20.8730          5 74.8730  54.0000  
                1 73.1270  94.0000
```

$$TTC = BCE + \Delta E = 10 + 20,873 = 30,873 \text{ MW},$$

$$NTC = 0,9 \cdot TTC = 0,9 \cdot 30,873 = 27,786 \text{ MW},$$

## Пример 15



## Пример 16

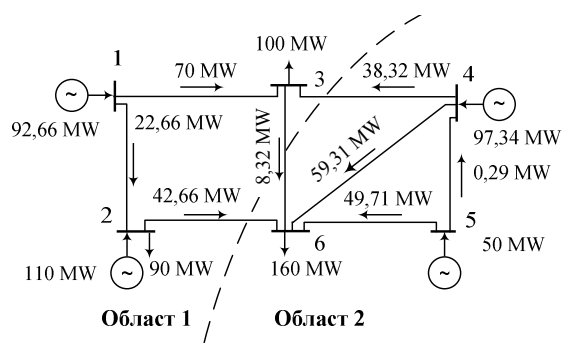
За примерот 13 да се пресмета колкава максимална моќност може да се изведе од областа 1 во областа 2.

```
../programi/dcttc_4.m  
1 ees = ees_inter_1;  
2 ees.gen_izvoz = [1 2];  
3 ees.gen_uvoz = [4 5];  
4 ees = dcttc(ees);  
  
ees.DE =          ees.TTC =  
22.6590          1 92.6590  94.0000  
                2 110.0000  86.0000  
                4 97.3410  116.0000  
                5 50.0000  54.0000
```

$$TTC = BCE + \Delta E = -10 + 22,659 = 12,659 \text{ MW},$$

$$NTC = 0,9 \cdot TTC = 0,9 \cdot 12,659 = 11,393 \text{ MW},$$

# Пример 16



# Режими на работа на ЕЕС

## Оптимална работа на ЕЕС составен од термоцентрали и преносна мрежа моделирана со АС моделот

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи  
Факултет за електротехника и информациски технологии  
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk  
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2017

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

1 / 49

### Формулација на проблемот

нелинеарна функција

$$\min F(\mathbf{x}, \mathbf{u}),$$

нелинеарни ограничувања

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0,$$

$$h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0,$$

- $\mathbf{x}$  – состојбени променливи
  - ▶ ефективните вредности на напоните и нивните фазни агли
  - ▶ реактивните моќности на генераторите кои вршат контрола на напоните
  - ▶ струите во водовите и трансформаторите
- $\mathbf{u}$  – контролни променливи
  - ▶ активните моќности на генераторите и ефективните вредности на нивните напоните
  - ▶ реактивните моќности на синхроните компензатори
  - ▶ преносните односи на трансформаторите
  - ▶ адмитанциите на компензационите уреди

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

2 / 49

### Ограничувања

биланс на моќности по јазли

$$\underline{U}_i \left( \sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij} \underline{U}_j \right)^* + P_{Pi} + jQ_{Pi} - P_{Gi} - jQ_{Gi} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

граници за моќностите на генераторите

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n_G,$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n_G.$$

дискретни вредности за преносните односи на трансформаторите

$$m_t \in \{m_t^{(1)}, m_t^{(2)}, \dots, m_t^{(n)}\}.$$

граници за моќностите на гранките

$$S_{GRi} \leq S_{GRi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

граници за напоните

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

3 / 49

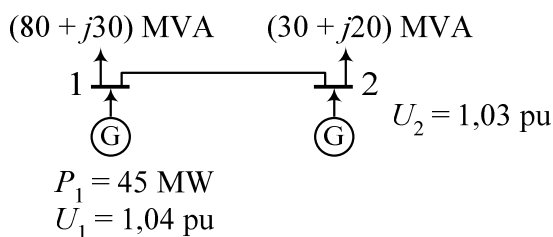
## Функција на цел

При одредувањето на оптимални текови на моќности главно се користат следните видови функции на цел

- Минимизација на производните трошоци – Тоа е најчесто користена функција на цел. Кривата на трошоци на генераторите е најбитен фактор за добивање на што е можно пореални резултати.
- Минимизација на загубите на активна моќност – Се регулираат преносните односи на трансформаторите и ефективните вредности на напоните на јазлите. Редукција на тековите на реактивни моќности и одржување на задоволителни напонски прилики.
- Минимизација на емисиите на гасови од термоцентралите – Слично со минимизација на трошоци само што се користат соодветни криви на емисии на гасови ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ).
- Комбинација од наведените.

## Пример 1

На сликата е прикажан едноставен ЕЕС во кој гранката 1–2 ги има следните параметри:  $R = 0,039669$  pu,  $X = 0,132231$  pu и  $B = 0,013552$  pu и максимално дозволена привидна моќност од 30 MVA. Базниот напон е 110 kV, базната моќност е 100 MVA. Границите за напоните се  $0,95 < U_i < 1,1$ . Да се провери дали некое од техничните ограничувања во системот не е задоволено. Доколку има прекршени технички ограничувања, да се идентификуваат контролните променливи во системот и со метод на проба да се најде решение кое ќе ги задоволува сите технички ограничувања.



## Пример 1 – генератори

Јазел	$P_G^{\min}$ (MW)	$P_G^{\max}$ (MW)	$a$ (€/h)	$b$ (€/MWh)	$c$ (€/MW <sup>2</sup> h)	$Q_G^{\min}$ (Mvar)	$Q_G^{\max}$ (Mvar)
1	30	100	100	20	0,10	-100	100
2	30	100	100	15	0,12	-100	100



## Пример 1

```

./programi/ees_acopf_1.m
1 function ees = ees_acopf_1()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.jazli = [
4 % jazel tip Ub(kV) Pp(MW) Qp(Mvar) Qsh(Mvar) oblast Umin(pu) Umax(pu)
5     1 2 110 80 30 0 1 0.95 1.1
6     2 3 110 30 20 0 1 0.95 1.1
7 ];
8 ees.granki = [
9 % pocetok kraj R(pu) X(pu) B(pu) m(pu) Smax(MVA) status
10    2 1 0.039669 0.132231 0.013552 1.000 30 1
11 ];
12 ees.generatori = [
13 % jazel Pg(MW) Qg(Mvar) Ug(pu) Pmin(MW) Pmax(MW) Qmin(Mvar) Qmax(Mvar) status
14    1 45 0 1.04 30 100 -100 100 1
15    2 0 0 1.03 30 100 -100 100 1
16 ];
17 ees.trosoci = [
18 % jazel a(E/h) b(E/MWh) c(E/MWh^2)
19    1 100 20 0.10
20    2 100 15 0.12
21 ];

```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 7 / 49

## Пример 1

```

>> acpf('ees_acopf_1');
konverg = 1, iter = 3, vreme = 0.000 sek

```

ZAGUBI

```

DP = 0.587 MW, DQ = 0.506 Mvar

```

NAPONI NA JAZLITE

	MW	Mvar	Mvar(sh)	U(pu)	Teta(o)	U(kV)
1	80.0	30.0	0.0	1.040000	-2.888	114.400
2	30.0	20.0	0.0	1.030000	0.000	113.300

MOKNOSTI NA GENERATORITE

	PG	QG	PGmin	PGmax	QGmin	QGmax
1	45.000	48.661	30.0	100.0	-100.0	100.0
2	65.587	1.845	30.0	100.0	-100.0	100.0

MOKNOSTI VO GRANKITE

		MW	Mvar	MW	Mvar	MVA	MVAdoz	%
2	1	35.587	-18.155	35.000	-18.661	39.951	30.0	133.2 +

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 8 / 49

## Пример 1 – трошоци

$$\begin{aligned}
 F &= \sum_{i=1}^2 (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) = \\
 &= 100 + 20 \cdot 45 + 0,10 \cdot 45^2 + 100 + 15 \cdot 65,587 + 0,12 \cdot 65,587^2 = \\
 &= 2802,50 \text{ €/h.}
 \end{aligned}$$

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 9 / 49

## Пример 1 – проба 1 – $P_{G1} = 50 \text{ MW}$

../programi/acopf\_1a.m

```
1 ees = ees_acopf_1;
2 ees.generatori(1,2) = 50;
3 acpf(ees);
```

konverg = 1, iter = 3, vreme = 0.001 sek

ZAGUBI

DP = 0.444 MW, DQ = 0.029 Mvar

NAPONI NA JAZLITE

	MW	Mvar	Mvar(sh)	U(pu)	Teta(o)	U(kV)
1	80.0	30.0	0.0	1.040000	-2.497	114.400
2	30.0	20.0	0.0	1.030000	0.000	113.300

MOKNOSTI NA GENERATORITE

	PG	QG	PGmin	PGmax	QGmin	QGmax
1	50.000	46.901	30.0	100.0	-100.0	100.0
2	60.444	3.128	30.0	100.0	-100.0	100.0

MOKNOSTI VO GRANKITE

		MW	Mvar	MW	Mvar	MVA	MVAdoz	%
2	1	30.444	-16.872	30.000	-16.901	34.807	30.0	116.0 +

Navigation icons

MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017

10 / 49

## Пример 1 – проба 1 – трошоци

$$F = \sum_{i=1}^2 (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) =$$

$$= 100 + 20 \cdot 45 + 0,10 \cdot 45^2 + 100 + 15 \cdot 60,444 + 0,12 \cdot 60,444^2 =$$

$$= 2795,08 \text{ €/h,}$$

Navigation icons

MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017

11 / 49

## Пример 1 – проба 2 – $U_2 = 1,1 \text{ pu}$

../programi/acopf\_1b.m

```
1 ees = ees_acopf_1;
2 ees.generatori(1,2) = 50;
3 ees.generatori(2,4) = 1.1;
4 acpf(ees);
```

konverg = 1, iter = 2, vreme = 0.001 sek

ZAGUBI

DP = 0.859 MW, DQ = 1.312 Mvar

NAPONI NA JAZLITE

	MW	Mvar	Mvar(sh)	U(pu)	Teta(o)	U(kV)
1	80.0	30.0	0.0	1.040000	-1.232	114.400
2	30.0	20.0	0.0	1.100000	0.000	121.000

MOKNOSTI NA GENERATORITE

	PG	QG	PGmin	PGmax	QGmin	QGmax
1	50.000	-8.723	30.0	100.0	-100.0	100.0
2	60.859	60.035	30.0	100.0	-100.0	100.0

MOKNOSTI VO GRANKITE

		MW	Mvar	MW	Mvar	MVA	MVAdoz	%
2	1	30.859	40.035	30.000	38.723	50.548	30.0	168.5 +

Navigation icons

MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017

12 / 49

## Пример 1 – проба 2 – трошоци

$$F = \sum_{i=1}^2 (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) =$$

$$= 100 + 20 \cdot 50 + 0,10 \cdot 50^2 + 100 + 15 \cdot 60,859 + 80,12 \cdot 60,859^2 =$$

$$= 2807,34 \text{ €/h,}$$

Navigation icons

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

13 / 49

## Пример 1 – проба 3 – $U_1 = 1,09$ pu

../programi/acopf\_1c.m

```
1 ees = ees_acopf_1;
2 ees.generatori(1,2) = 50;
3 ees.generatori(2,4) = 1.1;
4 ees.generatori(1,4) = 1.09;
5 acpf(ees);
```

konverg = 1, iter = 3, vreme = 0.001 sek

ZAGUBI

DP = 0.301 MW, DQ = -0.622 Mvar

NAPONI NA JAZLITE

	MW	Mvar	Mvar(sh)	U(pu)	Teta(o)	U(kV)
1	80.0	30.0	0.0	1.090000	-1.920	119.900
2	30.0	20.0	0.0	1.100000	0.000	121.000

MOKNOSTI NA GENERATORITE

	PG	QG	PGmin	PGmax	QGmin	QGmax
1	50.000	30.461	30.0	100.0	-100.0	100.0
2	60.301	18.918	30.0	100.0	-100.0	100.0

MOKNOSTI VO GRANKITE

		MW	Mvar	MW	Mvar	MVA	MVA doz	%
2	1	30.301	-1.082	30.000	-0.461	30.320	30.0	101.1 +

Navigation icons

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

14 / 49

## Пример 1 – проба 3 – трошоци

$$F = \sum_{i=1}^2 (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) =$$

$$= 100 + 20 \cdot 50 + 0,10 \cdot 50^2 + 100 + 15 \cdot 60,301 + 0,12 \cdot 60,301^2 =$$

$$= 2790,86 \text{ €/h,}$$

Navigation icons

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

15 / 49

## Пример 2

За примерот 1 да се напишат равенките со кои што е формулиран проблемот на оптимални текови на моќности. Функцијата на цел која што треба да се минимизира е еднаква на вкупните трошоци за работата на генераторите во системот.

Променливите може да се поделат во три групи

- Контролни променливи,
- Состојбени променливи,
- Зависни променливи.

За секој тип променливи се пишуваат соодветни равенки или неравенки според одредени правила.

## Пример 2 – контролни променливи

Активни моќности и ефективните вредности на напоните во PU јазлите во системот, како и ефективната вредност на напонот на балансниот јазел. Во овој случај контролните променливи ќе бидат  $P_{G1}$ ,  $U_1$  и  $U_2$ .

**За секоја контролна променлива се пишува по едно ограничување од облик на двојно неравенство** за технички ограничувања.

$$\begin{aligned}P_{G1}^{\min} &\leq P_{G1} \leq P_{G1}^{\max}, \\U_1^{\min} &\leq U_1 \leq U_1^{\max}, \\U_2^{\min} &\leq U_2 \leq U_2^{\max},\end{aligned}$$

$$0,3 \leq P_{G1} \leq 1,$$

$$0,95 \leq U_1 \leq 1,1,$$

$$0,95 \leq U_2 \leq 1,1.$$

## Пример 2 – состојбени променливи

Ефективните вредности на напоните и фазните агли кои се добиени како резултат од пресметките на напоните со примената на Њутн-Рафсоновиот метод.

**За секоја состојбена променлива се пишува по едно ограничување од видот на равенство** кое се добива од равенките за инјектирани активни и реактивни моќности во јазлите.

За фазен агол се пишува равенка за  $P_i$  за напон се пишува равенка за  $Q_i$ .  
за  $\theta_1$  имаме

$$P_1 = P_{G1} - P_{P1} = U_1 (G_{11} U_1 + G_{12} U_2 \cos \theta_{12} + B_{12} U_2 \sin \theta_{12}),$$

$$P_1 = P_{G1} - P_{P1} = G_{11} U_1^2 + U_1 U_2 (G_{12} \cos \theta_1 + B_{12} \sin \theta_1),$$

$$P_{G1} = P_{P1} + G_{11} U_1^2 + U_1 U_2 (G_{12} \cos \theta_1 + B_{12} \sin \theta_1).$$

## Пример 2 – зависни променливи

Реактивните моќности на генераторите од ПУ јазлите, активната моќност на генераторот во балансниот јазел, како и привидните моќности на двата краја од сите гранки во мрежата.

За секоја зависна променлива се пишува по едно ограничување од видот на неравенство кое се добива од равенките за инјектирани активни и реактивни моќности во јазлите и тековите на моќности во гранките.

$$\begin{aligned}P_2 &= P_{G2} - P_{P2} = G_{22}U_2^2 + U_1U_2(G_{12}\cos\theta_1 - B_{12}\sin\theta_1), \\Q_1 &= Q_{G1} - Q_{P1} = -B_{11}U_1^2 + U_1U_2(G_{12}\sin\theta_1 - B_{12}\cos\theta_1), \\Q_2 &= Q_{G2} - Q_{P2} = -B_{22}U_2^2 + U_1U_2(-G_{12}\sin\theta_1 - B_{12}\cos\theta_1),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{G2} &= P_{P2} + G_{22}U_2^2 + U_1U_2(G_{12}\cos\theta_1 - B_{12}\sin\theta_1), \\Q_{G1} &= Q_{P1} - B_{11}U_1^2 + U_1U_2(G_{12}\sin\theta_1 - B_{12}\cos\theta_1), \\Q_{G2} &= Q_{P2} - B_{22}U_2^2 + U_1U_2(-G_{12}\sin\theta_1 - B_{12}\cos\theta_1),\end{aligned}$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

19 / 49

## Пример 2 – зависни ограничувања

$$\begin{aligned}0,3 &\leq P_{P2} + G_{22}U_2^2 + U_1U_2(G_{12}\cos\theta_1 - B_{12}\sin\theta_1) \leq 1, \\-1 &\leq Q_{P1} - B_{11}U_1^2 + U_1U_2(G_{12}\sin\theta_1 - B_{12}\cos\theta_1) \leq 1, \\-1 &\leq Q_{P2} - B_{22}U_2^2 + U_1U_2(-G_{12}\sin\theta_1 - B_{12}\cos\theta_1) \leq 1.\end{aligned}$$

моќности на двата краја од гранката 1–2

$$\begin{aligned}\underline{S}'_{1-2} &= \underline{U}_1 \left( \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{R + jX} + j\frac{B}{2}\underline{U}_1 \right)^*, \\ \underline{S}''_{1-2} &= \underline{U}_2 \left( \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{R + jX} - j\frac{B}{2}\underline{U}_2 \right)^*,\end{aligned}$$

$$\left| \underline{U}_1 \left( \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{R + jX} + j\frac{B}{2}\underline{U}_1 \right)^* \right| \leq 0,3,$$

$$\left| \underline{U}_2 \left( \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{R + jX} - j\frac{B}{2}\underline{U}_2 \right)^* \right| \leq 0,3.$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

20 / 49

## Пример 2 – функција на цел

$$F = \sum_{i=1}^2 (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2).$$

$$F = 200 + 2000P_{G1} + 1500P_{G2} + 1000P_{G1}^2 + 1200P_{G2}^2.$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 2,0814 & -2,0814 \\ -2,0814 & 2,0814 \end{bmatrix} \text{ pu}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -6,9313 & 6,9381 \\ 6,9381 & -6,9313 \end{bmatrix} \text{ pu}.$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

21 / 49

## Пример 2 – комплет равенки

$$F = 200 + 2000P_{G1} + 1500P_{G2} + 1000P_{G1}^2 + 1200P_{G2}^2.$$

$$0,3 \leq P_{G1} \leq 1,$$

$$0,95 \leq U_1 \leq 1,1,$$

$$0,95 \leq U_2 \leq 1,1,$$

$$P_{G1} = 0,8 + 2,0814U_1^2 + U_1U_2(-2,0814\cos\theta_1 + 6,9381\sin\theta_1),$$
$$0,3 \leq 0,3 + 2,0814U_2^2 + U_1U_2(-2,0814\cos\theta_1 - 6,9381\sin\theta_1) \leq 1,$$
$$-1 \leq 0,3 + 6,9313U_1^2 + U_1U_2(-2,0814\sin\theta_1 - 6,9381\cos\theta_1) \leq 1,$$
$$-1 \leq 0,2 + 6,9313U_2^2 + U_1U_2(2,0814\sin\theta_1 - 6,9381\cos\theta_1) \leq 1.$$

Ограничувањето за привидната моќност на двата краја на гранката 1–2 не е напишано заради неговата гломазност.

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

22 / 49

## Нелинеарно програмирање во Matlab

$$\min_x f(\mathbf{x}),$$

$$\mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0,$$

$$\mathbf{c}_{\text{eq}}(\mathbf{x}) = 0,$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b},$$

$$\mathbf{A}_{\text{eq}} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_{\text{eq}},$$

$$\mathbf{lb} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{ub},$$

```
[x,fval,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,
options,p1,p2,...)
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

23 / 49

## Пример 3

$$f(x_1, x_2) = 5 - x_1^2 - 2x_2^2 - x_1,$$

$$-x_1 + x_2^2 \leq 4,$$

$$2x_1 + x_2 \leq 6.$$

../programi/funkcija\_1.m

```
1 function f = funkcija_1(x)
2 f = 5-x(1)^2-2*x(2)^2-x(1);
```

../programi/nelin\_ogr\_1.m

```
1 function [c, ceq] = nelin_ogr_1(x)
2 c = -x(1) + x(2)^2 - 4;
3 ceq = [];
```

../programi/fmincon\_primer\_1.m

```
1 x0 = [0 0];
2 A = [2 1]; b = 6;
3 [x, fval, exitflag] = fmincon('funkcija_1',x0,A,b,[],[],[],[],'nelin_ogr_1')
```

```
>> fmincon_primer_1
x = 4.4538 -2.9075
fval =
-36.1974
exitflag =
1
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

24 / 49

## Пример 4

$$f(x_1, x_2) = 5 - x_1^2 - 2x_2^2 - x_1,$$
$$3 \leq -x_1 + x_2^2 \leq 4,$$
$$x_1 + x_2 = 5.$$

../programi/nelin\_ogr\_2.m

```
1 function [c, ceq] = nelin_ogr_2(x)
2 c = [
3     3 + x(1) - x(2)^2
4     -x(1) + x(2)^2 - 4
5     ];
6 ceq = [];
```

../programi/fmincon\_primer\_2.m

```
1 x0 = [0 0];
2 Aeq = [1 1]; beq = 5;
3 [x, fval, exitflag] = fmincon('funkcija_1', x0, [], [], Aeq, beq, [], [], 'nelin_ogr_2')
```

```
>> fmincon_primer_2
x =
    2.4586    2.5414
fval =
   -16.4207
exitflag =
     1
```

Navigation icons

## Пример 5

Користејќи ги равенките изведени во примерот 2, со примена на `fmincon` од Matlab да се реши примерот 1.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} P_{G1} \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix},$$

../programi/trosocil.m

```
1 function F = trosocil(X)
2 t1 = fzero(@(t1) 0.8 + 2.0814*X(2)^2 + X(2)*X(3)*(-2.0814*cos(t1) + 6.9381*sin(t1))
3     - X(1), 0);
4 PG2 = 0.3 + 2.0814*X(3)^2 + X(2)*X(3)*(-2.0814*cos(t1) - 6.9381*sin(t1));
5 F = 200 + 2000*X(1) + 1500*PG2 + 1000*X(1)^2 + 1200*PG2^2;
```

Navigation icons

## Пример 5

../programi/ogranicuvanjal.m

```
1 function [c, ceq, t1, PG2, QG1, QG2, SGR1, SGR2] = ogranicuvanjal(X)
2 %Presmetka na fazniot agol na jazelot 1
3 t1 = fzero(@(t1) 0.8 + 2.0814*X(2)^2 + X(2)*X(3)*(-2.0814*cos(t1) + 6.9381*sin(t1))
4     - X(1), 0);
5 %Presmetka na injektiranata aktivna moknost na generatorot vo jazelot 2
6 PG2 = 0.3 + 2.0814*X(3)^2 + X(2)*X(3)*(-2.0814*cos(t1) - 6.9381*sin(t1));
7 %Presmetka na injektiranata reaktivna moknost na generatorot vo jazelot 1
8 QG1 = 0.3 + 6.9313*X(2)^2 + X(2)*X(3)*(-2.0814*sin(t1) - 6.9381*cos(t1));
9 %Presmetka na injektiranata aktivna moknost na generatorot vo jazelot 2
10 QG2 = 0.2 + 6.9313*X(3)^2 + X(2)*X(3)*(2.0814*sin(t1) - 6.9381*cos(t1));
11 %Presmetka na moknostite vo grankite
12 U1 = X(2) * exp(1j*t1); U2 = X(3);
13 I1 = (U1 - U2) / (0.039669 + 1j*0.132231) + U1 * 1j*0.013552/2;
14 I2 = (U1 - U2) / (0.039669 + 1j*0.132231) - U2 * 1j*0.013552/2;
15 SGR1 = U1 * conj(I1);
16 SGR2 = U2 * conj(I2);
17 %Ogranicuvanja od tipot na neravenstva
18 c = [
19     0.3 - PG2 %PG2 >= PG2min
20     PG2 - 1 %PG2 <= PG2max
21     -1 - QG1 %QG1 >= QG1min
22     QG1 - 1 %QG1 <= QG1max
23     -1 - QG2 %QG2 >= QG2min
24     QG2 - 1 %QG2 <= QG2max
25     abs(SGR1) - 0.3 %SGR < SGRmax na pocetok od grankata
26     abs(SGR2) - 0.3 %SGR < SGRmax na krajot od grankata
27     ];
28 ceq = []; %Nema ogranicuvanja od tipot na ravenstva
```

Navigation icons

## Пример 5

```
../programi/acopf_2.m
1 X0 = [0.65; 1; 1];
2 Xmin = [0.3; 0.95; 0.95];
3 Xmax = [1; 1.1; 1.1];
4 [X,F,exitflag] = fmincon('trosocil',X0,[],[],[],[],Xmin,Xmax,'ogranicuvanjal');
5 %Proverka na ogranicianjata i presmetka na sostojbenite i zavisnite promenlivi
6 [c, ceq, t1, PG2, QG1, QG2, SGR1, SGR2] = ogranicianjal(X);
7 fprintf('F = %7.2f evra/h\n',F);
8 fprintf('PG1 = %7.3f MW\n',100 * X(1));
9 fprintf('U1 = %9.6f pu\n',X(2));
10 fprintf('U2 = %9.6f pu\n',X(3));
11 fprintf('PG2 = %7.3f MW\n',100 * PG2);
12 fprintf('QG1 = %7.3f Mvar\n',100 * QG1);
13 fprintf('QG2 = %7.3f Mvar\n',100 * QG2);
14 SGR1 = 100 * SGR1;
15 fprintf('SGR1 = (%10.3f MW, %10.3f Mvar) %10.3f MVA\n',real(SGR1),imag(SGR1),abs(SGR1));
16 SGR2 = 100 * SGR2;
17 fprintf('SGR2 = (%10.3f MW, %10.3f Mvar) %10.3f MVA\n',real(SGR2),imag(SGR2),abs(SGR2));
```

MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017 28 / 49

## Пример 5

```
>> acopf_2
F = 2790.86 evra/h
PG1 = 50.304 MW
U1 = 1.089672 pu
U2 = 1.100000 pu
PG2 = 59.991 MW
QG1 = 30.086 Mvar
QG2 = 19.267 Mvar
SGR1 = ( -29.696 MW, 0.089 Mvar) 29.696 MVA
SGR2 = ( -29.991 MW, 0.730 Mvar) 30.000 MVA
```

MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017 29 / 49

## Пример 6

За системот од примерот 1 да се одреди таков режим на работа при кој вкупните загуби на активна моќност во системот ќе бидат минимални.

$$\Delta P = (P_{G1} + P_{G2}) - (P_{P1} + P_{P2}),$$
$$F = P_{G1} + P_{G2}.$$

```
../programi/PGsumal.m
1 function F = PGsumal(X)
2 t1 = fzero(@(t1) 0.8 + 2.0814*X(2)^2 + X(2)*X(3)*(-2.0814*cos(t1) + 6.9381*sin(t1))
3 - X(1), 0);
4 PG2 = 0.3 + 2.0814*X(3)^2 + X(2)*X(3)*(-2.0814*cos(t1) - 6.9381*sin(t1));
5 F = X(1) + PG2;
```

```
[X,F,exitflag] = fmincon('PGsumal',X0,[],[],[],[],Xmin,Xmax,'ogranicianjal');
```

```
>> acopf_3
F = 110.00 MW
PG1 = 79.981 MW
U1 = 1.010344 pu
U2 = 1.010345 pu
PG2 = 30.019 MW
QG1 = 29.311 Mvar
QG2 = 19.300 Mvar
SGR1 = ( -0.019 MW, -0.686 Mvar) 0.686 MVA
SGR2 = ( -0.019 MW, 0.697 Mvar) 0.698 MVA
```

MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017 30 / 49



## Програма за оптимални текови на моќност

```
../programi/trosoci.m  
1 function F = trosoci(X,ees)  
2 ees = acpfx(X,ees); PG = ees.generatori(:,2);  
3 [a,b,c] = deal(ees.trosoci(:,2),ees.trosoci(:,3),ees.trosoci(:,4));  
4 F = sum(a + b.*PG + c.*PG.^2);
```

```
../programi/ees_ogr.m  
1 function [c, ceq, ees] = ees_ogr(X,ees)  
2 ees = acpfx(X,ees);  
3 [PG, QG] = deal(ees.generatori(:,2),ees.generatori(:,3));  
4 U = ees.jazli(:,10);  
5 Sproc = ees.granki(:,13);  
6 [PGmin,PGmax] = deal(ees.generatori(:,5),ees.generatori(:,6));  
7 [QGmin,QGmax] = deal(ees.generatori(:,7),ees.generatori(:,8));  
8 [Umin, Umax] = deal(ees.jazli(:,8),ees.jazli(:,9));  
9 c = [PGmin - PG  
10      PG - PGmax  
11      QGmin - QG  
12      QG - QGmax  
13      Sproc - 100  
14      Umin - U  
15      U - Umax];  
16 ceq = [];
```

MT (PEEC)

PEEC

Ckonje, 2017

31 / 49

## Програма за оптимални текови на моќност

```
../programi/acopf.m  
1 function ees = acopf(datoteka,snimaj)  
2 %% citanje na vlezните podatoci  
3 if nargin == 1, snimaj = true; end  
4 if isstruct(datoteka)  
5     ees = datoteka;  
6 else  
7     ees = feval(datoteka);  
8 end  
9 %% dolni i gorni granici  
10 [PGmin, PGmax] = deal(ees.generatori(:,5),ees.generatori(:,6));  
11 [Umin, Umax] = deal(ees.jazli(:,8),ees.jazli(:,9));  
12 NG = size(ees.generatori,1);  
13 ref = find(ees.jazli(:,2) == 3);  
14 refg = ees.generatori(:,1) == ref;  
15 i = 1:NG; i(refg) = [];  
16 j = ees.generatori(:,1);  
17 Xmin = [PGmin(i); Umin(j)];  
18 Xmax = [PGmax(i); Umax(j)];  
19 %% pocetno resenie  
20 X = [ees.generatori(i,2)  
21      ees.generatori(:,4)];  
22 %% optimizacija  
23 [X,F,exitflag] = fmincon('trosoci',X,[],[],[],[],Xmin,Xmax,'ees_ogr',[],ees);  
24 ees.F = F;  
25 [c, ceq, ees] = ees_ogr(X,ees);  
26 ees.konverg = exitflag;  
27 %% snimanje na rezultate  
28 if snimaj; snimi_acpf(ees); type('acpf.txt'); end
```

MT (PEEC)

PEEC

Ckonje, 2017

32 / 49

## Пример 1 – асопф

```
>> acopf('ees_acopf_1');  
konverg = 4, iter = 3, vreme = 0.001 sek  
F = 2790.86
```

ZAGUBI

```
DP = 0.295 MW, DQ = -0.642 Mvar
```

NAPONI NA JAZLITE

	MW	Mvar	Mvar(sh)	U(pu)	Teta(o)	U(kV)
1	80.0	30.0	0.0	1.089673	-1.894	119.864
2	30.0	20.0	0.0	1.100000	0.000	121.000

MOKNOSTI NA GENERATORITE

	PG	QG	PGmin	PGmax	QGmin	QGmax
1	50.304	30.090	30.0	100.0	-100.0	100.0
2	59.991	19.269	30.0	100.0	-100.0	100.0

MOKNOSTI VO GRANKITE

	MW	Mvar	MW	Mvar	MVA	MVAdoz	%
2 1	29.991	-0.731	29.696	-0.090	30.000	30.0	100.0 +

MT (PEEC)

PEEC

Ckonje, 2017

33 / 49

## Пример 1 – асопф – минимум загуби

```

../../../../programi/acopf_4.m
1 ees = ees_acopf_1;
2 ees.trosoci(:,2) = 0;
3 ees.trosoci(:,3) = 1;
4 ees.trosoci(:,4) = 0;
5 acopf(ees);

```

konverg = 5, iter = 1, vreme = 0.000 sek  
F = 110.00

### ZAGUBI

DP = 0.000 MW, DQ = -1.501 Mvar

### NAPONI NA JAZLITE

	MW	Mvar	Mvar(sh)	U(pu)	Teta(o)	U(kV)
1	80.0	30.0	0.0	1.052576	-0.001	115.783
2	30.0	20.0	0.0	1.052581	0.000	115.784

### MOKNOSTI NA GENERATORITE

	PG	QG	PGmin	PGmax	QGmin	QGmax
1	79.984	29.250	30.0	100.0	-100.0	100.0
2	30.016	19.249	30.0	100.0	-100.0	100.0

### MOKNOSTI VO GRANKITE

		MW	Mvar	MW	Mvar	MVA	MVA doz	%
2	1	0.016	-0.751	0.016	0.750	0.751	30.0	2.5

MT (PEEC)

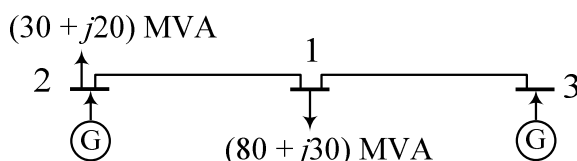
PEEC

Скопје, 2017

34 / 49

## Пример 7

На сликата е прикажан едноставен ЕЕС. Податоците за генераторите се дадени во примерот 1, а за гранките во табелата.  $U_n = U_b = 110 \text{ kV}, S_b = 100 \text{ MVA}$ . Минималните дозволени вредности на напоните на јазлите изнесуваат 0,95 pu, додека максимално дозволените изнесуваат 1,10 pu за генераторските јазли и 1,05 pu за потрошувачкиот јазел. Да одреди оптимален режим на работа на дадениот ЕЕС за случај со минимални вкупни трошоци за работа на генераторите и со минимални загуби на активна моќност во преносната мрежа.



Почеток	Крај	R (pu)	X (pu)	B (pu)	$S_{GR}^{max}$ (MVA)
2	1	0,039669	0,132231	0,013552	50
3	1	0,029752	0,099174	0,010164	50

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

35 / 49

## Пример 7

```

../../../../programi/ees_acopf_2.m
1 function ees = ees_acopf_2()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.jazli = [
4 % jazel tip Ub(kV) Pp(MW) Qp(Mvar) Qsh(Mvar) oblast Umin(pu) Umax(pu)
5 1 1 110 80 30 0 1 0.95 1.1
6 2 2 110 30 20 0 1 0.95 1.1
7 3 3 110 0 0 0 1 0.95 1.1
8 ];
9 ees.granki = [
10 % pocetok kraj R(pu) X(pu) B(pu) m(pu) Smax(MVA) status
11 2 1 0.039669 0.132231 0.013552 1.000 50 1
12 3 1 0.029752 0.099174 0.010164 1.000 50 1
13 ];
14 ees.generatori = [
15 % jazel Pg(MW) Qg(Mvar) Ug(pu) Pmin(MW) Pmax(MW) Qmin(Mvar) Qmax(Mvar) status
16 2 45 0 1.04 30 100 -100 100 1
17 3 0 0 1.03 30 100 -100 100 1
18 ];
19 ees.trosoci = [
20 % jazel a(E/h) b(E/MWh) c(E/MWh^2)
21 2 100 20 0.10
22 3 100 15 0.12
23 ];

```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

36 / 49

## Пример 7 – минимум трошоци

```
>> acopf('ees_acopf_2');
konverg = 1, iter = 3, vreme = 0.000 sek
F = 2850.22
```

```
-----
ZAGUBI
-----
DP = 1.200 MW, DQ = 1.266 Mvar
-----
NAPONI NA JAZLITE
-----
      MW  Mvar  Mvar(sh)  U(pu)  Teta(o)  U(kV)
1  80.0  30.0    0.0  1.057201  -2.390  116.292
2  30.0  20.0    0.0  1.100000  -0.854  121.000
3  0.0   0.0    0.0  1.075747  0.000  118.332
-----
MOKNOSTI NA GENERATORITE
-----
      PG      QG      PGmin  PGmax  QGmin  QGmax
2  61.517  45.645    30.0  100.0  -100.0  100.0
3  49.683   5.621    30.0  100.0  -100.0  100.0
-----
MOKNOSTI VO GRANKITE
-----
      MW      Mvar      MW      Mvar      MVA  MVAdoz  %
2  1  31.517  25.645  30.962  25.371  40.632  50.0  81.3
3  1  49.683   5.621  49.038  4.629  50.000  50.0  100.0 +
```

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

37 / 49

## Пример 7 – минимум загуби

```
../programi/acopf_5.m
```

```
1 ees = ees_acopf_2;
2 ees.trosoci(:,2) = 0;
3 ees.trosoci(:,3) = 1;
4 ees.trosoci(:,4) = 0;
5 acopf(ees);
```

```
konverg = 1, iter = 4, vreme = 0.001 sek
F = 111.07
```

```
-----
ZAGUBI
-----
DP = 1.069 MW, DQ = 0.768 Mvar
-----
NAPONI NA JAZLITE
-----
      MW  Mvar  Mvar(sh)  U(pu)  Teta(o)  U(kV)
1  80.0  30.0    0.0  1.071512  -1.968  117.866
2  30.0  20.0    0.0  1.100000    0.000  121.000
3  0.0   0.0    0.0  1.100000    0.000  121.000
-----
MOKNOSTI NA GENERATORITE
-----
      PG      QG      PGmin  PGmax  QGmin  QGmax
2  64.744  32.981    30.0  100.0  -100.0  100.0
3  46.325  17.786    30.0  100.0  -100.0  100.0
-----
MOKNOSTI VO GRANKITE
-----
      MW      Mvar      MW      Mvar      MVA  MVAdoz  %
2  1  34.744  12.981  34.286  13.052  37.090  50.0  74.2
3  1  46.325  17.786  45.714  16.948  49.622  50.0  99.2
```

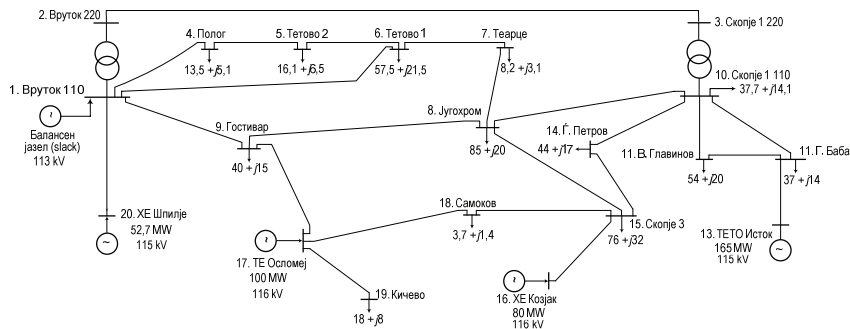
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

38 / 49

## Задачи за вежби (стр. 185–187)



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

39 / 49

## Оптимизација преку YALMIP

- YALMIP е софтверски пакет за Matlab кој овозможува пишување на оптимизациони проблеми со помош на симболички (моделирачки) јазик
- Проблемот го пишуваме со математички изрази на начин како што тоа би го направиле со пишување со пенкало на хартија
- YALMIP го препознава типот на проблемот во смисла на карактерот на функцијата на цел и ограничувањата и моделот на проблемот го претвора во форма потребна за одредена оптимизациона алатка
- Ги формира сите потребни променливи во форма на вектори и матрици со одредени димензии, дефинира нелинеарни функции на цел и функции со ограничувања и ја повикува соодветната оптимизациона алатка
- Добиеното решени повторно го враќа во симболичките променливи кои сме ги дефинирале на почетокот

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 40 / 49

### Пример 3 – YALMIP

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2) &= 5 - x_1^2 - 2x_2^2 - x_1, \\ -x_1 + x_2^2 &\leq 4, \\ 2x_1 + x_2 &\leq 6. \end{aligned}$$

../programi/yalmip\_prosto/yalmip\_1.m

```
1 x = sdpvar(2,1);
2 funkcija = 5 - x(1)^2 - 2*x(2)^2 - x(1);
3 ogranicuvanja = [
4   -x(1) + x(2)^2 <= 4
5   2*x(1) + x(2) <= 6
6   ];
7 opis = optimize(ogranicuvanja, funkcija)
8 x = value(x)
9 f = value(funkcija)
```

```
>> yalmip_1
opis =
  yalmiptime: 0.3941
  solvertime: 0.1505
  info: 'Successfully solved (FMINCON)'
  problem: 0
x =
  4.4538
 -2.9075
f =
 -36.1974
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 41 / 49

### Пример 4 – YALMIP

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2) &= 5 - x_1^2 - 2x_2^2 - x_1, \\ 3 &\leq -x_1 + x_2^2 \leq 4, \\ x_1 + x_2 &= 5. \end{aligned}$$

../programi/yalmip\_prosto/yalmip\_2.m

```
1 x = sdpvar(2,1);
2 funkcija = 5 - x(1)^2 - 2*x(2)^2 - x(1);
3 ogranicuvanja = [
4   3 <= -x(1) + x(2)^2 <= 4
5   x(1) + x(2) == 5
6   ];
7 opis = optimize(ogranicuvanja, funkcija)
8 x = value(x)
9 f = value(funkcija)
```

```
>> yalmip_2
opis =
  yalmiptime: 0.4981
  solvertime: 0.1339
  info: 'Successfully solved (FMINCON)'
  problem: 0
x =
  2.4586
  2.5414
f =
 -16.4207
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 42 / 49

## Економски диспечинг – YALMIP

```
./programi/yalmip_prosto/yalmip_3.m
1 P = 270;
2 G = [
3     1 40 100 10 2.0 0.010
4     2 40 80 10 1.5 0.012
5     3 50 120 20 1.5 0.004
6 ];
7 [PGmin,PGmax,a,b,c] = deal(G(:,2),G(:,3),G(:,4),G(:,5),G(:,6));
8
9 PG = sdpvar(3,1);
10 funkcija = sum(a' + b.*PG + c.*PG.^2);
11 ogranicuvanja = [
12     PGmin <= PG <= PGmax
13     sum(PG) == P
14 ];
15 opis = optimize(ogranicuvanja, funkcija)
16 PG = value(PG)
17 f = value(funkcija)

>> yalmip_3
opis =
    yalmiptime: 0.6849
    solvertime: 0.4456
    info: 'Successfully solved (CPLEX-IBM)'
    problem: 0
PG =
    70.4546
    79.5454
    120.0000
f =
    663.3955
```

## Пример 7 – YALMIP (1)

```
./programi/yalmip_prosto/yalmip_4.m
1 % podatoci za jazlite
2 n = 3;
3 Y = [
4     4.8566 - 16.1770i -2.0814 + 6.9381i -2.7752 + 9.2507i
5     -2.0814 + 6.9381i 2.0814 - 6.9313i 0.0000 + 0.0000i
6     -2.7752 + 9.2507i 0.0000 + 0.0000i 2.7752 - 9.2457i];
7 SP = [0.8 + 0.3i; 0.3 + 0.2i; 0];
8 Umin = 0.95*ones(3,1); Umax = 1.1*ones(3,1);
9
10 % podatoci za grankite
11 f = [2; 3]; t = [1; 1]; SGRmax = [0.5; 0.5];
12 Y1 = [2.0814 - 6.9381i; 2.7752 - 9.2507i];
13 Y2 = [0.0068i; 0.0051i];
14 Y3 = Y2;
15 % podatoci za generatorite
16 ng = 2; igen = [2; 3];
17 PGmin = [0.3; 0.3]; PGmax = [1; 1];
18 QGmin = [-1; -1]; QGmax = [1; 1];
19 a = [100; 100]; b = [20; 15]; c = [0.1; 0.12];
20 % promenlivi vo optimizacijata
21 PG = sdpvar(ng,1); QG = sdpvar(ng,1);
22 Um = sdpvar(n,1); Ua = sdpvar(n,1);
23 % izvedeni promenlivi
24 U = Um.*exp(1j*Ua); % kompleksen napon
25 S = U.*conj(Y*U); % injektirani moknost vo jazlite
```

## Пример 7 – YALMIP (2)

```
26 E = eye(n);
27 SG = E(:,igen) * (PG + 1j*QG); % moknosti na generatorite
28 % presmetka na moknosti na dvata kraja od grankite
29 If = Y1 .* (U(f) - U(t)) + Y2 .* U(f);
30 It = Y1 .* (U(f) - U(t)) - Y3 .* U(t);
31 Sf = U(f) .* conj(If);
32 St = U(t) .* conj(It);
33 % ogranicuvanja
34 ogranicuvanja = [
35     PGmin <= PG <= PGmax
36     QGmin <= QG <= QGmax
37     Umin <= Um <= Umax
38     -2*pi <= Ua <= 2*pi
39     S == SG - SP
40     abs(Sf) <= SGRmax
41     abs(St) <= SGRmax
42 ];
43 % funkcija na cel
44 funkcija = sum(a + b.*(100*PG) + c.*(100*PG).^2);
45 % optimizacija
46 opis = optimize(ogranicuvanja,funkcija)
47 PG = 100*value(PG)
48 QG = 100*value(QG)
49 Um = value(Um)
50 Ua = value(Ua)/pi*180
51 Sgr = 100*[value(Sf) value(St)]
52 f = value(funkcija)
```

## Пример 7 – YALMIP (3)

```
>> yalmip_4
opis =
  yalmiptime: 0.5497
  solvertime: 0.4845
  info: 'Successfully solved (FMINCON)'
  problem: 0
PG =
  61.5169
  49.6830
QG =
  45.6462
  5.6332
Um =
  1.0572
  1.1000
  1.0757
Ua =
  -1.3087
  0.2275
  1.0812
Sgr =
  31.5169 +25.6462i  30.9616 +25.3778i
  49.6830 + 5.6216i  49.0384 + 4.6333i
f =
  2.8502e+03
```

MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017

46 / 49

## Програма acopf\_yalmip (1)

```
../programi/acopf_yalmip.m
1 function ees = acopf_yalmip(datoteka,snimaj)
2 %% citanje na vleznite podatoci
3 addpath('..')
4 if nargin == 1, snimaj = true; end
5 if isstruct(datoteka)
6     ees = datoteka;
7 else
8     ees = feval(datoteka);
9 end
10 n = size(ees.jazli,1); % broj na jazli
11 ng = size(ees.generatori,1); % broj na generatori
12 %% matrica Y i zadadeni moknosti vo jazlite
13 [Y, f, t, Y1, Y2, Y3] = matrica_y(ees.Sb, ees.jazli, ees.granki);
14 SP = (ees.jazli(:,4) + 1j * ees.jazli(:,5))/ees.Sb;
15 igen = ees.generatori(:,1);
16 %% dolni i gorni granici
17 G = ees.generatori/ees.Sb;
18 [PGmin, PGmax, QGmin, QGmax] = deal(G(:,5),G(:,6),G(:,7),G(:,8));
19 [Umin, Umax] = deal(ees.jazli(:,8),ees.jazli(:,9));
20 SGRmax = ees.granki(:,7)/ees.Sb;
21 %% optimizacija
22 % promenlivi vo optimizacijata
23 PG = sdpvar(ng,1);
24 QG = sdpvar(ng,1);
25 Um = sdpvar(n,1);
```

MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017

47 / 49

## Програма acopf\_yalmip (2)

```
26 Ua = sdpvar(n,1);
27 % izvedeni promenlivi
28 U = Um.*exp(1j*Ua); % kompleksen napon
29 S = U.*conj(Y*U); % injektirani moknost vo jazlite
30 E = eye(n);
31 SG = E(:,igen) * (PG + 1j*QG); % moknosti na generatorite
32 % presmetka na moknosti na dvata kraja od grankite
33 If = Y1 .* (U(f) - U(t)) + Y2 .* U(f);
34 It = Y1 .* (U(f) - U(t)) - Y3 .* U(t);
35 Sf = U(f) .* conj(If);
36 St = U(t) .* conj(It);
37 % ogranicuvanja
38 C = [
39     PGmin <= PG <= PGmax
40     QGmin <= QG <= QGmax
41     Umin <= Um <= Umax
42     -2*pi <= Ua <= 2*pi
43     S == SG - SP
44     abs(Sf) <= SGRmax
45     abs(St) <= SGRmax
46 ];
47 % funkcija na cel
48 [a,b,c] = deal(ees.trosoci(:,2),ees.trosoci(:,3),ees.trosoci(:,4));
49 b = b*ees.Sb;
50 c = c*ees.Sb^2;
51 F = sum(a + b.*PG + c.*PG.^2);
52 % optimizacija
53 opis = optimize(C,F)
```

MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017

48 / 49

## Програма acopf\_yalmip (3)

```
54 %% detalna premetka na optimalnoto resenie
55 ees.F = value(F);
56 ees.generatori(:,2) = value(PG)*ees.Sb;
57 ees.generatori(:,4) = value(Um(igen));
58 ees = acopf(ees,1e-8,20,false);
59 %% snimanje na rezultate
60 if snimaj; snimi_acopf(ees); type('acpf.txt'); end
```

```
ees = acopf_yalmip('ees_acopf_2')
```

# Режими на работа на ЕЕС

## Оптимално ангажирање на агрегати

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи  
Факултет за електротехника и информациски технологии  
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk  
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2017

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 1 / 41

### Дефиниција на проблемот

- При решавањето на проблемот на оптимално ангажирање на агрегати најнапред треба да се одреди кои агрегати (генератори) треба да бидат вклучени, а потоа за нив да се одредат оптималните вредности на моќностите.
- Покрај реалните променливи (активни моќности на генераторите) тука имаме и бинарни променливи со кои се дефинира дали одреден генератор е во погон или не.
- За мали системи решението можеме да го добиеме така што ќе ги испробаме сите можни бинарни комбинации ( $2^{N_G}$ ). За  $N_G = 3$  бројот на комбинации е  $2^3 = 8$  и тие се 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 и 111.
- За 100 генератори вкупниот број на комбинации е  $2^{100} \approx 1,3 \cdot 10^{30}$ . Кога би располагале со брз компјутер кој може да реши  $10^9$  комбинации во секунда проблемот би го решиле за  $4 \cdot 10^{13}$  години.
- При ангажирање на агрегатите за период од 24 часа бројот на комбинации е  $(2^{N_G})^{24}$ . Проблем со само 5 генератори има  $(2^5)^{24} \approx 1,3 \cdot 10^{36}$  комбинации. Брзиот компјутер би го решил за  $4,2 \cdot 10^{19}$  години.

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 2 / 41

### Економски диспечинг

$$\lambda = \frac{2P_P + \sum_{i=1}^{N_G} \frac{b_i}{c_i}}{\sum_{i=1}^{N_G} \frac{1}{c_i}},$$

$$P_{G_i} = \frac{\lambda - b_i}{2c_i}.$$

Ако е  $P_{G_i} < P_{G_i}^{\min}$  или  $P_{G_i} > P_{G_i}^{\max}$

$$P_{G_i(\text{нова})} = \begin{cases} P_{G_i}^{\min} & \text{ако е } P_{G_i(\text{стара})} < P_{G_i}^{\min}, \\ P_{G_i}^{\max} & \text{ако е } P_{G_i(\text{стара})} > P_{G_i}^{\max}, \end{cases}$$

$$P_{P(\text{нова})} = P_{P(\text{стара})} - P_{G_i(\text{нова})},$$

генераторот  $i$  го исклучуваме од пресметките и повторно ги применуваме релациите за  $\lambda$  и  $P_{G_i}$  за останатите  $N_G - 1$  генератор користејќи ја новата вредност на моќноста на потрошувачите.

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 3 / 41



## Пример 1

Да се определи оптималното ангажирање на 4 агрегати во еден ЕЕС во кој вкупна моќност на потрошувачите изнесува  $P_P = 310 \text{ MW}$ .

Карактеристиките на агрегатите се дадени во следната табела.

Бр.	$P_G^{\min}$ (MW)	$P_G^{\max}$ (MW)	(€/h)	$b$ (€/MWh)	$c$ (€/MW <sup>2</sup> h)
1	22	32	200	-10,20	0,427
2	75	100	180	-3,14	0,075
3	90	130	500	-7,28	0,071
4	150	200	1000	-9,83	0,055
Вкупно	337	462			

## Пример 1

Со 4 расположливи агрегати можеме да направиме  $2^4 = 16$  комбинации на вклученост/исклученост на агрегатите.

$$A_i = \begin{cases} 1, & \text{ако агрегатот } i \text{ е во погон,} \\ 0, & \text{ако агрегатот } i \text{ не е во погон.} \end{cases}$$

за погонот на избраните агрегати воопшто да биде можен е потребно да важи следното ограничување

$$\sum_{i=1}^4 A_i \cdot P_{Gi}^{\min} \leq P_P \leq \sum_{i=1}^4 A_i \cdot P_{Gi}^{\max},$$

## Пример 1

Бр.	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$\sum_{i=1}^4 A_i \cdot P_{Gi}^{\min}$	$\sum_{i=1}^4 A_i \cdot P_{Gi}^{\max}$	Исполнет услов
1	0	0	0	0	0	0	НЕ
2	1	0	0	0	22	32	НЕ
3	0	1	0	0	75	100	НЕ
4	0	0	1	0	90	130	НЕ
5	0	0	0	1	150	200	НЕ
6	1	1	0	0	97	132	НЕ
7	1	0	1	0	112	162	НЕ
8	1	0	0	1	172	232	НЕ
9	0	1	1	0	165	230	НЕ
10	0	1	0	1	225	300	НЕ
11	0	0	1	1	240	330	ДА
12	1	1	1	0	187	262	НЕ
13	1	0	1	1	262	362	ДА
14	0	1	1	1	315	430	НЕ
15	1	1	0	1	247	332	ДА
16	1	1	1	1	317	462	НЕ

## Пример 1 – комбинација 11

Во погон се генераторите 3 и 4 и затоа во сумите во изразот за  $\lambda$  има два члена во кои се коефициентите  $b_3$ ,  $c_3$ ,  $b_4$  и  $c_4$ .

$$\lambda^{(11)} = \frac{2 \cdot 310 + \frac{-7,28}{0,071} + \frac{-9,83}{0,055}}{\frac{1}{0,071} + \frac{1}{0,055}} = 10,498 \text{ €/MWh},$$

$$P_{G3}^{(11)} = \frac{10,498 + 7,28}{2 \cdot 0,071} = 125,198 \text{ MW},$$

$$P_{G4}^{(11)} = \frac{10,498 + 9,83}{2 \cdot 0,055} = 184,802 \text{ MW},$$

$$f_3^{(11)} = 500 - 7,28 \cdot 125,198 + 0,071 \cdot 125,198^2 = 701,451 \text{ €/h},$$

$$f_4^{(11)} = 1000 - 9,83 \cdot 184,802 + 0,055 \cdot 184,802^2 = 1061,744 \text{ €/h},$$

$$f^{(11)} = f_3^{(11)} + f_4^{(11)} = 701,451 + 1061,744 = 1763,20 \text{ €/h}.$$

## Пример 1 – решение

Комбинација	11	13	15
Агрегати во погон	3 и 4	1, 3 и 4	1, 2 и 4
$\sum_{i=1}^4 A_i \cdot P_{Gi}^{\min}$ (MW)	240	262	247
$\sum_{i=1}^4 A_i \cdot P_{Gi}^{\max}$ (MW)	330	362	332
Трошоци (€/h)	<b>1763,2</b>	<b>1729,4</b>	<b>1888,2</b>
Моќности (MW)	$P_3 = 125,7$ $P_4 = 184,3$	$P_1 = 22,6$ $P_3 = 115,3$ $P_4 = 172,1$	$P_1 = 24,9$ $P_2 = 94,9$ $P_4 = 190,2$

## Пример 2

Да се реши примерот 1 со помош на Matlab.

```

        ../programi/uc/uc_broenje.m
1 function [PG, A, F] = uc_broenje(datoteka)
2 if isstruct(datoteka)
3     ees = datoteka;
4 else
5     ees = feval(datoteka);
6 end
7 G = ees.generatori; NG = size(G,1);
8 [PGmin,PGmax,a,b,c] = deal(G(:,2),G(:,3),G(:,4),G(:,5),G(:,6));
9 PP = ees.PP;
10 Fmin = le9;
11 A = zeros(1,NG);
12 for i=1:2^NG
13     binaren = dec2bin(i,NG);
14     for j=1:NG
15         A(j) = str2num(binaren(j));
16     end
17     F = ek_disp_01(A,NG,PGmin,PGmax,a,b,c,PP);
18     if F < Fmin
19         Fmin = F;
20         imin = i;
21     end
22 end
23 binaren = dec2bin(imin,NG);
24 for j=1:NG
25     A(j) = str2num(binaren(j));
26 end
27 [F, PG] = ek_disp_01(A,NG,PGmin,PGmax,a,b,c,PP);
    
```

## Пример 2

```
../programi/uc/ek_disp_01.m
1 function [F,PG] = ek_disp_01(A,NG,PGmin,PGmax,a,b,c,PP)
2 V = find(A); NG1 = sum(A);
3 if sum(PGmin(V)) <= PP && sum(PGmax(V)) >= PP
4     [PG1,F,ef] = cplexqp(2*diag(c(V)),b(V),[],[],ones(1,NG1),PP,PGmin(V),PGmax(V));
5     F = F + sum(a(V));
6     if ef <= 0
7         F = 1e9; PG = [];
8     else
9         PG = zeros(NG,1); PG(V) = PG1;
10    end
11 else
12     F = 1e9; PG = [];
13 end
```

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 10 / 41

## Пример 2

```
../programi/uc/ees_uc_1.m
1 function ees = ees_uc_1()
2 ees.PP = 310;
3 ees.generatori = [
4 % broj Pmin(MW) Pmax(MW) a(E/h) b(E/MWh) c(E/MWh^2)
5 1 22 32 200 -10.20 0.427
6 2 75 100 180 -3.14 0.075
7 3 90 130 500 -7.28 0.071
8 4 150 200 1000 -9.83 0.055
9 ];
```

```
>> [PG, A, F] = uc_broenje('ees_uc_1')
PG =
22.5967
0
115.3348
172.0686
A =
1 0 1 1
F =
1.7293e+003
```

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 11 / 41

## Пример 3

Да се определи оптималното ангажирање на 4 агрегати ако вкупна моќност на потрошувачите во текот на денот се менува според дијаграмот даден на сликата. Да се одреди колкава енергија ќе произведе секој од агрегатите во текот на денот, вкупните трошоци за нивната работа како и просечната цена на електричната енергија во текот на денот. Податоците за карактеристиките на агрегатите се дадени во табелата.

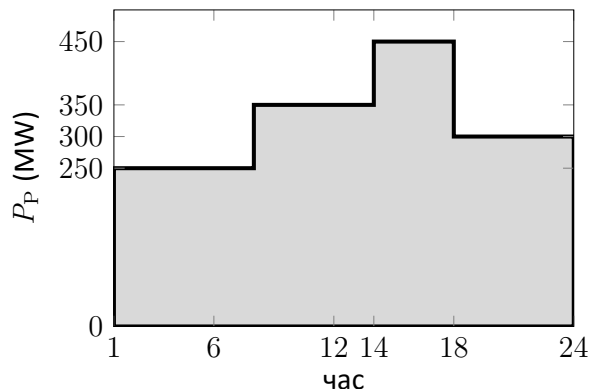
Бр.	$P_G^{\min}$ (MW)	$P_G^{\max}$ (MW)	$a$ (€/h)	$b$ (€/MWh)	$c$ (€/MW <sup>2</sup> h)
1	50	150	200	40	0,200
2	50	150	200	30	0,240
3	50	150	400	36	0,080
4	50	150	200	20	0,120
Вкупно	200	600			

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 12 / 41

### Пример 3



### Пример 3

```

../programi/uc/uc_3.m
1 ees = ees_uc_2;
2 PP = [250 350 450 300]; T = [8 6 4 6];
3 PG = zeros(4,4); F = zeros(4,1);
4 for i = 1:4
5     ees.PP = PP(i);
6     [PG(:,i), A, F(i)] = uc_broenje(ees);
7 end
8 Fvk = T * F;
9 W = sum(PG .* [T; T; T; T], 2);
10 Wvk = sum(W);
11 cena = Fvk/Wvk;
    
```

$P_P$ (MW)	Часови	$P_{Gi}$ (MW)				$f$ (€/h)
		1	2	3	4	
250	8	0,000	50,000	80,000	120,000	10.420,00
350	6	50,000	50,000	110,000	140,000	15.680,00
450	4	70,455	79,545	150,000	150,000	21.615,91
300	6	0,000	50,000	110,000	140,000	12.980,00

$$W_1 = 8 \cdot 0 + 6 \cdot 50 + 4 \cdot 70,455 + 6 \cdot 0 = 581,818 \text{ MWh.}$$

$$W_2 = 1318,182 \text{ MWh,}$$

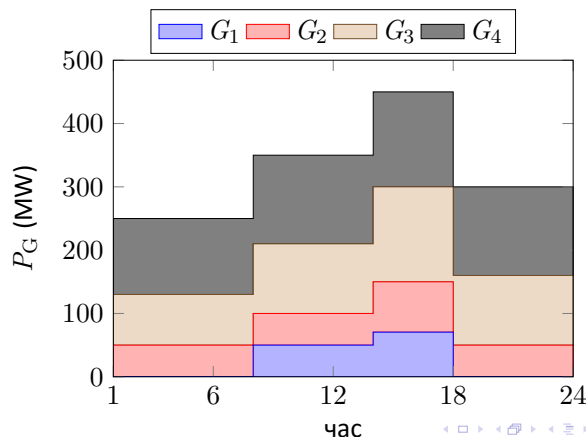
$$W_3 = 2560 \text{ MWh,}$$

$$W_4 = 3240 \text{ MWh,}$$

### Пример 3

$$F = 8 \cdot 10.420,00 + 6 \cdot 15.680,00 + 4 \cdot 21.615,91 + 6 \cdot 12.980,00 = 341.783,64 \text{ €},$$

$$C = \frac{341.783,64}{7.700} = 44,39 \text{ €/MWh.}$$



## Пример 4

Да се реши примерот 3 за случај кога оптоварувањето на потрошувачите е дадено за секој час како што тоа е прикажано во табелата.

Час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MW	258	243	232	220	215	232	286	331	367	331	350	347
Час	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
MW	347	347	359	400	450	450	383	365	351	320	281	235

```

../programi/uc/uc_4.m
1 ees = ees_uc_2;
2 PP = [258 243 232 220 215 232 286 331 367 331 350 347 ...
3       347 347 359 400 450 450 383 365 351 320 281 235];
4 T = ones(1,24);
5 PG = zeros(4,24); F = zeros(24,1);
6 for i = 1:24
7     ees.PP = PP(i);
8     [PG(:,i), A, F(i)] = uc_broenje(ees);
9 end
10 Fvk = T * F;
11 W = sum(PG .* [T; T; T; T], 2);
12 Wvk = sum(W);
13 cena = Fvk/Wvk;
    
```

MT (ПЕЕС)

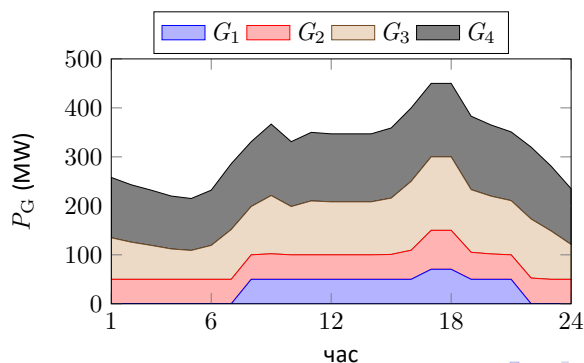
ПЕЕС

Скопје, 2017

16 / 41

## Пример 4

$$\begin{aligned}
 W_1 &= 740,909 \text{ MWh}, & W_2 &= 1280,980 \text{ MWh}, \\
 W_3 &= 2474,267 \text{ MWh}, & W_4 &= 3203,844 \text{ MWh}, \\
 F &= 341.556,98 \text{ €} \\
 C &= 44,36 \text{ €/MWh}
 \end{aligned}$$



MT (ПЕЕС)

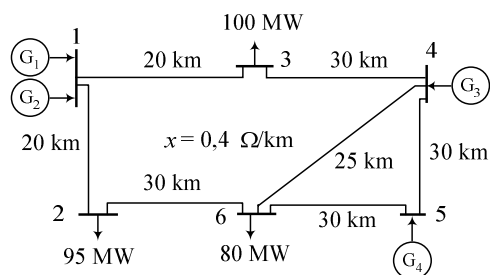
ПЕЕС

Скопје, 2017

17 / 41

## Пример 5

Да се определи оптималното ангажирање на 4 генератори кои имаат карактеристики како во примерот 3 во ЕЕС чија што преносна мрежа е прикажана на сликата. Должините на сите гранки од мрежата се дадени на сликата, нивната надолжна реактанција изнесува  $0,4 \Omega/\text{km}$ , а максимално дозволената активна моќност која што тие можат да ја пренесат изнесува  $65 \text{ MW}$ . Потоа, добиеното решение да се спореди со решението за случајот кога би се занемарила преносната мрежа.



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

18 / 41

## Пример 5 – ограничувања за мрежата

$$|P_{GRi}| \leq P_{GRi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, M,$$

$$\begin{bmatrix} H \\ -H \end{bmatrix} \cdot P_G = \begin{bmatrix} P_{GR}^{\max} \\ P_{GR}^{\max} \end{bmatrix},$$

во uc\_broenje\_h се користи

```
[PG1,F,ef] = cplexqp(2*diag(c(V)),b(V),[H1; -H1],[PGRmax; PGRmax],ones(1,NG1),PP,PGmin(V),PGmax(V));
```

наместо командата која се користеше во uc\_broenje

```
[PG1,F,ef] = cplexqp(2*diag(c(V)),b(V),[],[],ones(1,NG1),PP,PGmin(V),PGmax(V));
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

19 / 41

## Пример 5 – податоци (1)

../programi/uc/ees\_uc\_3.m

```
1 function ees = ees_uc_3()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.jazli = [
4 % jazel tip Pp(MW) oblast
5     1 1 0 1
6     2 1 95 1
7     3 1 100 1
8     4 1 0 1
9     5 3 0 1
10    6 1 80 1
11 ];
12 ees.granki = [
13 % pocetok kraj X(pu) Pmax(MW) status
14     1 3 8/121 65 1
15     1 2 8/121 65 1
16     2 6 12/121 65 1
17     3 4 12/121 65 1
18     4 5 12/121 65 1
19     4 6 10/121 65 1
20     5 6 12/121 65 1
21 ];
22 ees.generatori = [
23 % jazel Pg(MW) Pmin(MW) Pmax(MW) status
24     1 50 50 150 1
25     1 50 50 150 1
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

20 / 41

## Пример 5 – податоци (2)

```
26     4 86 50 150 1
27     5 89 50 150 1
28 ];
29 ees.trosoci = [
30 % jazel a(E/h) b(E/MWh) c(E/MWh^2)
31     1 200 40 0.20
32     1 200 30 0.24
33     4 400 36 0.08
34     5 200 20 0.12
35 ];
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

21 / 41

## Пример 5 – решение

```
[PG, A, F, PGR] = uc_broenje_h('ees_uc_3')
```

$$P_G = \begin{bmatrix} 50 \\ 50 \\ 86 \\ 89 \end{bmatrix} \text{ MW}, \quad P_{GR} = \begin{bmatrix} 39,2 \\ 60,8 \\ -34,2 \\ -60,8 \\ -24,0 \\ 49,2 \\ 65,0 \end{bmatrix} \text{ MW},$$

вкупните трошоци изнесуваат 12.018,20 €/h

Navigation icons

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

22 / 41

## Пример 5 – без преносна мрежа

```
../programi/uc/uc_5.m
```

```
1 ees = ees_uc_3;
2 ees.granki(:,4) = 1000;
3 [PG, A, F, PGR] = uc_broenje_h(ees)
```

$$P_G = \begin{bmatrix} 0 \\ 50 \\ 95 \\ 130 \end{bmatrix} \text{ MW}, \quad P_{GR} = \begin{bmatrix} 13,525 \\ 36,475 \\ -58,525 \\ -86,475 \\ -43,375 \\ 51,900 \\ 86,625 \end{bmatrix} \text{ MW},$$

вкупните трошоци изнесуваат 11.670,00 €/h

Navigation icons

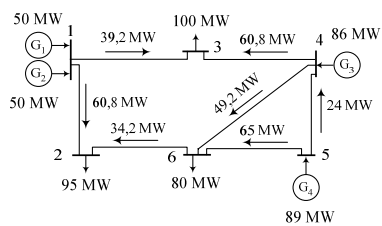
MT (PEEC)

PEEC

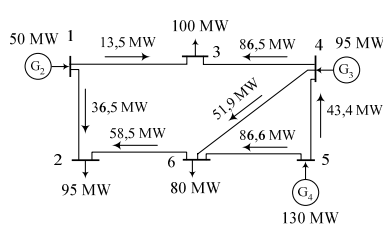
Скопје, 2017

23 / 41

## Пример 5



со уважена преносна мрежа



без уважена преносна мрежа

Navigation icons

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

24 / 41

## Пример 6

Да се определи оптималното ангажирање на генераторите од примерот 5 ако моќноста на сите потрошувачите во текот на денот се менува на ист начин при што релативното оптоварување на секој потрошувач во однос на максималното е дадено во табелата. Да се одреди колкава енергија ќе произведе секој од агрегатите во текот на денот, вкупните трошоци за нивната работа како и просечната цена на електричната енергија во текот на денот. Да се нацрта дријаграм на кој ќе се прикаже промената на тековите на моќности во гранките.

Час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
pu	0,67	0,63	0,60	0,59	0,59	0,60	0,74	0,86	0,95	0,96	0,96	0,95
Час	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
pu	0,95	0,95	0,93	0,94	0,99	1,00	1,00	0,96	0,91	0,83	0,73	0,63

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

25 / 41

## Пример 6

```

../programi/uc/uc_6.m
1 ees = ees_uc_3;
2 k = [0.67 0.63 0.60 0.59 0.59 0.60 0.74 0.86 0.95 0.96 0.96 0.95 ...
3     0.95 0.95 0.93 0.94 0.99 1.00 1.00 0.96 0.91 0.83 0.73 0.63];
4 T = ones(1,24);
5 PP = ees.jazli(:,3);
6 PG = zeros(4,24); PGR = zeros(7,24); F = zeros(24,1);
7 for i = 1:24
8     ees.jazli(:,3) = k(i) * PP;
9     [PG(:,i), A, F(i), PGR(:,i)] = uc_broenje_h(ees);
10 end
11 Fvk = T * F;
12 W = sum(PG .* [T; T; T; T], 2);
13 Wvk = sum(W);
14 cena = Fvk/Wvk;

```

$$W_1 = 600 \text{ MWh},$$

$$W_2 = 1250,87 \text{ MWh},$$

$$W_3 = 1251,79 \text{ MWh},$$

$$W_4 = 2375,34 \text{ MWh},$$

вкупните трошоци изнесуваат  $F = 230.758,52 \text{ €}$

просечната цена изнесува  $C = 42,12 \text{ €/MWh}$

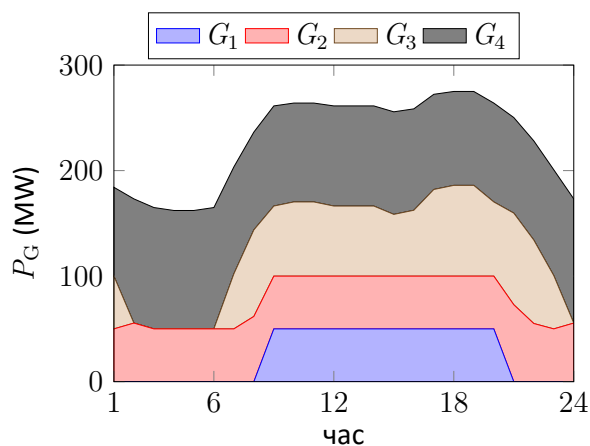
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

26 / 41

## Пример 6



MT (ПЕЕС)

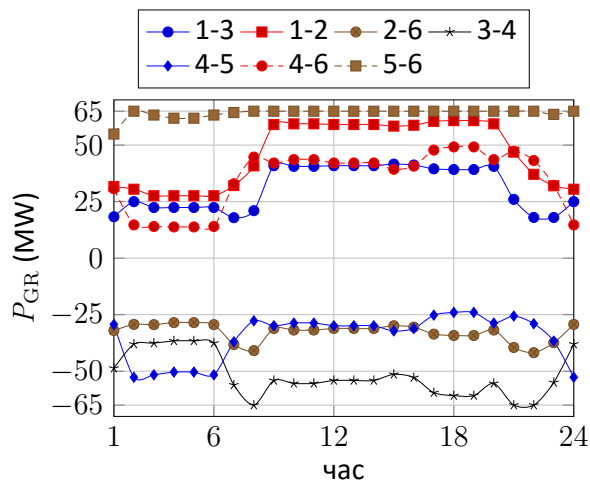
ПЕЕС

Скопје, 2017

27 / 41



## Приме 6

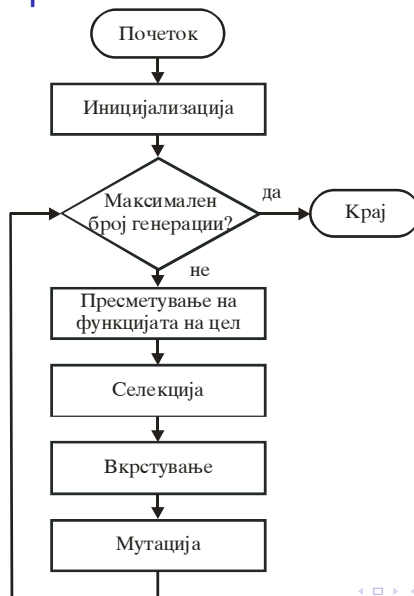


MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 28 / 41

## Генетски алгоритми



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 29 / 41

## Иницијализација

- Генерално: секоја променлива добива случајно избрана вредност од однапред дефиниран интервал, што овозможува оптимизацијата да започне без да се има знаење за можното решение.
- Во овој случај: случајно бираме 0 или 1 за елементите на векторот  $A$  се додека не се задоволи условот

$$\sum_{i=1}^4 A_i \cdot P_{Gi}^{\min} \leq P_P \leq \sum_{i=1}^4 A_i \cdot P_{Gi}^{\max},$$

../programi/uc/pocetok.m

```

1 function geni = pocetok(N,PGmin,PGmax,PP)
2 NG = length(PGmin);
3 geni = zeros(N,NG);
4 for i = 1:N
5     prifatljivo = false;
6     while ~prifatljivo
7         g = round(rand(1,NG));
8         if sum(g'.*PGmin) <= PP && sum(g'.*PGmax) >= PP
9             prifatljivo = true;
10        end
11    end
12    geni(i,:) = g;
13 end
  
```

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 30 / 41

## Пресметка на фитнес функцијата

- Терминот фитнес функција кај генетските алгоритми се однесува на функцијата на цел. Кога се разгледуваат функции со ограничувања на функцијата на цел треба да се додаде одредена вредност со која се со помош на методот на пенализација се вклучени и сите пречекорени ограничувања.

$$F = \frac{1}{\sum_{k=1}^{N_C} f_k + \sum_{i \in C} r_i \cdot \Phi [h_i(\mathbf{x}, \mathbf{u})]}$$

- Во фитнес функцијата се користи реципрочна вредност на функцијата на цел затоа што генетските алгоритми по својот начин на функционирање се сремат кон максимизација на фитнес функцијата, а во разгледуваниот случај нашиот интерес е минимизација.

Navigation icons: back, forward, search, etc.

## Селекција

- Користен е „методот на рулет“ во кој функцијата на цел за секој хромозом се изразува во проценти од сумата на функциите на цел на сите хромозоми во популацијата.
- Со помош на релативната фитнес функција

$$G_i = (F_i - F^{\min}) / (F^{\max} - F^{\min})$$

се пресметува уделот на секој од хромозомите во вкупната сума на релативните фитнес функции за сите хромозоми

$$p_i = G_i / \sum_{i=1}^N G_i$$

$$q_i = \begin{cases} p_i & i = 1, \\ q_{i-1} + p_i & i \geq 2, \end{cases}$$

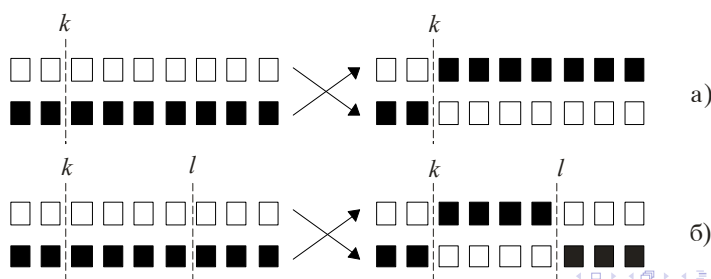
- Селекцијата на хромозомите се врши преку генерирање на  $N$  рамномерно распределени случајни броеви  $r$  од интервалот  $[0, 1)$ , при што во сите  $N$  случаи се селектира првиот хромозом ако е исполнето  $r < q_1$  или пак се селектира хромозомот  $k$  ако е исполнето  $q_k \leq r < q_{k+1}$ .

Navigation icons: back, forward, search, etc.

## Вкрстување

Задаваме  $N_c = 0$ , а потоа за  $i = 1, 2, \dots, N$  ги повторуваме следните чекори

- Генерираме рамномерно распределен случаен број  $r$ .
- Ако е  $r < p_c$  бројот  $N_c$  го зголемуваме за еден.
- Ако бројот  $N_c$  е непарен број на помошната променлива  $j$  ѝ ја доделуваме вредноста  $i$ .
- Ако бројот  $N_c$  е парен ги вкрстуваме хромозомите  $i$  и  $j$ .



Navigation icons: back, forward, search, etc.

## Мутација

За секој ген  $i$ , кај секој од хромозомите од целата популација, се генерира рамномерно распределен случаен број  $r$ , при што ако е исполнето  $r < p_m$  разгледуваниот ген треба да мутира така што добива нова вредност која зависи од неговиот домен на менување, тековната генерација  $\nu$  и максималниот број на генерации  $M$

$$G_{i(\text{нов})} = \begin{cases} G_i + (G_i^{\max} - G_i) \cdot (1 - r^x), & r_1 \leq 0,5; \\ G_i - (G_i - G_i^{\min}) \cdot (1 - r^x), & r_1 > 0,5; \end{cases}$$

$r_1$  е рамномерно распределен случаен број  
 $x = (1 - \mu/M)^d$ , а  $d$  е коефициент на неуниформна мутација кој обично има вредност 5

## Принцип на елитизам

- Правењето на нова популација само со процесот на селекција и генерирање нови потомци со вркстување може да предизвика губење на најдобриот хромозом од претходната генерација.
- Поради тоа од тековната генерација ќе биде мемориран најдобриот хромозом ако тој е подобар од најдобриот хромозом мемориран дотогаш. Во спротивен случај најлошиот хромозом од тековната генерација ќе биде заменет со најдобриот хромозом мемориран дотогаш. На таков начин најдобриот хромозом ќе преживее до крајот на еволуцијата на генетскиот алгоритам.

## Генетски алгоритам во Matlab (1)

```
../programi/uc/uc_ga.m
1 function [PG, A, F] = uc_ga(datoteka,N,M,pc,pm,d)
2 if nargin == 1
3     N = 100; M = 300; pc = 0.8; pm = 0.1; d = 5;
4 end
5 if isstruct(datoteka)
6     ees = datoteka;
7 else
8     ees = feval(datoteka);
9 end
10 G = ees.generatori; NG = size(G,1);
11 [PGmin,PGmax,a,b,c] = deal(G(:,2),G(:,3),G(:,4),G(:,5),G(:,6));
12 PP = ees.PP;
13 geni = pocetok(N,PGmin,PGmax,PP);
14 F = zeros(N,1);
15 for i = 1:N
16     F(i) = ek_disp_01(geni(i,:),NG,PGmin,PGmax,a,b,c,PP);
17 end
18 [Fmin, i] = min(F);
19 F(N+1) = Fmin;
20 geni(N+1,:) = geni(i,:);
21 Fmin = inf; igen = 0; kraj = false;
22 while igen < M && ~kraj
23     igen = igen + 1;
24     geni = selekcija(geni,F);
25     geni = vkrstuvanje(geni,pc);
```

## Генетски алгоритам во Matlab (2)

```
26     geni = mutacija(igen,M,geni,pm,d);
27     for i = 1:N
28         F(i) = ek_disp_01(geni(i,:),NG,PGmin,PGmax,a,b,c,PP);
29     end
30     [geni, F] = elitizam(geni,F);
31     if F(N+1) < Fmin, Fmin = F(N+1); end
32     Fsr = mean(F); D = (Fsr - F(N+1))/F(N+1);
33     kraj = D < 0.001;
34     fprintf('%4i % .6e % .6e % .6f\n',igen,F(N+1),Fsr,D);
35 end
36 A = geni(N+1,:);
37 [F,PG] = ek_disp_01(A,NG,PGmin,PGmax,a,b,c,PP);
```

Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

37 / 41

## Генетски алгоритам во Matlab (3)

```
../programi/uc/uc_gamat.m
1 function [PG, A, F] = uc_gamat(datoteka,N,M,pc)
2 if nargin == 1
3     N = 100; M = 300; pc = 0.8;
4 end
5 if isstruct(datoteka)
6     ees = datoteka;
7 else
8     ees = feval(datoteka);
9 end
10 G = ees.generatori; NG = size(G,1);
11 [PGmin,PGmax,a,b,c] = deal(G(:,2),G(:,3),G(:,4),G(:,5),G(:,6));
12 PP = ees.PP;
13 trosoci = @(A) ek_disp_01(A,NG,PGmin,PGmax,a,b,c,PP);
14 geni = pocetok(N,PGmin,PGmax,PP);
15 options = gaoptimset( ...
16     'PopulationType','bitString', ...
17     'MutationFcn',{@mutationgaussian 1 1}, ...
18     'PopulationSize',N, ...
19     'Generations',M, ...
20     'EliteCount', 10, ...
21     'CrossoverFraction',pc, ...
22     'FitnessScalingFcn',@fitscalingprop, ...
23     'Display','iter', ...
24     'InitialPopulation', geni);
```

Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

38 / 41

## Генетски алгоритам во Matlab (4)

```
25 A = ga(trosoci,NG,[],[],[],[],[],[],options);
26 [F, PG] = ek_disp_01(A,NG,PGmin,PGmax,a,b,c,PP);
```

Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

39 / 41

## Пример 7

- IEEE Reliability Test System-1996 – со една област (ees\_uc\_rts96a.m) со 26 генератори и со три области (ees\_uc\_rts96c.m) со 78 генератори.
- Бројот на сите можни комбинации изнесува  $2^{26} = 67.108.864$  односно  $2^{78} \approx 3 \cdot 10^{23}$  комбинации.
- [PG, A, F] = uc\_ga('ees\_uc\_rts96a')  
[PG, A, F] = uc\_gamat('ees\_uc\_rts96a')

време за пресметки: 12 сек. и 6 сек.

Ген.	3	4	7	8	13	20	21	22	23	24	25	26
$P_G$ (MW)	76	76	76	76	191	155	155	400	400	155	155	350

$$F = 26.509,36 \text{ €/h}$$

## Пример 7

[PG, A, F] = uc\_ga('ees\_uc\_rts96c')  
[PG, A, F] = uc\_gamat('ees\_uc\_rts96c')

време за пресметки: 20 сек. и 10 сек.

Ген.	3	4	7	8	9	10	11	12	13	14
$P_G$ (MW)	76	76	76	76	100	100	100	197	197	197
Ген.	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$P_G$ (MW)	12	12	12	12	12	155	155	400	400	155
Ген.	25	26	46	47	48	49	50	51	52	55
$P_G$ (MW)	155	350	155	155	400	400	155	155	350	57,5
Ген.	56	59	60	72	73	74	75	76	77	78
$P_G$ (MW)	57,5	57,5	57,5	155	155	400	400	155	155	350

$$F = 159.273,27 \text{ €/h}$$

# Режими на работа на ЕЕС

## Оптимално работа на ЕЕС составен од хидроцентрали и термоцентрали

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи  
Факултет за електротехника и информациски технологии  
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk  
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2017

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 1 / 23

### Дефиниција на проблемот

- Хидроцентралите немаат трошоци кои зависат само од промената на активната моќност на централата како термоцентралите. Критериумот за одредување на оптимален режим на работа со минимални трошоци не може да се примени кај нив.
- Вообичаено е да се дефинира расположивата количина на вода која што може да се искористи за одреден временски период (ден или недела за краткорочно планирање, повеќе недели или месеци за долгорочното планирање).

$$P(q, h) = \frac{\eta(q, h) \cdot q \cdot h}{c},$$

$$P(q, h) = \psi(h) \cdot \varphi(q).$$

$$\psi(h) = \text{const.}$$

$$q = \alpha + \beta \cdot P_G + \gamma \cdot P_G^2$$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 2 / 23

### Координациони равенки

Работа на ЕЕС во  $N$  временски периоди со познато траење  $T_j, j = 1, 2, \dots, N$ . Во системот постојат вкупно  $n$  централи од кои што  $m$  се термоцентрали и  $n - m$  хидроцентрали.  
трошоци за термоцентралите

$$F = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^m F_i^{(j)} \cdot T_j$$

биланс на моќности

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi}^{(j)} = P_P^{(j)}, \Rightarrow P_P^{(j)} - \sum_{i=1}^n P_{Gi}^{(j)} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, N,$$

ограничување за расположивата количина на вода

$$\sum_{j=1}^N q_i^{(j)} \cdot T_j = V_i, \Rightarrow \sum_{j=1}^N q_i^{(j)} \cdot T_j - V_i = 0, \quad i = m + 1, m + 2, \dots, n,$$

техничките ограничувања за моќностите на генераторите

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 3 / 23

## Координациони равенки

$$L = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^m F_i^{(j)} \cdot T_j + \sum_{j=1}^N \lambda_j \left( P_P^{(j)} - \sum_{i=1}^n P_{Gi}^{(j)} \right) + \sum_{i=m+1}^n \mu_i \left( \sum_{j=1}^N q_i^{(j)} \cdot T_j - V_i \right),$$

$\lambda_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) и  $\mu_i$  ( $i = m + 1, m + 2, \dots, n$ ) се Лагранжови множители

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}^{(j)}} = \frac{\partial F_i^{(j)}}{\partial P_{Gi}^{(j)}} \cdot T_j - \lambda_j = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}^{(j)}} = -\lambda_j + \mu_i \cdot \frac{\partial q_i^j}{\partial P_{Gi}^{(j)}} \cdot T_j = 0, \quad i = m + 1, m + 2, \dots, n.$$

$$\frac{\partial F_i^{(j)}}{\partial P_{Gi}^{(j)}} = \frac{\lambda_j}{T_j}, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\mu_i \cdot \frac{\partial q_i^j}{\partial P_{Gi}^{(j)}} = \frac{\lambda_j}{T_j}, \quad i = m + 1, m + 2, \dots, n.$$

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

4 / 23

## Координациони равенки

$$\frac{\lambda_j}{T_j} = \lambda_j,$$

$$\frac{\partial F_i^{(j)}}{\partial P_{Gi}^{(j)}} = \lambda_j, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\mu_i \cdot \frac{\partial q_i^j}{\partial P_{Gi}^{(j)}} = \lambda_j, \quad i = m + 1, m + 2, \dots, n.$$

Последните 2 равенките се познати под името координациони равенки. Нивната примена ќе ја илустрираме преку следниот пример.

MT (ПЕЕС)

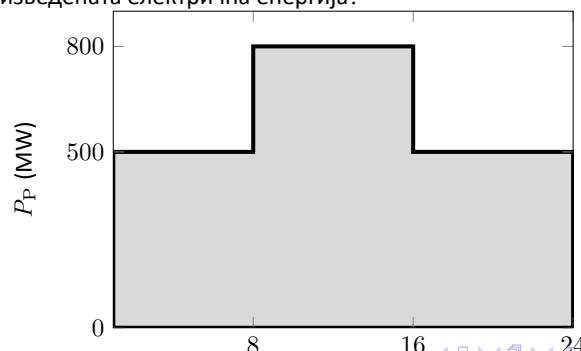
ПЕЕС

Скопје, 2017

5 / 23

## Пример 1

Во еден ЕЕС има 1 термоцентрала и 1 хидроцентрала.  $P_P$  се менува според дијаграмот прикажан на сликата. Трошоците на термоцентрала се  $F_1 = 10000 + 0,004 \cdot P_1^2$  (€/h), протокот на вода на хидроцентрала е  $q_2 = 80000 + 7 \cdot P_2^2$  (m<sup>3</sup>/h). Во текот на денот на располагање има  $10 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> вода. Да се одредат моќностите на генераторите така што вкупните трошоци во системот да бидат минимални, а потоа да се пресметаат трошоците како и произведената електрична енергија од секоја централа. Колкава е просечната цена на произведената електрична енергија?



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

6 / 23

## Пример 1

$$0,008 \cdot P_1^{(j)} = \lambda_j,$$

$$\mu_2 \cdot 14 \cdot P_2^{(j)} = \lambda_j$$

$$P_1^{(j)} + P_2^{(j)} = P_P^{(j)},$$

$$\sum_{j=1}^3 \left[ 80000 + 7 \cdot \left( P_2^{(j)} \right)^2 \right] \cdot T_j = 10 \cdot 10^6$$

$$0,008 \cdot P_1^{(j)} = \mu_2 \cdot 14 \cdot P_2^{(j)}$$

$$P_1^{(j)} = 1750 \cdot \mu_2 \cdot P_2^{(j)}.$$

$$P_2^{(j)} = \frac{P_P^{(j)}}{1 + 1750 \cdot \mu_2}.$$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 7 / 23

## Пример 1

$$24 \cdot 80000 + 7 \cdot \sum_{j=1}^3 \left( P_2^{(j)} \right)^2 \cdot T_j = 10 \cdot 10^6$$

$$\sum_{j=1}^3 \left( P_2^{(j)} \right)^2 \cdot T_j = \frac{10 \cdot 10^6 - 24 \cdot 80000}{7} = 1,15429 \cdot 10^6.$$

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\left( P_P^{(j)} \right)^2 \cdot T_j}{\left( 1 + 1750 \cdot \mu_2 \right)^2} = 1,15429 \cdot 10^6,$$

$$\frac{500^2 \cdot 8 + 800^2 \cdot 8 + 500^2 \cdot 8}{\left( 1 + 1750 \cdot \mu_2 \right)^2} = 1,15429 \cdot 10^6,$$

$$1 + 1750 \cdot \mu_2 = 2,81087,$$

$$P_2^{(j)} = \frac{P_P^{(j)}}{2,81087}.$$

МТ (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017 8 / 23

## Пример 1

Период	Траење (h)	$P_P$ (MW)	$P_1$ (MW)	$F_1$ (€/h)	$P_2$ (MW)	$q_2$ (m <sup>3</sup> /h)
1	8	500	322,1	10415,04	177,9	301491
2	8	800	515,4	11062,51	284,6	647018
3	8	500	322,1	10415,04	177,9	301491

$$F = 255.140,77 \text{ €}$$

$$V = 10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

$$W = 14.400 \text{ MWh}$$

$$W_1 = 9.277 \text{ MWh}$$

$$W_2 = 5.123 \text{ MWh}$$

$$C = 255.140,77 / 14400 = 17,72 \text{ €/MWh}$$

МТ (ПЕЕС)

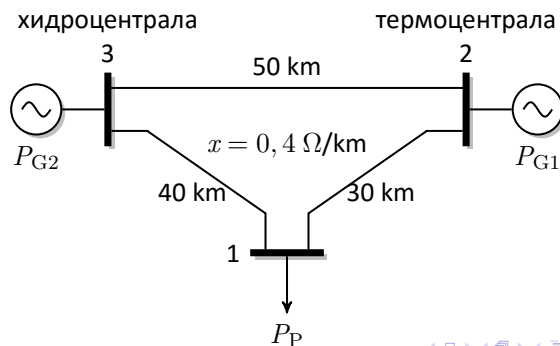
ПЕЕС

Скопје, 2017 9 / 23



## Пример 2

Да се реши примерот 1 со примена на Matlab, а потоа примерот 1 да се реши за случајот кога во системот постои преносна мрежа како на сликата. Сите водови од преносната мрежа имаат надолжна реактанција  $x = 0,4 \Omega/\text{km}$ , а нивните должини се дадени на сликата. Да се одреди оптималниот режим на работа на системот за еден ден ако се знае дека максимално дозволената активна моќност на сите гранки изнесува 455 MW.



MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 10 / 23

## Пример 2 – податоци (1)

```
../programi/ht/ees_ht_1.m
1 function ees = ees_ht_1()
2 ees.Sb = 100;
3 ees.jazli = [
4 % jazel tip Pp(MW) oblast
5     1 1 800 1
6     2 3 0 1
7     3 1 0 1
8 ];
9 ees.termo = [
10 % jazel Pg(MW) Pmin(MW) Pmax(MW) status
11     2 400 0 1000 1
12 ];
13 ees.hidro = [
14 % jazel Pg(MW) Pmin(MW) Pmax(MW) status
15     3 400 0 1000 1
16 ];
17 ees.trosoci = [
18 % jazel a(E/h) b(E/MWh) c(E/MWh^2)
19     2 10000 0 0.004
20 ];
21 ees.voda = [
22 % jazel alfa(m^3/h) beta(m^3/MWh) gama(m^3/MWh^2) Vmax(m^3)
23     3 80000 0 7 1e7
24 ];
25 ees.dijagram = [
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 11 / 23

## Пример 2 – податоци (2)

```
26 % PP casovi
27     500 8
28     800 8
29     500 8
30 ];
31 ees.granki = [
32 % pocetok kraj X(pu) Pmax(MW) status
33     3 1 16/121 455 1
34     2 1 12/121 455 1
35     3 2 20/121 455 1
36 ];
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017 12 / 23

## Програма hidro\_termo (1)

```
../programi/ht/hidro_termo.m
1 function [PT,PH,PGR,V,F,T,exitflag] = hidro_termo(datoteka,uvazi_mreza)
2 if nargin == 1, uvazi_mreza = true; end
3 if isstruct(datoteka)
4     ees = datoteka;
5 else
6     ees = feval(datoteka);
7 end
8 if uvazi_mreza
9     path('..','path');
10    ees.generatori = [ees.termo; ees.hidro];
11    H = matrica_h(ees); PGRmax = ees.granki(:,4);
12    [M,NG] = size(H);
13 end
14 G = ees.termo; [PTmin,PTmax] = deal(G(:,3),G(:,4)); NT = size(G,1);
15 T = ees.trosoci; [a,b,c] = deal(T(:,2),T(:,3),T(:,4));
16 G = ees.hidro; [PHmin,PHmax] = deal(G(:,3),G(:,4)); NH = size(G,1);
17 V = ees.voda; [alfa,beta,gama,Vmax] = deal(V(:,2),V(:,3),V(:,4),V(:,5));
18 D = ees.dijagram; [P,T] = deal(D(:,1),D(:,2)); ND = size(D,1);
19 E = num2cell(ones(ND,NT+NH),1); E = blkdiag(E{:});
20 Xmin = E * [PTmin; PHmin];
21 Xmax = E * [PTmax; PHmax];
22 Aeq = repmat(eye(ND),1,NT+NH);
23 beq = P;
24 if uvazi_mreza
25     A = zeros(M*ND,NG*ND);
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

13 / 23

## Програма hidro\_termo (2)

```
26     for i = 1:ND
27         for j = 1:NG
28             A(ND*(i-1)+1:ND,i+(j-1)*ND) = H(:,j);
29         end
30     end
31     B = repmat(PGRmax,ND,1);
32 else
33     A = []; B = [];
34 end
35 X0 = (Xmin + Xmax)/2;
36 [X,F,exitflag] = fmincon('trosoci',X0,[A;-A],[B;B],Aeq,beq,Xmin,Xmax,'voda',[],...
37     NT,NH,ND,a,b,c,alfa,beta,gama,Vmax,T);
38 PT = reshape(X(1:NT*ND),ND,NT)';
39 PH = reshape(X(NT*ND+1:end),ND,NH)';
40 c = voda(X,NT,NH,ND,a,b,c,alfa,beta,gama,Vmax,T);
41 V = c + Vmax;
42 if uvazi_mreza
43     PGR = reshape(A*X,M,ND);
44 else
45     PGR = [];
46 end
```

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

14 / 23

## Програма hidro\_termo

долни и горни граници за векторот  $X$

$$E \cdot \begin{bmatrix} P_{G,термо}^{\min} \\ P_{G,хидро}^{\min} \end{bmatrix}, \quad E \cdot \begin{bmatrix} P_{G,термо}^{\max} \\ P_{G,хидро}^{\max} \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

MT (PEEC)

PEEC

Скопје, 2017

15 / 23

## Програма hidro\_termo

биланс на моќности

$$A_{\text{eq}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad b_{\text{eq}} = P = \begin{bmatrix} 500 \\ 800 \\ 500 \end{bmatrix},$$

ограничувања за моќностите на гранките

$$A = \begin{bmatrix} H_{11} & 0 & 0 & H_{12} & 0 & 0 \\ H_{21} & 0 & 0 & H_{22} & 0 & 0 \\ H_{31} & 0 & 0 & H_{32} & 0 & 0 \\ 0 & H_{11} & 0 & 0 & H_{12} & 0 \\ 0 & H_{21} & 0 & 0 & H_{22} & 0 \\ 0 & H_{31} & 0 & 0 & H_{32} & 0 \\ 0 & 0 & H_{11} & 0 & 0 & H_{12} \\ 0 & 0 & H_{21} & 0 & 0 & H_{22} \\ 0 & 0 & H_{31} & 0 & 0 & H_{32} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 455 \\ 455 \\ 455 \\ 455 \\ 455 \\ 455 \\ 455 \\ 455 \\ 455 \end{bmatrix},$$

MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017

16 / 23

## Функции trosoci и voda

../programi/ht/trosoci.m

```
1 function f = trosoci(X,NT,NH,ND,a,b,c,alfa,beta,gama,Vmax,T)
2 P = reshape(X(1:NT*ND),ND,NT)';
3 f = 0;
4 for i = 1:ND
5     Pi = P(:,i);
6     f = f + sum(a + b.*Pi + c.*Pi.^2)*T(i);
7 end
```

../programi/ht/voda.m

```
1 function [c, ceq] = voda(X,NT,NH,ND,a,b,c,alfa,beta,gama,Vmax,T)
2 P = reshape(X(NT*ND+1:end),ND,NH)';
3 V = zeros(NH,1);
4 for i = 1:ND
5     Pi = P(:,i);
6     V = V + (alfa + beta.*Pi + gama.*Pi.^2)*T(i);
7 end
8 c = V - Vmax;
9 ceq = [];
```

MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017

17 / 23

## Пример 2 – решение

без преносна мрежа

```
>> [PT,PH,PGR,V,F,T,exitflag] = hidro_termo('ees_ht_1',false)
PT =
    322.1191    515.3906    322.1191
PH =
    177.8809    284.6094    177.8809
PGR =
     []
V =
    1.0000e+007
F =
    2.5514e+005
```

со преносна мрежа

```
[PT,PH,PGR,V,F,T,exitflag] = hidro_termo('ees_ht_1',true)
PT =
    392.3392    452.0000    392.3392
PH =
    107.6608    348.0000    107.6608
PGR =
    169.8587    345.0000    169.8587
    330.1413    455.0000    330.1413
    -62.1978     3.0000    -62.1978
V =
    10000000
F =
    2.5639e+005
```

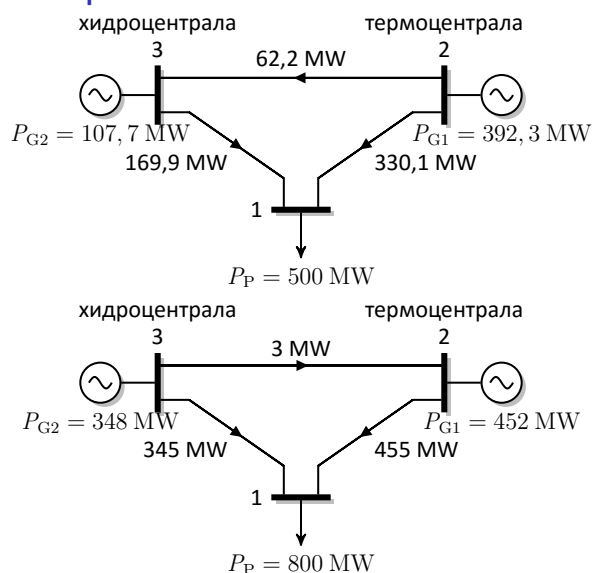
MT (PEEC)

PEEC

Kronje, 2017

18 / 23

## Пример 2 – решение



MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

19 / 23

## Пример 3

Да се реши примерот 1 за случајот кога карактеристиката на трошоците на термоцентралата е дадена со изразот  $F_1 = 2000 + 50 \cdot P_1 + 0,004 \cdot P_1^2$  (€/h). Користејќи ја новата карактеристика на трошоците да се повторат пресметките при следните дополнителни услови

- а) хидроцентралата има на располагање  $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  вода,
- б) хидроцентралата има на располагање  $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  вода,
- в) хидроцентралата има на располагање  $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  вода и максимална моќност од  $200 \text{ MW}$ .

Кога во кривата на трошоци на термоцентрала е додаден линеарен член по однос на  $P_1$  проблемот станува толку комплициран што е практично невозможно да се реши без примена на компјутер. Поради тоа решението ќе го добиеме со примена на програмата `hidro_termo`.

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

20 / 23

## Пример 3 – решение

а)  
`[PT,PH,PGR,V,F,T,exitflag] = hidro_termo('ees_ht_2',false)`

б)

```
../programi/ht/ht_3b.m
```

```
1 ees = ees_ht_2;  
2 ees.voda(1,5) = 2e6;  
3 [PT,PH,PGR,V,F,T,exitflag] = hidro_termo(ees,false)
```

в)

```
../programi/ht/ht_3v.m
```

```
1 ees = ees_ht_2;  
2 ees.voda(1,5) = 1e7;  
3 ees.hidro(1,4) = 200;  
4 [PT,PH,PGR,V,F,T,exitflag] = hidro_termo(ees,false)
```

MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

21 / 23

## Пример 3 – резултати

а)

(MW)	период 1	период 2	период 3
термоцентра	366,615	660,671	366,599
хидроцентра	133,385	139,329	133,401

б)

(MW)	период 1	период 2	период 3
термоцентра	478,501	777,546	478,501
хидроцентра	21,499	22,454	21,499

в)

(MW)	период 1	период 2	период 3
термоцентра	300	600	300
хидроцентра	200	200	200

вкупни трошоци и потрошена вода

	случај а)	случај б)	случај в)
$F$ (€)	628.123,13	775.819,58	545.280,00
$C$ (€/MWh)	43,62	53,88	37,87
$V$ (m <sup>3</sup> )	$5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$8,64 \cdot 10^6$

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

## Пример 3в

Случајот в) е решлив без примена на оптимизациони методи. Бидејќи за минимизација на трошоците е најдобро хидроцентралата да произведе што е можно повеќе енергија. Со моќност од 200 MW количеството на вода изнесува

$$V = (80000 + 7 \cdot 200^2) \cdot 24 = 8,64 \cdot 10^6 \text{ m}^3 < 10 \cdot 10^6 \text{ m}^3,$$

Тоа значи дека ограничувањето за потрошената вода не е прекршено така што заклучуваме дека хидроцентра треба да работи со моќност од 200 MW во текот на целиот ден. Моќноста на термоцентралата се добива како разлика од моќноста на потрошувачот и моќноста на хидроцентралата.

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

# Режими на работа на ЕЕС

## Пробабилитичка симулација на работата на ЕЕС

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи  
Факултет за електротехника и информациски технологии  
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk  
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2017

МТ (ПЕЕС)

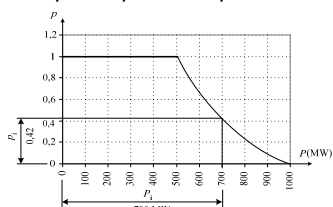
РЕЕС

Скопје, 2017

1 / 16

### Вовед

- Симулација на работата на ЕЕС со што се одредуваат трошоците за работа на системот за подолг временски период (месеци, години) преку одредувањето на очекуваното производство на електрична енергија за секоја одделна електрична централа.
- Влезни податоци
  - ▶ кривата на траење на оптоварувањето на системот,
  - ▶ редослед на оптоварување на генераторските единици,
  - ▶ цените на горивата и расположливата енергија кај генераторските единици.
- Инверзна крива на траење на оптоварувањето



2

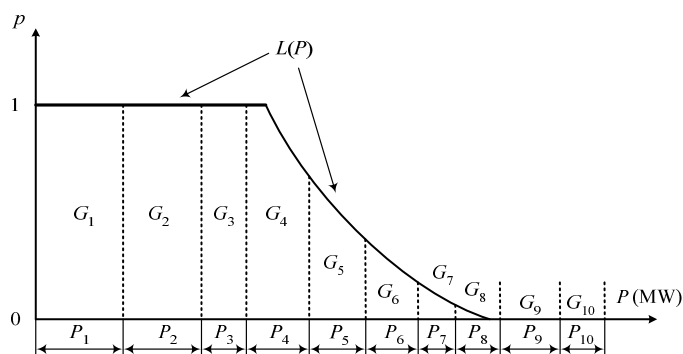
МТ (ПЕЕС)

РЕЕС

Скопје, 2017

2 / 16

### Сите генератори се во погон, доверливоста е 100%



очекувано производство на електрична енергија на генераторот  $i$

$$E_i = T \cdot \int_{a_i}^{b_i} L(P) dP$$

МТ (ПЕЕС)

РЕЕС

Скопје, 2017

3 / 16

## Веројатности за испад

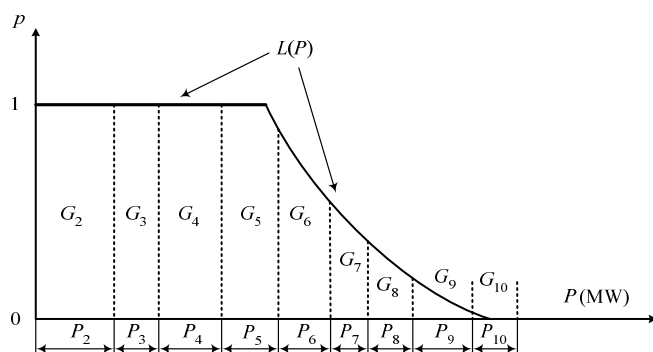
Кај генераторите се појавуваат дефекти на случаен начин кој е непредвидлив. За секој генератор дефинираме две работни состојби со соодветни веројатности

- генераторот  $i$  е во погон и може да произведува моќност еднаква на неговата максимална моќност, при што веројатноста за ваквата состојба е  $p_i$ ,
- генераторот  $i$  е вон погон и не може да произведува никаква моќност, при што веројатноста за ваквата состојба е  $q_i$ .

$$p_i + q_i = 1$$

## Генераторот 1 не е во погон

Генераторите се поместени налево за вредност која е еднаква на моќноста на генераторот 1. Значителна промена во очекуваното производство има кај генераторите кои се наоѓаат кон крајот на инверзната крива на оптоварување (генераторите 6 – 10).



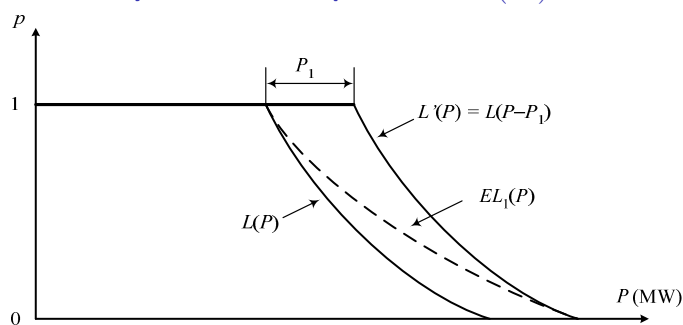
## Генераторот 1 не е во погон

$$E_1 = p_1 \cdot T \cdot \int_{a_1}^{b_1} L(P) dP$$

Работата на генераторот 2 директно зависи од можниот испад на генераторот 1, но не зависи од испадите на генераторите 3, 4, ... 10.

$$E_2 = p_2 \cdot T \cdot \left[ p_1 \cdot \int_{a_2}^{b_2} L(P) dP + q_1 \cdot \int_{\alpha_2}^{\beta_2} L(P) dP \right],$$

## Поместување на кривата $L(P)$ надесно



Еквивалентна крива на траење на оптоварувањето

$$L'(P) = L(P - P_1),$$

$$\int_{\alpha_2}^{\beta_2} L'(P) dP = \int_{\alpha_2}^{b_2} L(P - P_1) dP.$$

## Производство на генераторот 2

$$E_2 = p_2 \cdot T \cdot \left\{ \int_{\alpha_2}^{b_2} [p_1 \cdot L(P) + q_1 \cdot L(P - P_1)] dP \right\}.$$

$$EL_1(P) = p_1 \cdot L(P) + q_1 \cdot L(P - P_1),$$

$$E_2 = p_2 \cdot T \cdot \int_{\alpha_2}^{b_2} EL_1(P) dP.$$

## Производство на генераторот 3

$$E_3 = p_3 \cdot T \cdot \left\{ \int_{\alpha_3}^{b_3} [p_2 \cdot EL_1(P) + q_2 \cdot EL_1(P - P_2)] dP \right\}.$$

$$EL_2(P) = p_2 \cdot EL_1(P) + q_2 \cdot EL_1(P - P_2),$$

$$E_3 = p_3 \cdot T \cdot \int_{\alpha_3}^{b_3} EL_2(P) dP.$$



## Производство на генераторот $i$

$$EL_i(P) = p_i \cdot EL_{i-1}(P) + q_i \cdot EL_{i-1}(P - P_i),$$

$$EL_0(P) = L(P).$$

$$E_i = p_i \cdot T \cdot \int_{a_i}^{b_i} EL_{i-1}(P) dP.$$

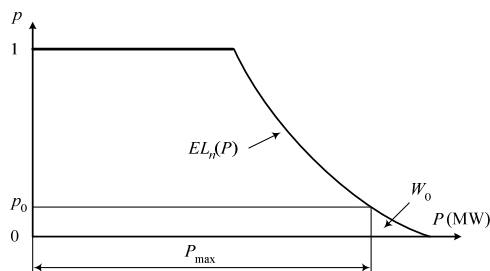
## Пресметка на LOLP и ENS

LOLP – Loss of Load Probability

ENS – Energy Not Served

Се пресметуваат од еквивалентната крива на оптоварување на последниот генератор  $EL_n(P)$ .

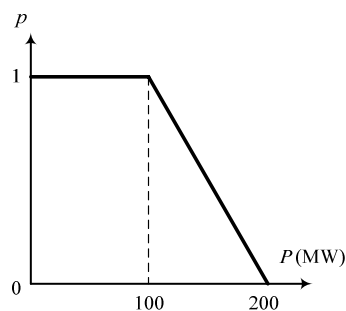
$$LOLP = p_0 \quad ENS = \int_{P_{\max}}^{\infty} EL_n(P) dP.$$



Еквивалентна крива на оптоварување за целиот систем

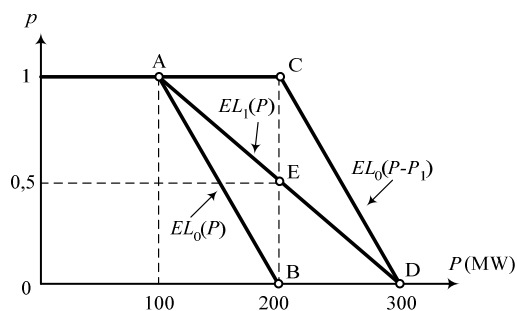
## Пример 1

Еден ЕЕС се состои од два генератори чии карактеристики се  $P_1 = 100$  MW,  $q_1 = 0,5$  и  $P_2 = 200$  MW,  $q_2 = 0,4$ , при што генераторот 1 има помали производни трошоци. Годишната инверзна крива на траење на оптоварувањето се состои од два праволиниски сегменти како што тоа е прикажано на сликата. Со примена на методот на пробабилистичка симулација на работата на ЕЕС да се пресмета годишното очекувано производство на електрична енергија на двата генератори и да се пресметаат параметрите  $LOLP$  и  $ENS$ .



## Пример 1 – $EL_1(P)$

$$EL_1(P) = p_1 \cdot EL_0(P) + q_1 \cdot EL_0(P - P_1) = 0,5 \cdot EL_0(P) + 0,5 \cdot EL_0(P - 100).$$



$$EL_1(100) = 0,5 \cdot EL_0(100) + 0,5 \cdot EL_0(0) = 0,5 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 = 1;$$

$$EL_1(200) = 0,5 \cdot EL_0(200) + 0,5 \cdot EL_0(100) = 0,5 \cdot 0 + 0,5 \cdot 1 = 0,5;$$

$$EL_1(300) = 0,5 \cdot EL_0(300) + 0,5 \cdot EL_0(200) = 0,5 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0 = 0;$$

$A(100; 1), E(200; 0,5), D(300; 0)$

MT (ПЕЕС)

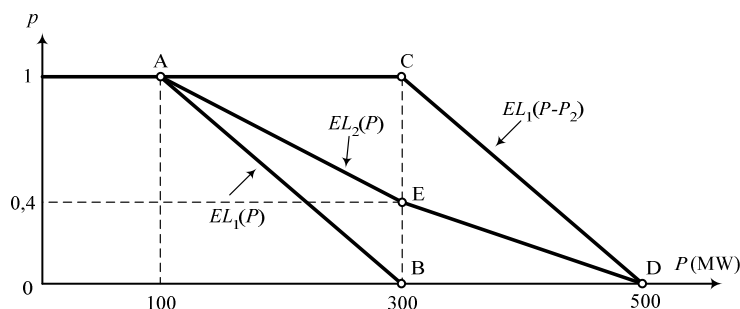
ПЕЕС

Скопје, 2017

13 / 16

## Пример 1 – $EL_2(P)$

$$EL_2(P) = p_2 \cdot EL_1(P) + q_2 \cdot EL_1(P - P_2) = 0,6 \cdot EL_1(P) + 0,4 \cdot EL_1(P - 200).$$



$$EL_2(100) = 0,6 \cdot EL_1(100) + 0,4 \cdot EL_1(-100) = 0,6 \cdot 1 + 0,4 \cdot 1 = 1;$$

$$EL_2(300) = 0,6 \cdot EL_1(300) + 0,4 \cdot EL_1(100) = 0,6 \cdot 0 + 0,4 \cdot 1 = 0,4;$$

$$EL_2(500) = 0,6 \cdot EL_1(500) + 0,4 \cdot EL_1(300) = 0,6 \cdot 0 + 0,4 \cdot 0 = 0.$$

$A(100; 1), E(300; 0,4), D(500; 0)$

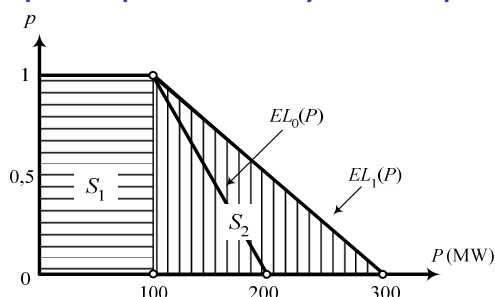
MT (ПЕЕС)

ПЕЕС

Скопје, 2017

14 / 16

## Пример 1 – очекувано производство



$$E_1 = p_1 \cdot T \cdot \int_{a_1}^{b_1} EL_0(P) dP = 0,5 \cdot 8760 \cdot \int_0^{100} EL_0(P) dP = 0,5 \cdot 8760 \cdot S_1 =$$

$$= 0,5 \cdot 8760 \cdot 100 \cdot 1 = 438.000 \text{ MWh} = 438 \text{ GWh},$$

$$E_2 = p_2 \cdot T \cdot \int_{a_2}^{b_2} EL_1(P) dP = 0,6 \cdot 8760 \cdot \int_{100}^{300} EL_1(P) dP = 0,6 \cdot 8760 \cdot S_2 =$$

$$= 0,6 \cdot 8760 \cdot \frac{200 \cdot 1}{2} = 525.600 \text{ MWh} = 525,6 \text{ GWh}.$$

MT (ПЕЕС)

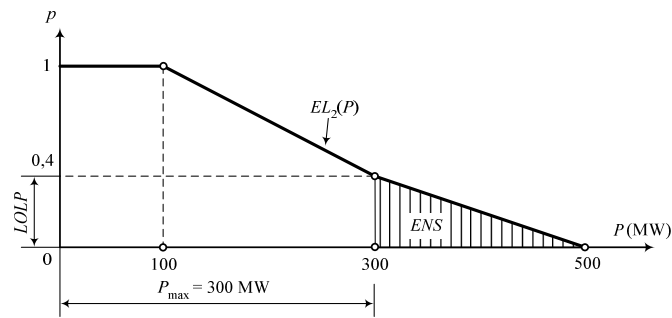
ПЕЕС

Скопје, 2017

15 / 16

## Пример 1 – LOLP и ENS

$$P_{\max} = 300 \text{ MW}, \quad \text{LOLP} = EL_2(300) = 0,4$$



$$ENS = \frac{200 \cdot 0,4}{2} \cdot 8760 = 350.400 \text{ MWh} = 350,4 \text{ GWh.}$$

$$W = 8760 \cdot \left( 100 \cdot 1 + \frac{100 \cdot 1}{2} \right) = 1.314.000 \text{ MWh} = 1.314 \text{ GWh,}$$

$$ENS = W - E_1 - E_2 = 1.314 - 438 - 525,6 = 350,4 \text{ GWh.}$$