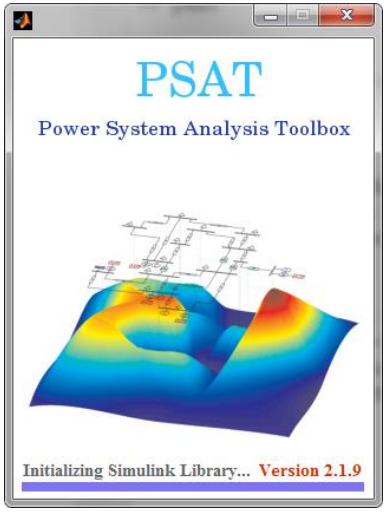
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ ZČU V PLZNI

Software pro řešení chodu ES

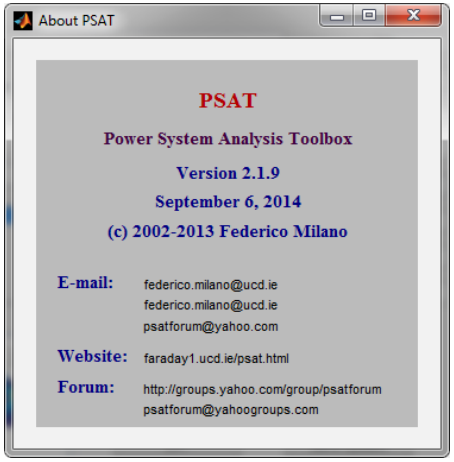
PSAT

Power System Analysis Toolbox

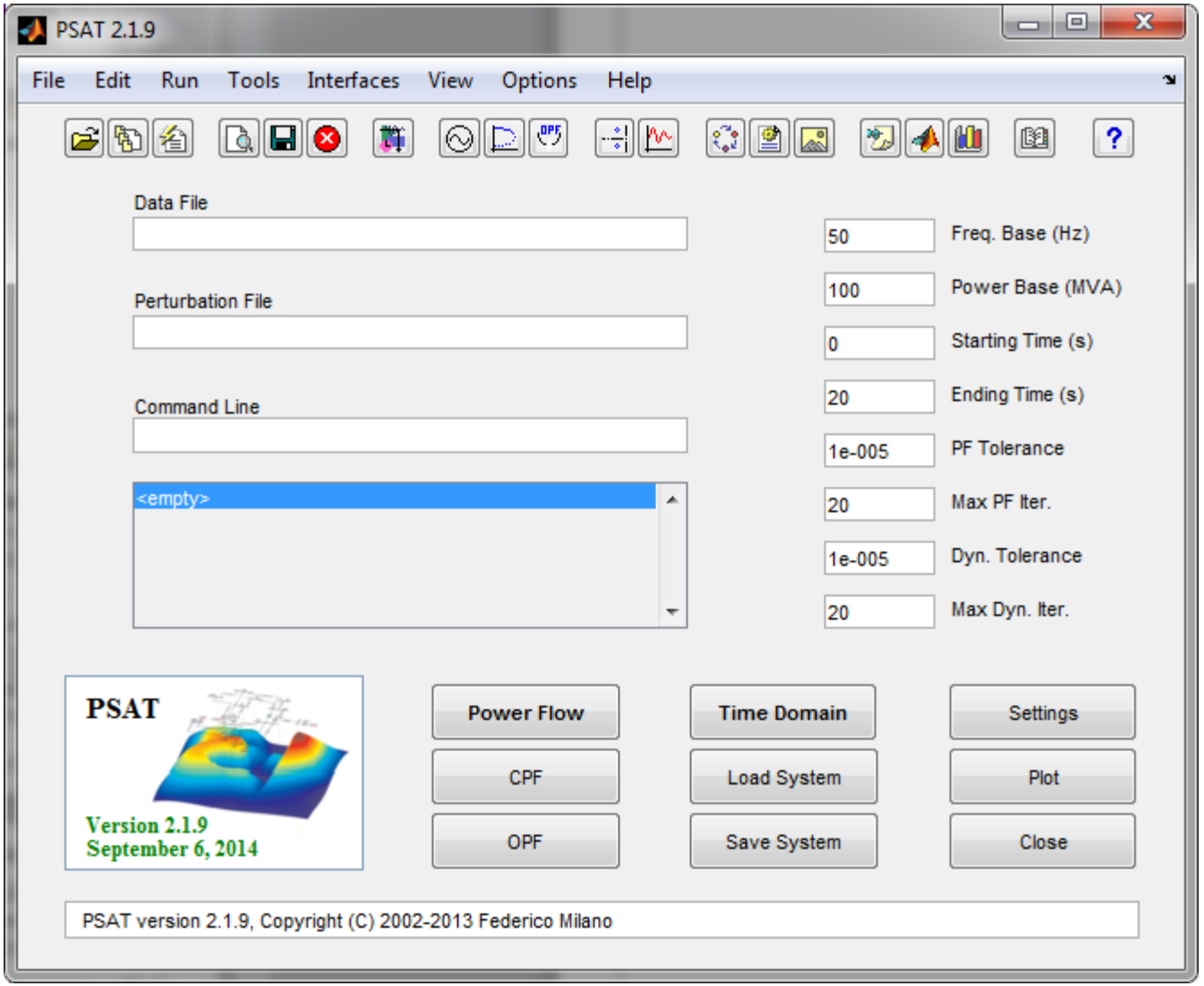


doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

Plzeň 2017



Co je PSAT (Power System Analysis Toolbox):



http://faraday1.ucd.ie/psat.html

Co je PSAT (Power System Analysis Toolbox):

- PSAT je aplikace a prostředí nad systémem MATLAB (Matlab Toolbox) pro analýzu a simulace v ES.
- Verse pro příkazovou řádku je také kompatibilní s GNU Octave.
- Všechny základní operace jsou přístupné z grafického uživatelského prostředí (GUIs).
- Integrovaná knihovna pro systém Simulink slouží pro grafické zadávání topologie sítě (nikoli pro výpočty).

Co je PSAT (Power System Analysis Toolbox):

- Celý koncept je otevřený, přenosný a Open Source s General Public License (GPL).
- Lze spustit na většině operačních systémů.
- Optimalizován pro řídké matice.

Co je PSAT (Power System Analysis Toolbox):

Jsou dostupné tyto analýzy:

- Power Flow (PF)
  - Ustálený chod ES
- Continuation Power Flow (CPF)
  - Analýza napěťové stability
- Optimal Power Flow (OPF)
  - Optimalizace dodávaných výkonů
- Small Signal Stability Analysis (SSSA)
  - Stabilita malých kyvů
- Time Domain Simulation (TDS)
  - Přechodné elektro-mechanické děje

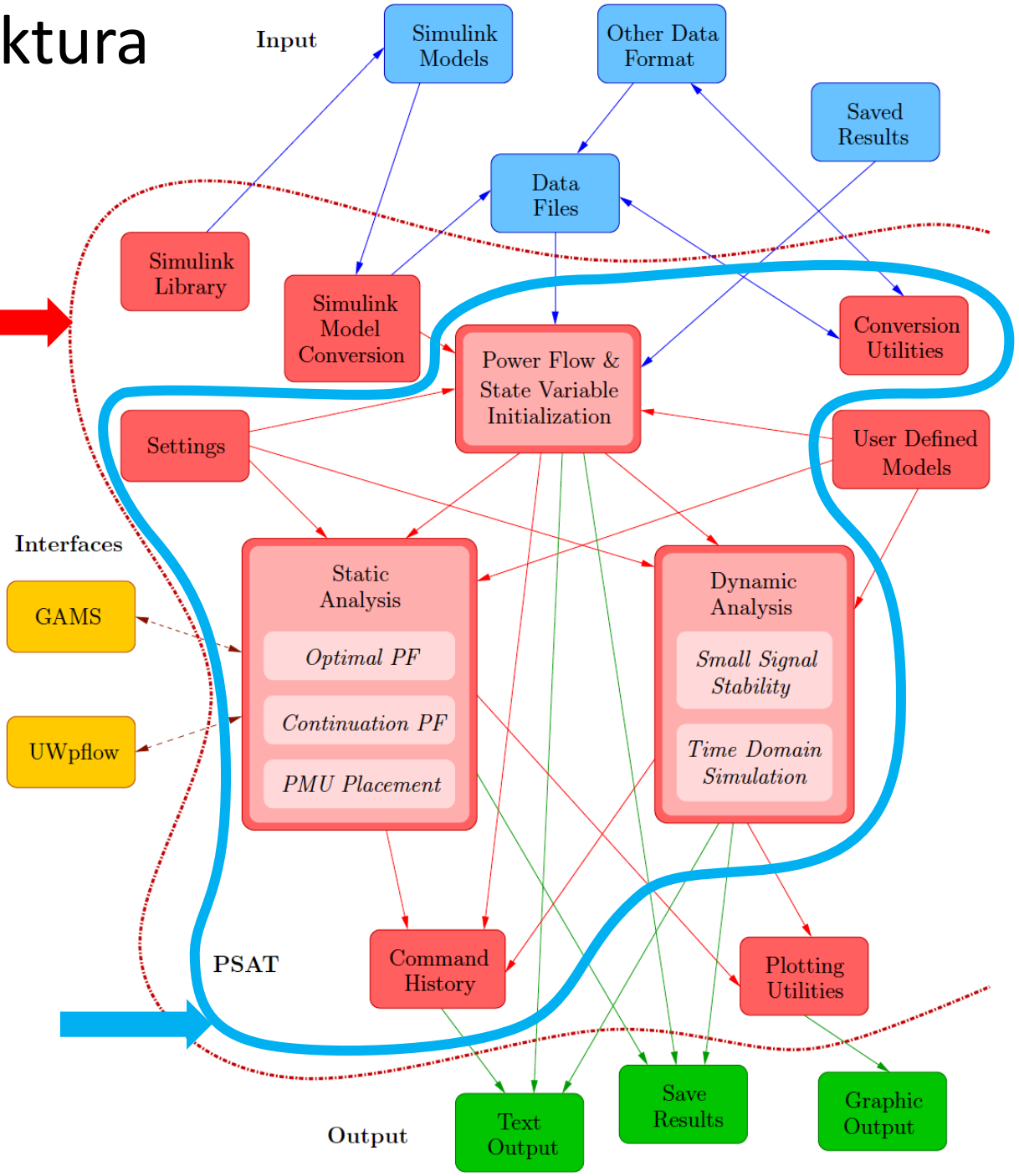
Další charakteristické vlastnosti:

- Bohatá knihovna síťových prvků včetně např. FACTS, větrných elektráren, …, přičemž další lze uživatelsky definovat.
- Konverse vstupních dat z mnoha jiných formátů.
- Konverse výstupů do EPS obrázků, MATLAB grafů, textových souborů, EXCEL tabulek, LaTeX dokumentů, …
- Systém je otevřený rozšiřujícím externím analytickým modulům. Mezi stávající volná doporučená patří například rozšíření pro software GAMS a UWPFLOW.

Funkční struktura aplikace:

MATLAB

GNU Octave

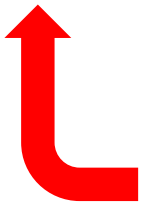


Porovnání s jinými aplikacemi:

Komerční softwarové aplikace:

- **SIEMENS** PSS®E
- **EUROSTAG**
- **ABB** SIMPOW
- CYME Power Engineering Software
- DigSilent PowerFactory
- ***PowerWorld*** Simulator
- **NEPLAN** …

- V ČR populární E-VLIVY, MODES, …



- Omezeně a obtížně uživatelsky rozšířitelné
- Náročné (HW, instalace, obsluha)
- Implementace komponent není otevřená a modely netransparentní
- Licenční politika omezuje šíření výsledů analýz a budování nadstavbových projektů

Porovnání s jinými aplikacemi:

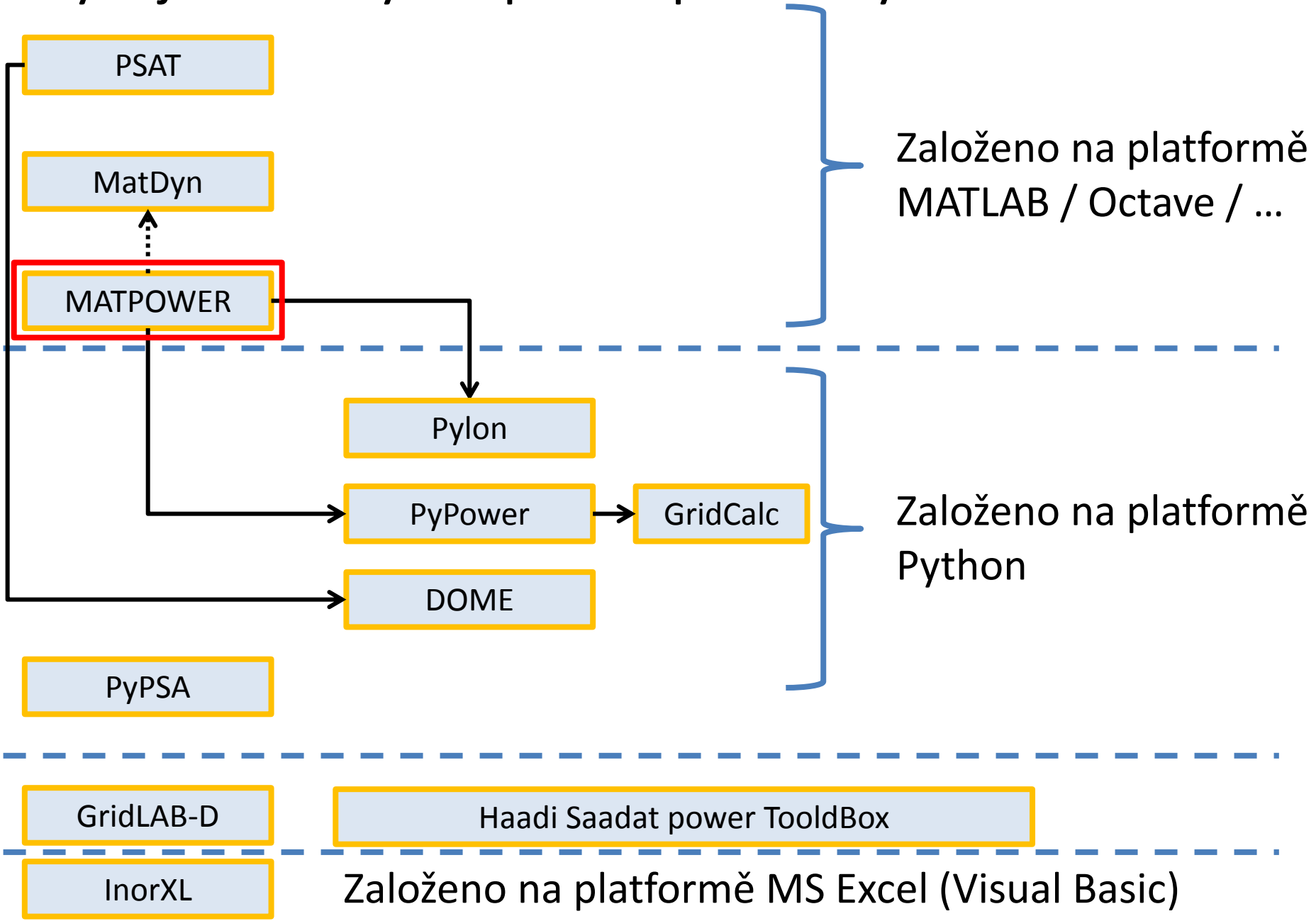
Open-Source aplikace:

- Otevřené jak stávající komponenty, tak možnosti rozšíření
- Flexibilní (snadné vytváření rozšíření - využívají spíše interpretační než kompilované jazyky) – MATLAB, Python, Mathematica, Modelica,

Populární nástroje:

- UWPFLOW
- TEFTS
- MatPower
- InterPSS
- AMES
- DCOPFJ
- OpenDSS
- MatDyn
- Modelica PowerSystems
- THYME
- Dome
- 4DIAC
- MatACDC
- GridLAB-D
- OpenETran
- OpenPMU
- …

Vývoj otevřených aplikací pro analýzu chodu ES:



Porovnání s jinými aplikacemi:

Package	Language	PF	CPF	OPF	EA	TDS	EMT	GUI	CAD
AMES	Java	✓		✓					
EST	Matlab	✓			✓	✓			✓
InterPSS	Java	✓				✓		✓	✓
MatDyn	Matlab	✓				✓			
MatEMTP	Matlab					✓	✓	✓	✓
Matpower	Matlab	✓		✓					
ObjectStab	Modelica	✓			✓	✓		✓	✓
OpenDSS	Delphi	✓				✓		✓	✓
PAT	Matlab	✓			✓	✓			✓
PSAT	Matlab, Octave	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
PST	Matlab	✓	✓		✓	✓			
Pylon	Python	✓		✓				✓	✓
UWPFLOW	C	✓	✓						
VST	Matlab	✓	✓		✓	✓		✓	

Porovnání s jinými aplikacemi:

Package	PF	CPF	OPF	SSSA	TDS	EMT	GUI	CAD
EST	✓			✓	✓			✓
MatEMTP					✓	✓	✓	✓
Matpower	✓		✓					
PAT	✓			✓	✓			✓
PSAT	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
PST	✓	✓		✓	✓			
SPS	✓			✓	✓	✓	✓	✓
VST	✓	✓		✓	✓		✓	

Porovnání s jinými aplikacemi:

Nástroje založené na MATLABu / SIMULINKu:

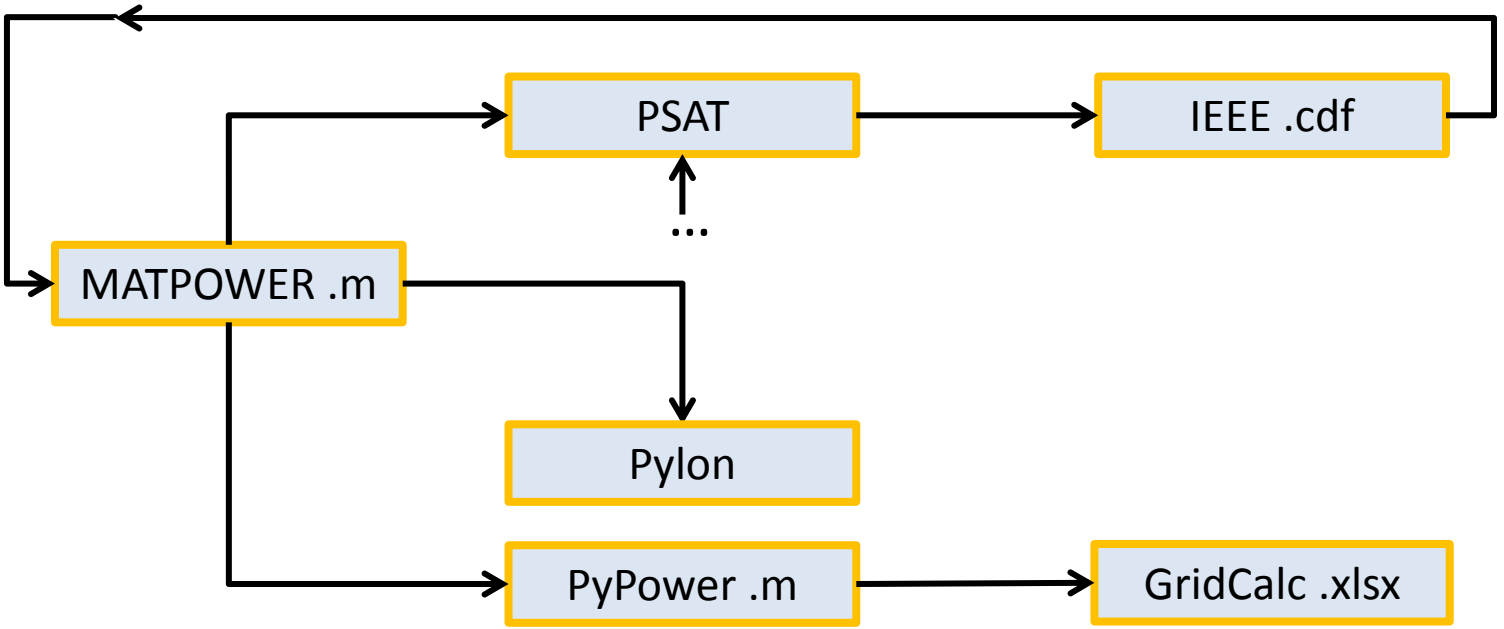
- Power System Analysis Toolbox (PSAT)
- SimPowerSystems (SPS) (komerční)
- MatPower
- Educational Simulation Tool (EST)
- MatDyn
- MatEMTP
- Power Analysis Toolbox (PAT)
- Power System Toolbox (PST)
- Voltage Stability Toolbox (VST)

Porovnání s jinými aplikacemi:

Open-Source aplikace pro MATLAB dosud nemají pro uživatele přístupně implementováno:

- Pokročilou analýzu komplikovaných poruchových stavů
- Harmonickou analýzu
- Analýzu funkce ochran a jejich koordinaci
- …

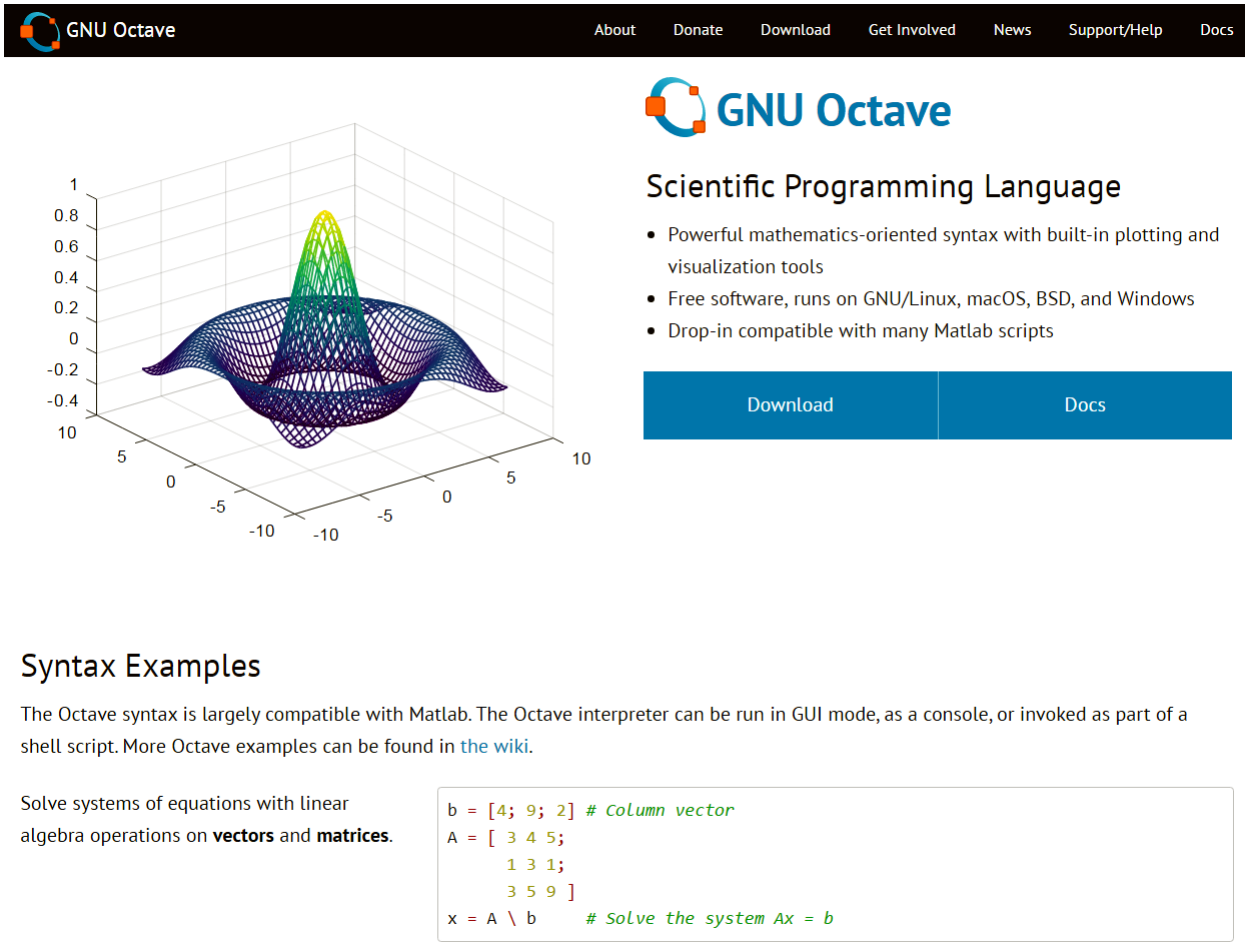
Formáty souborů otevřených aplikací pro analýzu chodu ES:



Porovnání s jinými aplikacemi:

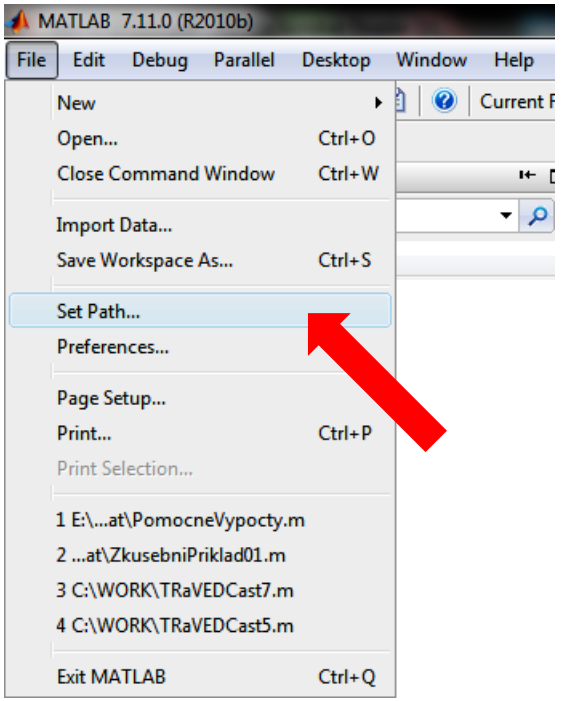
Některé Open-Source aplikace pro MATLAB jsou kompatibilní s Open-Source prostředím GNU-Octave:

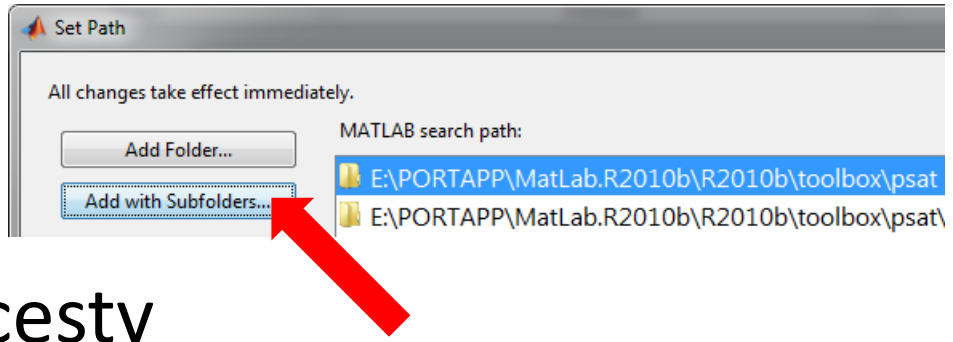
https://www.gnu.org/software/octave/



Instalace aplikace PSAT:

- Pro plnohodnotné vyžití včetně grafického prostředí nutný MATLAB verse 7.
- Pro uživatelské modely je navíc potřebný Symbolic Toolbox.
- Stažený soubor je vhodné umístit mezi ostatní toolboxy např. do adresáře: …\MatLab\toolbox\psat
- Přidat tento adresář včetně podadresářů do cesty systému MATLAB

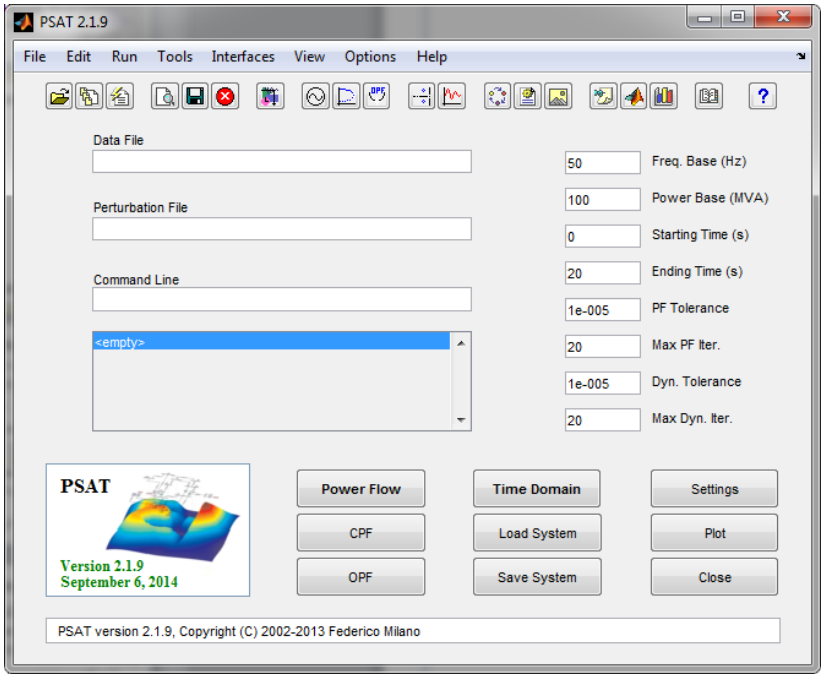




Spuštění aplikace PSAT:

Spuštění grafického prostředí:

>>psat



Spuštění v příkazové řádce například:

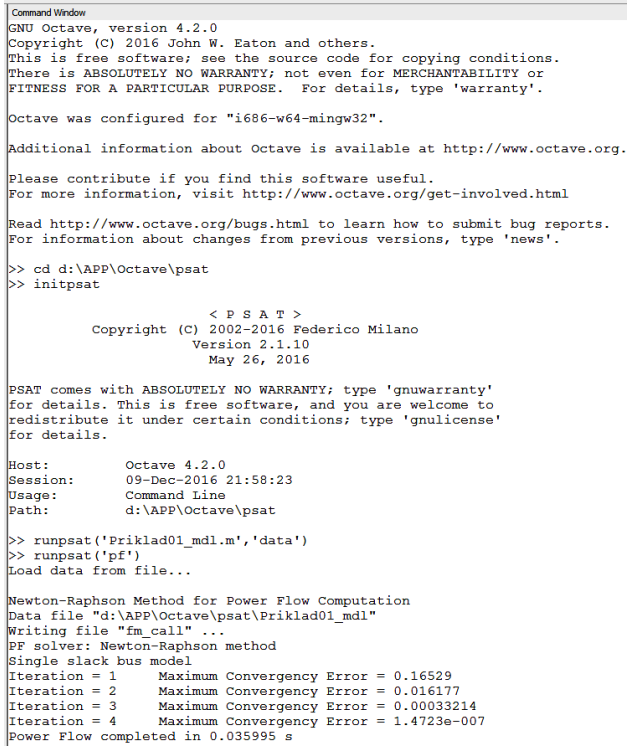
>>initpsat

>>runpsat('Priklad_mdl.m','data')

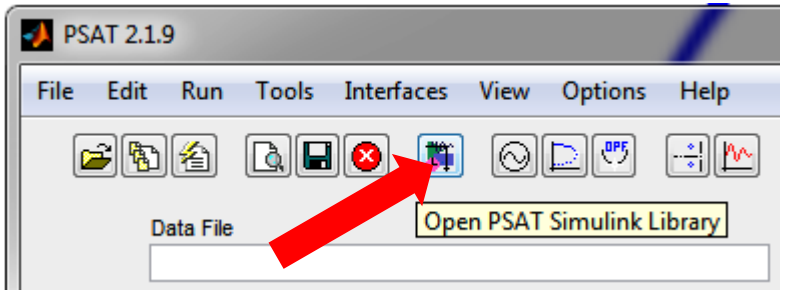
>>runpsat('pf')

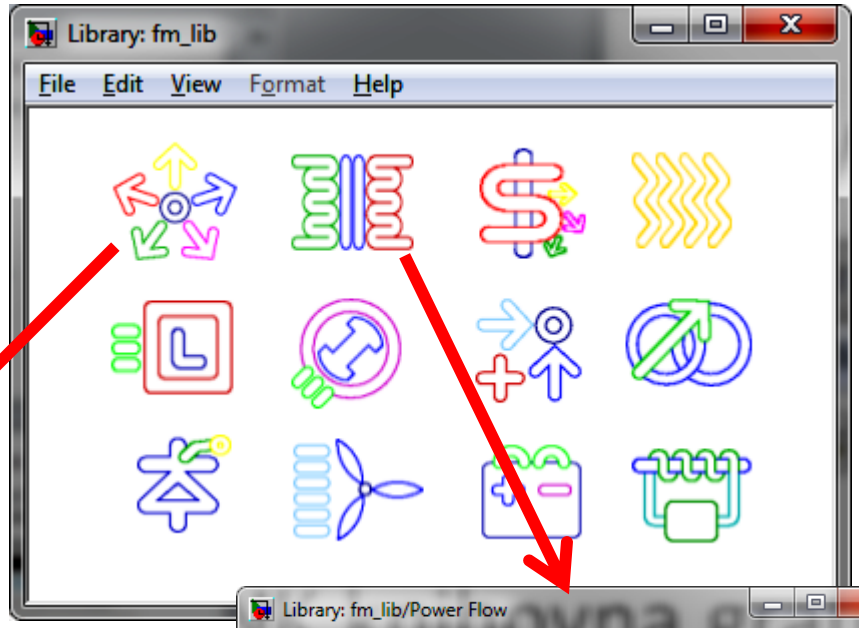
>>runpsat('pfrep')

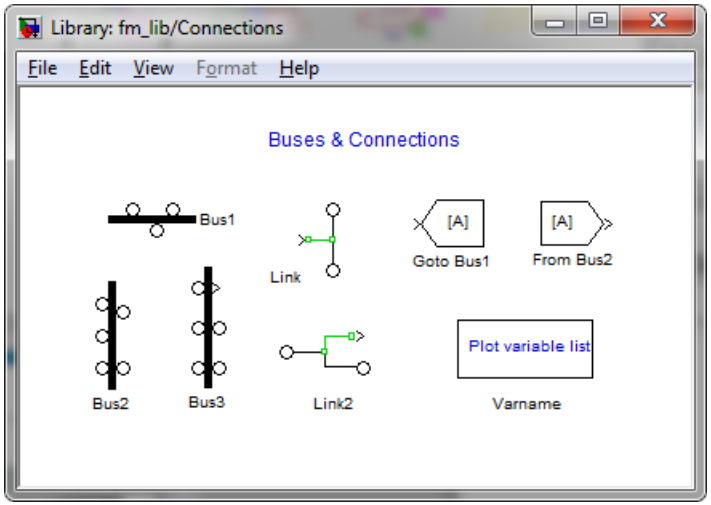
>>runpsat('pfrep');

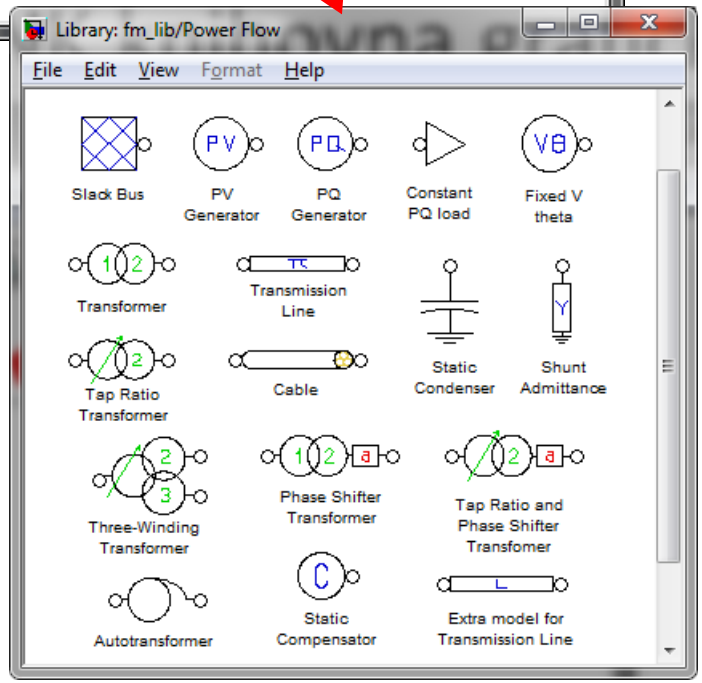


SIMULINK knihovna grafických prvků topologie:

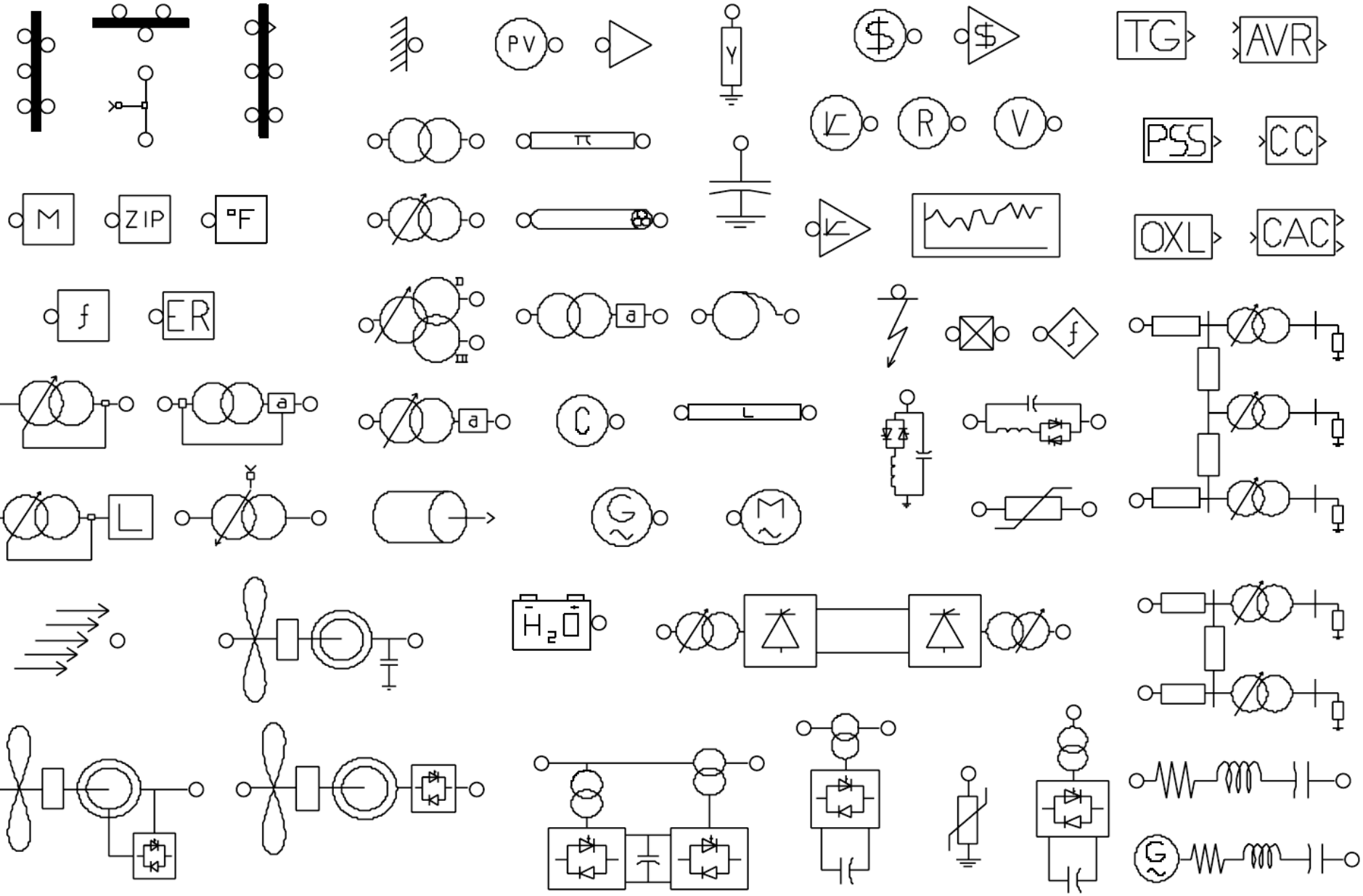




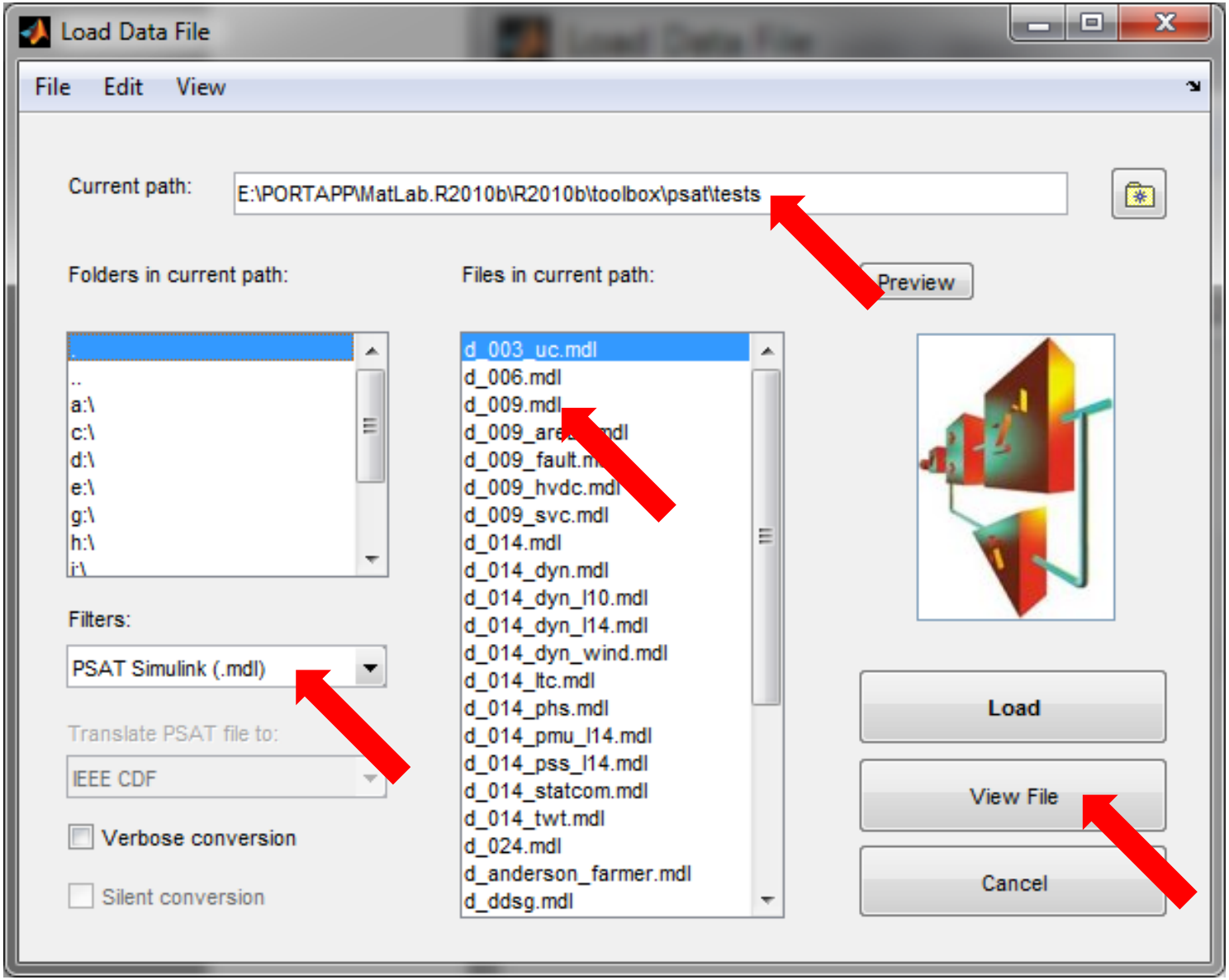




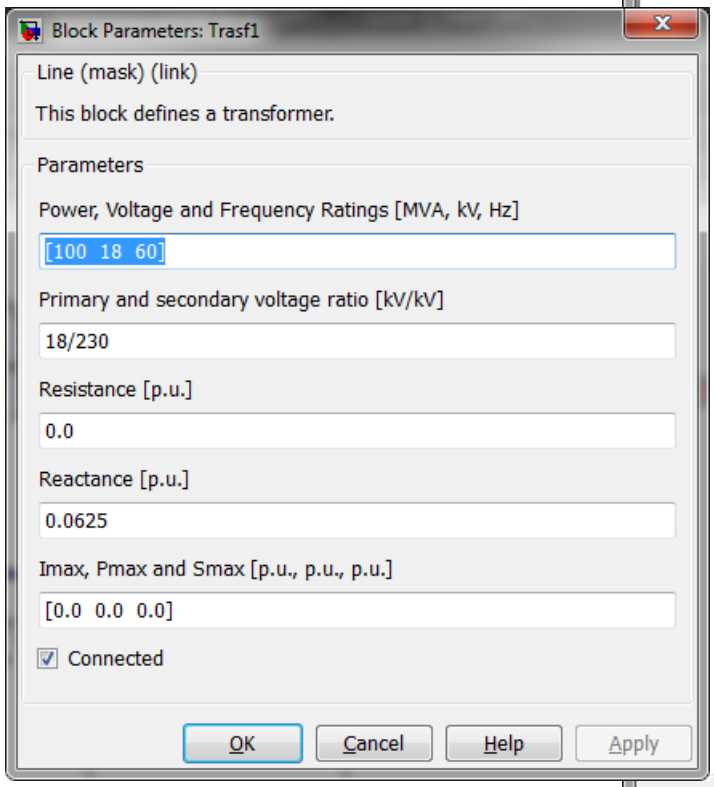
SIMULINK knihovna grafických prvků topologie:

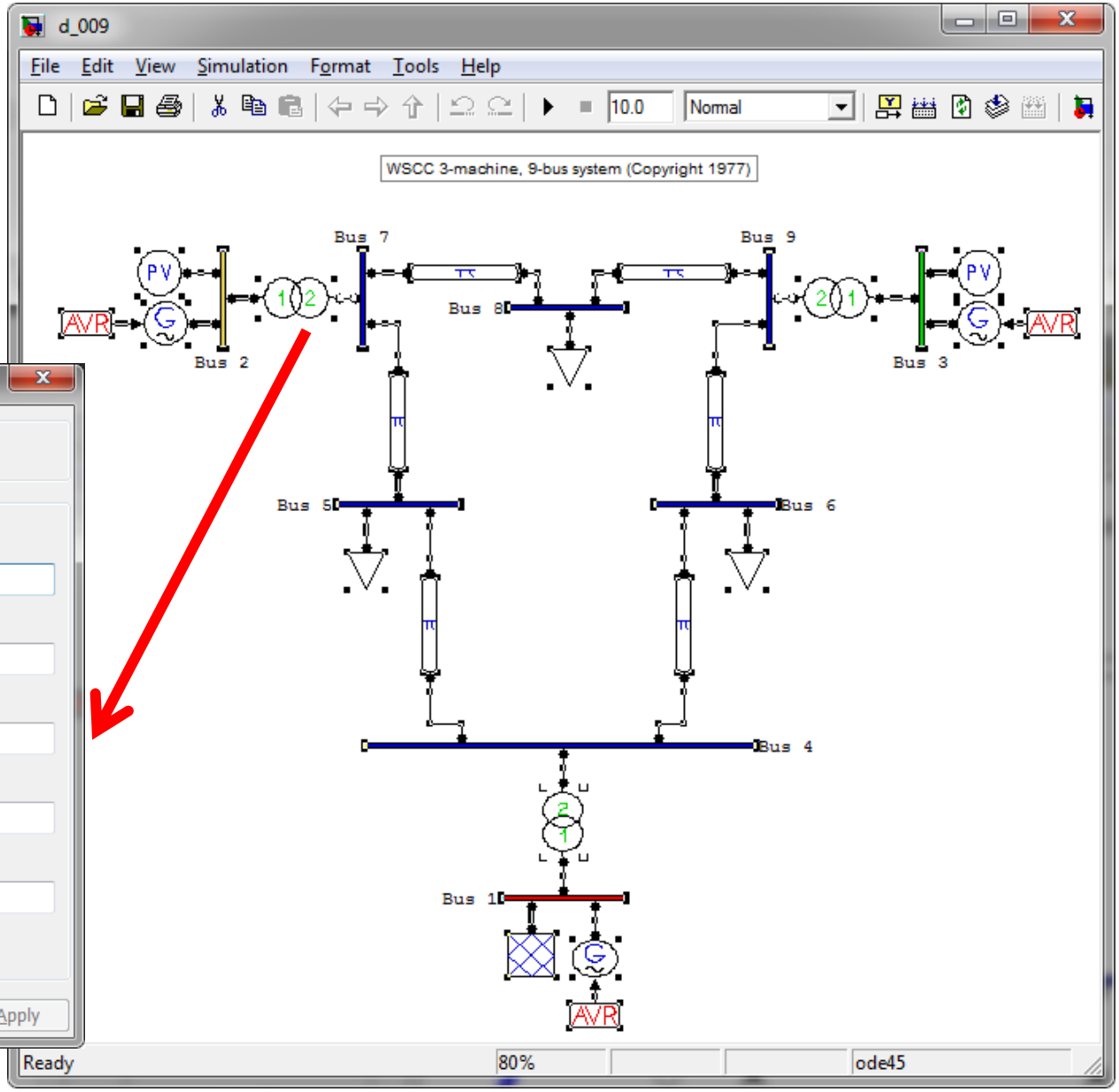


SIMULINK knihovna grafických prvků topologie:



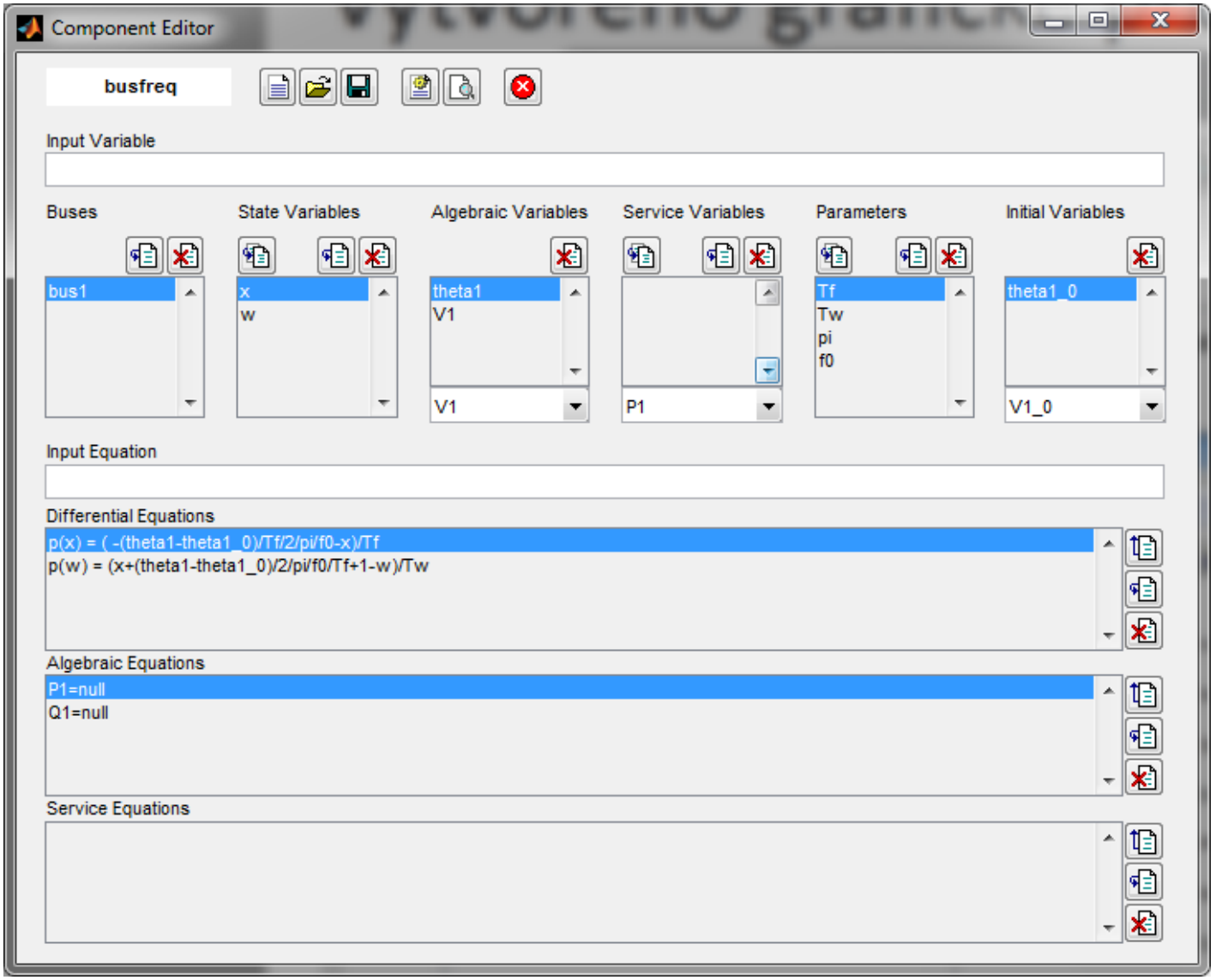
SIMULINK knihovna grafických prvků topologie:





SIMULINK knihovna grafických prvků topologie:

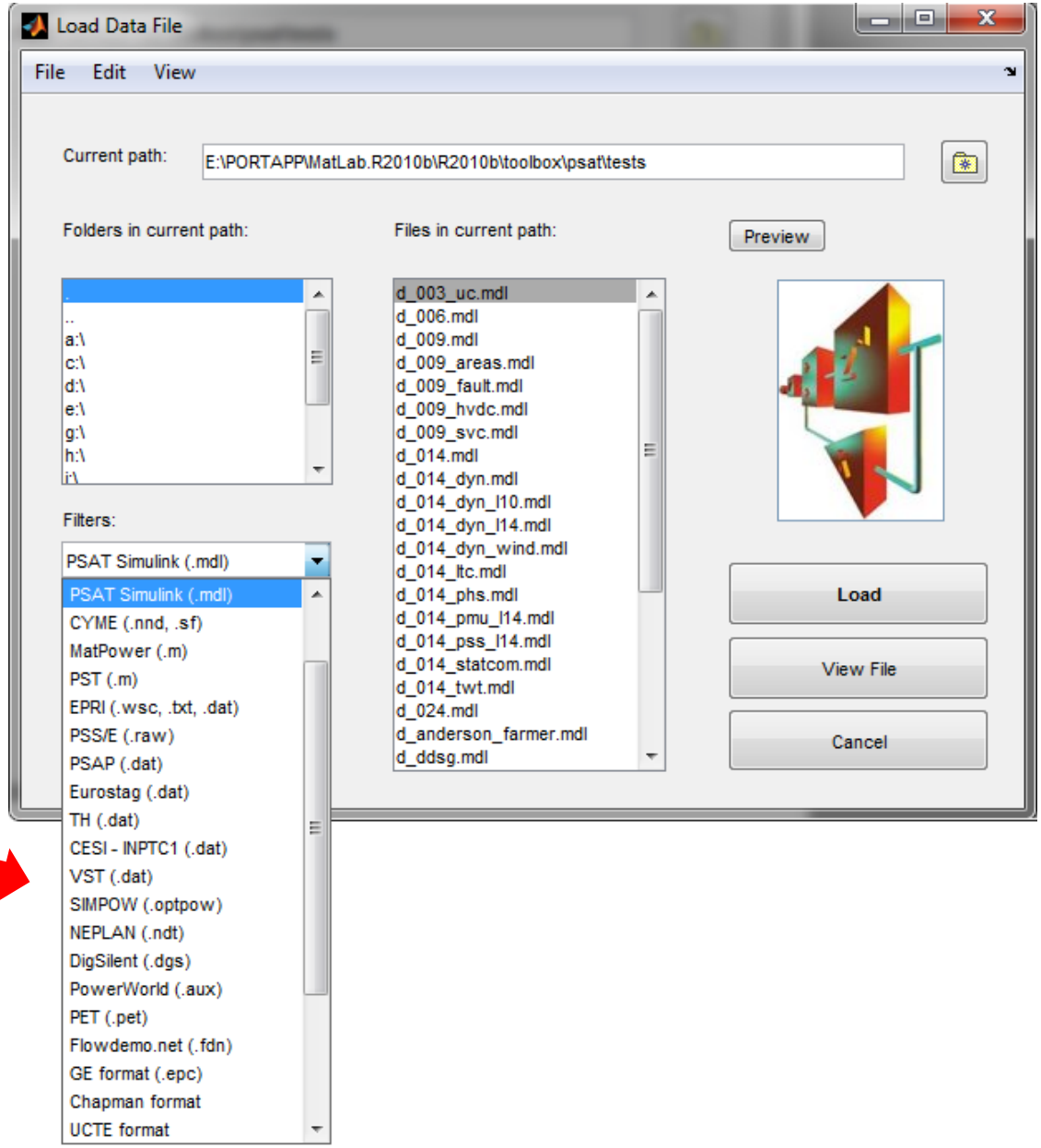
Pro definování uživatelských komponent je vytvořeno interaktivní prostředí:



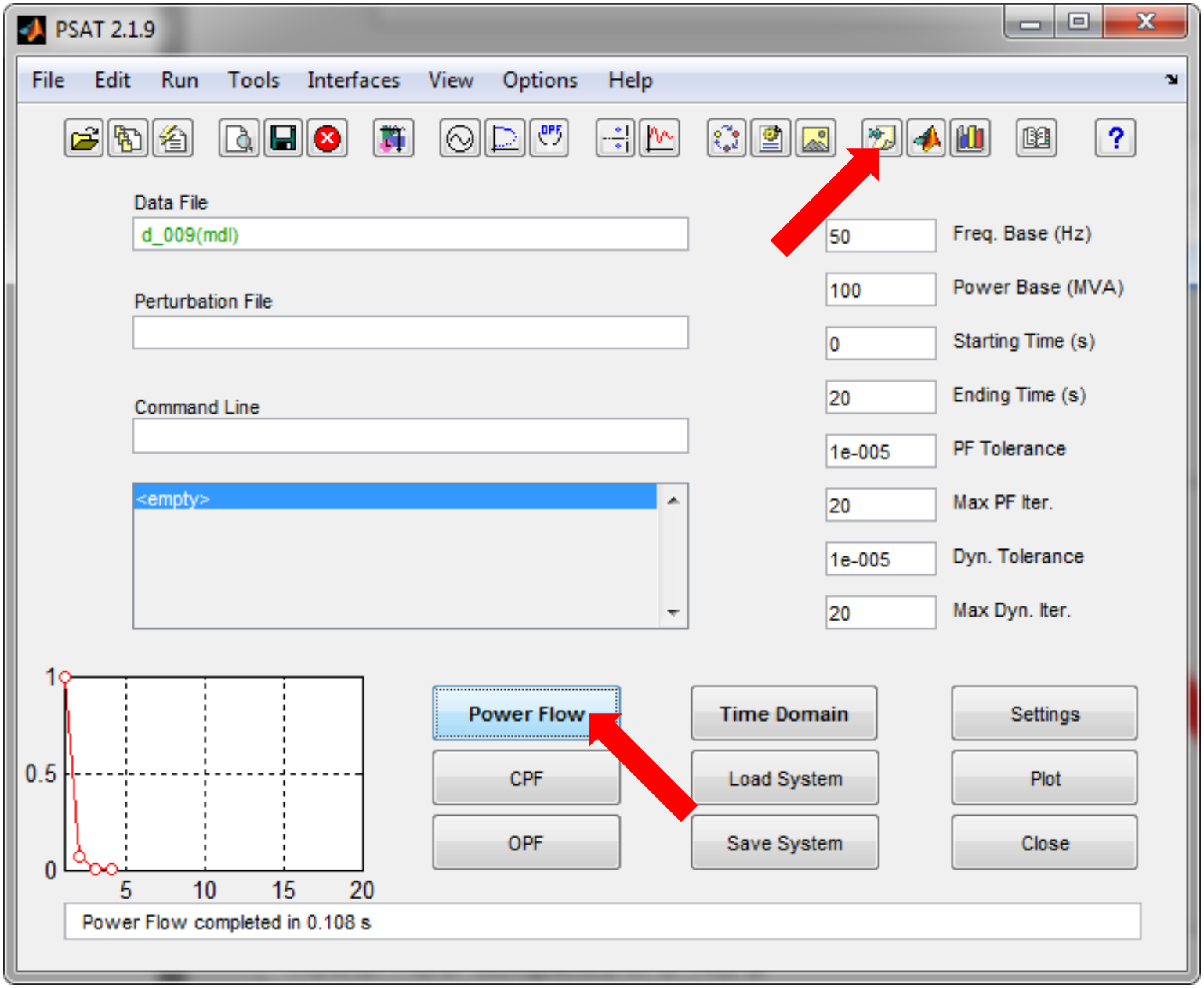
SIMULINK knihovna grafických prvků topologie:

Načtení vstupních dat:

Existují standardní data PSAT i možnost importu z mnoha formátů.



Řešení chodu sítě – Power Flow - PF:



Řešení chodu sítě – Power Flow - PF:

Static Report

File View Preferences

Bus	Vm [p.u.]	Va [rad]	P [I] [p.u.]	Q [I] [p.u.]
[1]-Bus 1	1.04	0	0.71641	0.27046
[2]-Bus 2	1.025	0.16197	1.63	0.06654
[3]-Bus 3	1.025	0.08142	0.85	-0.1086
[4]-Bus 4	1.0258	-0.03869	0	0
[5]-Bus 5	0.99563	-0.06962	-1.25	-0.5
[6]-Bus 6	1.0127	-0.06436	-0.9	-0.3
[7]-Bus 7	1.0258	0.06492	0	0
[8]-Bus 8	1.0159	0.0127	-1	-0.35
[9]-Bus 9	1.0324	0.03433	0	0

State Variables

delta_Syn_1	0.06258
omega_Syn_1	1
e1q_Syn_1	1.0564
e1d_Syn_1	0
delta_Syn_2	1.0664
omega_Syn_2	1
e1q_Syn_2	0.78817
e1d_Syn_2	0.6222
delta_Syn_3	0.94486
omega_Syn_3	1
e1q_Syn_3	0.76786

Other Variables

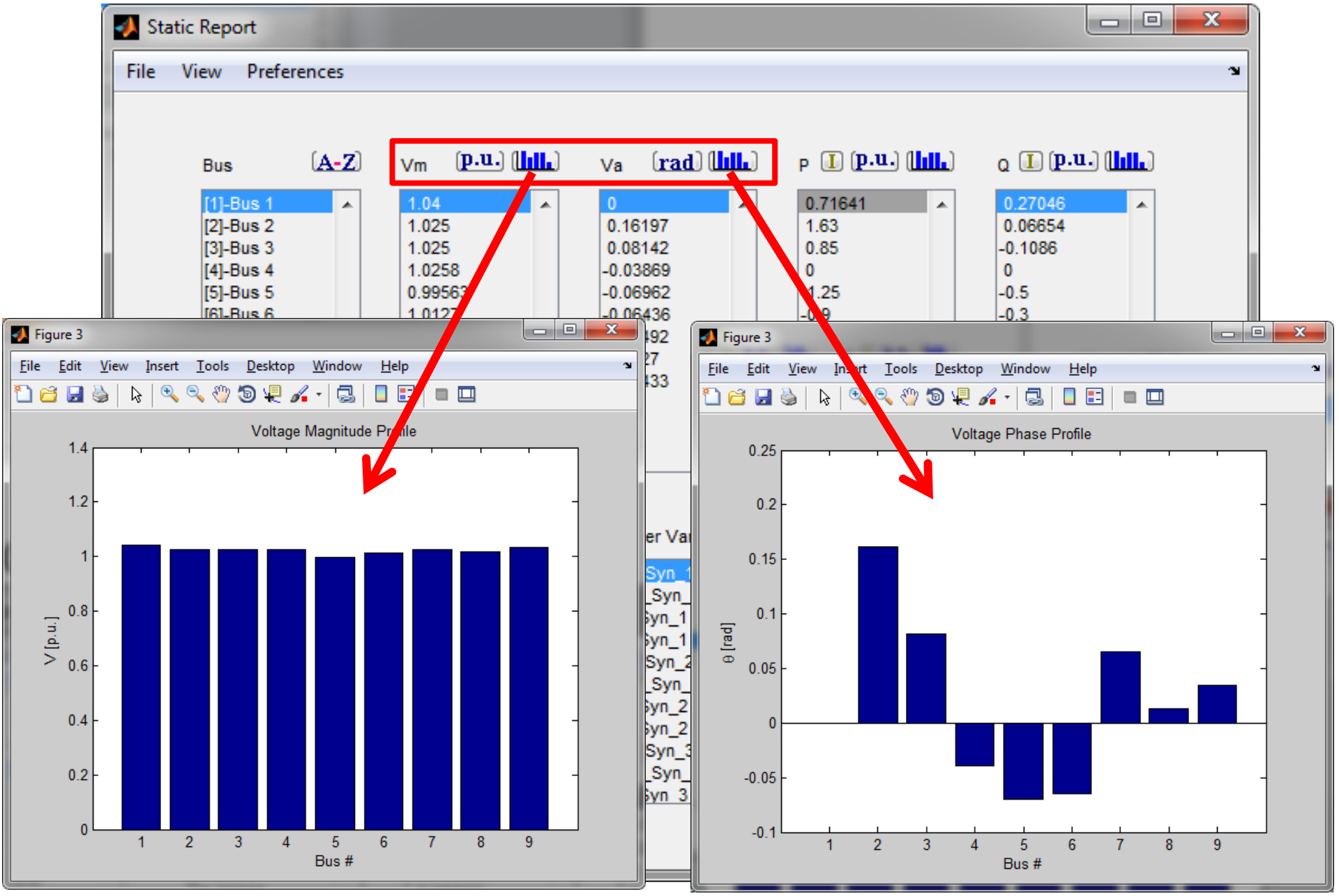
vf_Syn_1 = 1.0821
pm_Syn_1 = 0.71641
p_Syn_1 = 0.71641
q_Syn_1 = 0.27046
vf_Syn_2 = 1.7893
pm_Syn_2 = 1.63
p_Syn_2 = 1.63
q_Syn_2 =0.066537
vf_Syn_3 = 1.403
pm_Syn_3 = 0.85
p_Syn_3 = 0.85

Report Close

Check limit violations

Use absolute values

Řešení chodu sítě – Power Flow - PF:

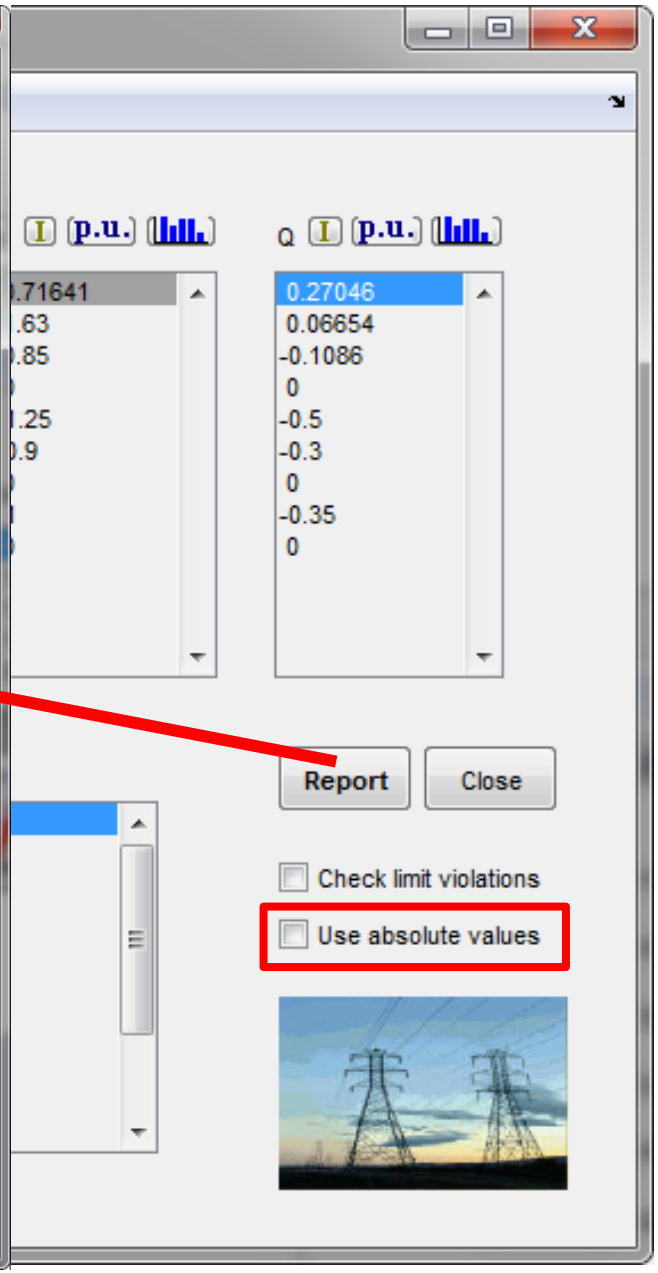


Řešení chodu sítě – Power Flow - PF:

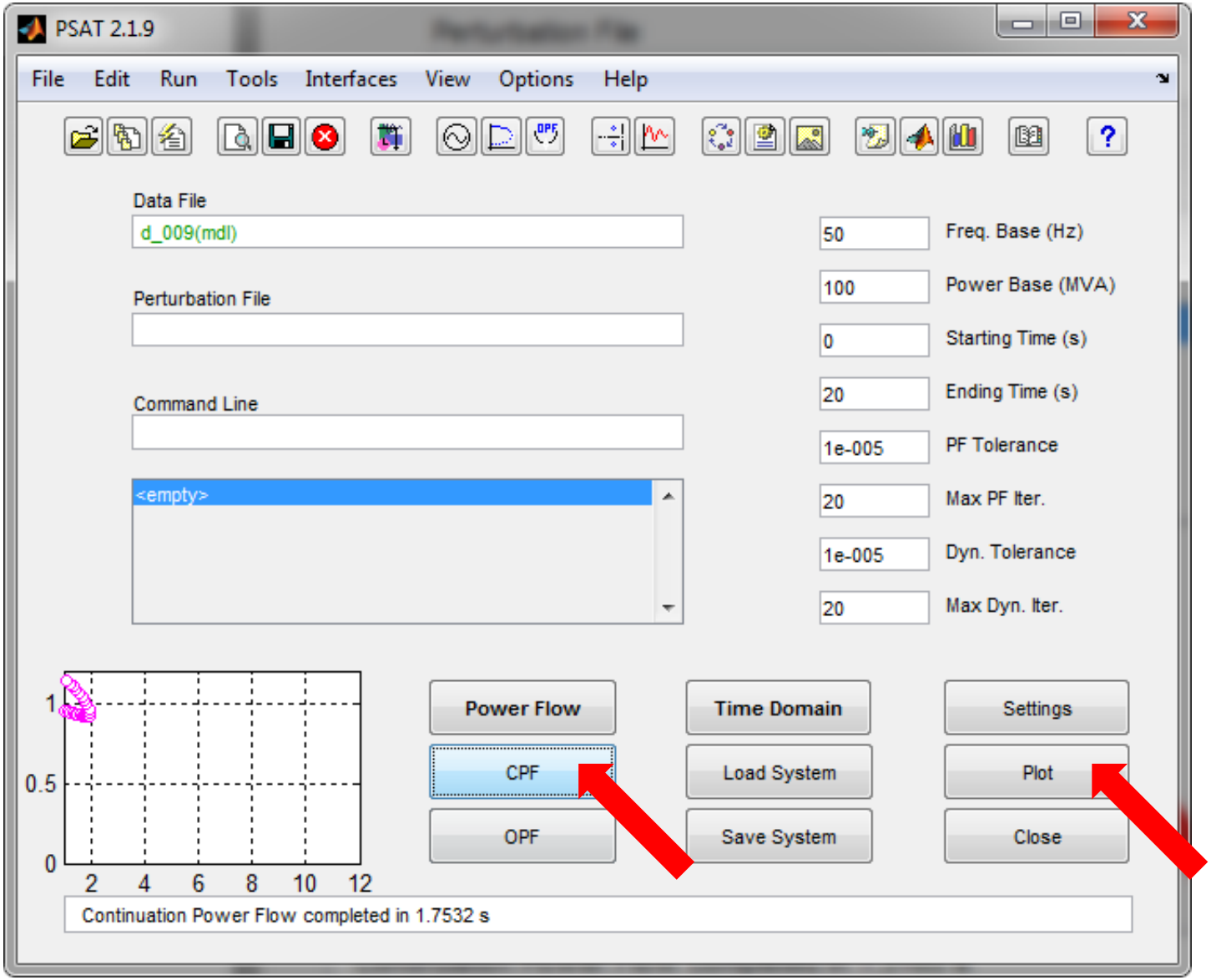
Lister - [e:\PORTAPP\MatLab.R2010b\R2010b\toolbox\psat\tests\d_009_01.txt]

File Edit Options Encoding Help 30 %

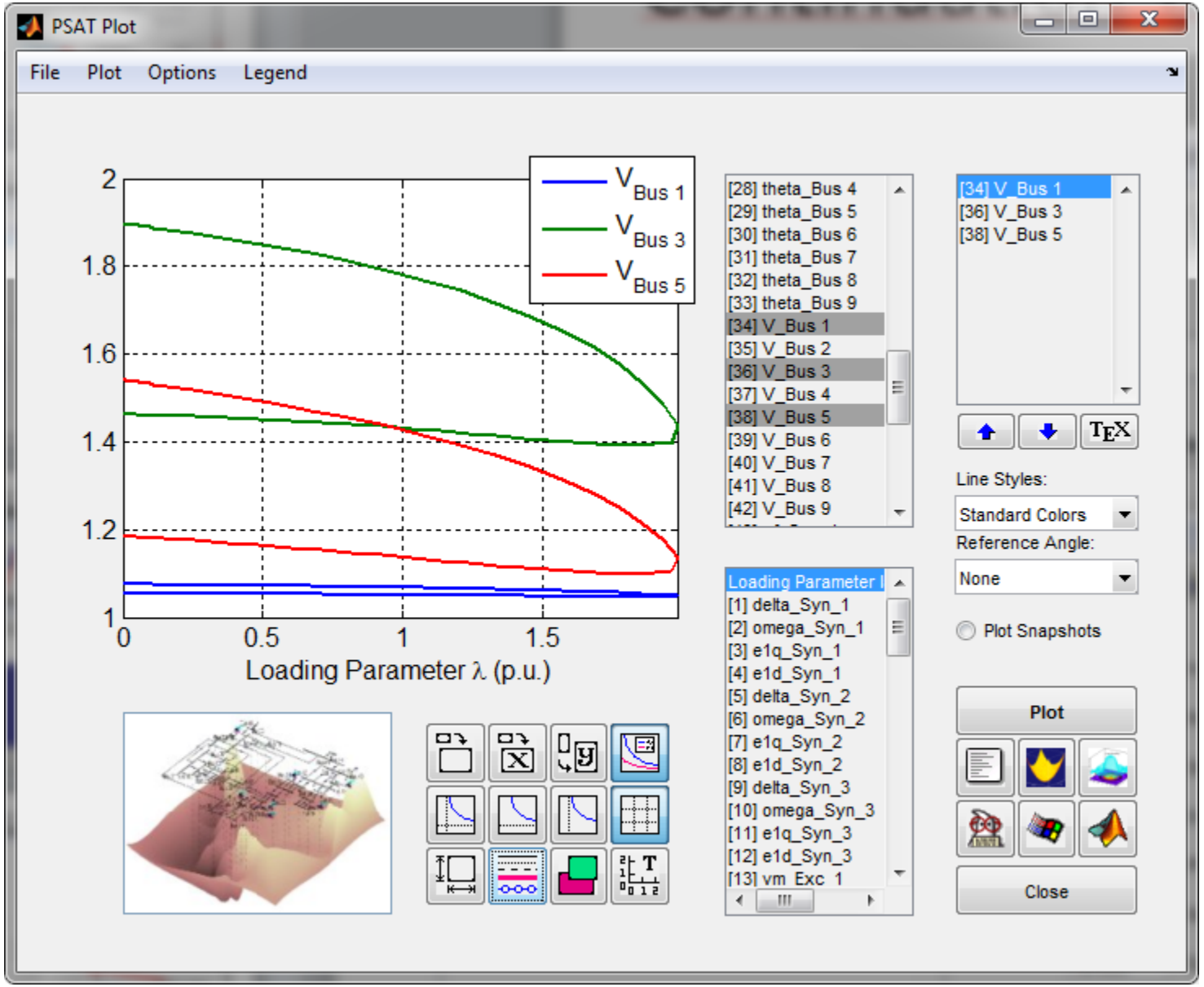
```
NETWORK STATISTICS

Buses:                          9
Lines:                          6
Transformers:                   3
Generators:                     3
Loads:                          3

SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations:           4
Maximum P mismatch [p.u.]       0
Maximum Q mismatch [p.u.]       0
Power rate [MVA]                100

POWER FLOW RESULTS

Bus          V            phase          P gen          Q gen
             [p.u.]       [rad]          [p.u.]         [p.u.]

Bus 1        1.04         0              0.71641        0.27046
Bus 2        1.025        0.16197        1.63           0.06654
Bus 3        1.025        0.08142        0.85          -0.1086
Bus 4        1.0258      -0.03869        0              0
Bus 5        0.99563     -0.06962        0              0
Bus 6        1.0127      -0.06436        0              0
Bus 7        1.0258       0.06492        0              0
Bus 8        1.0159       0.0127         0              0
Bus 9        1.0324       0.03433        0              0
```



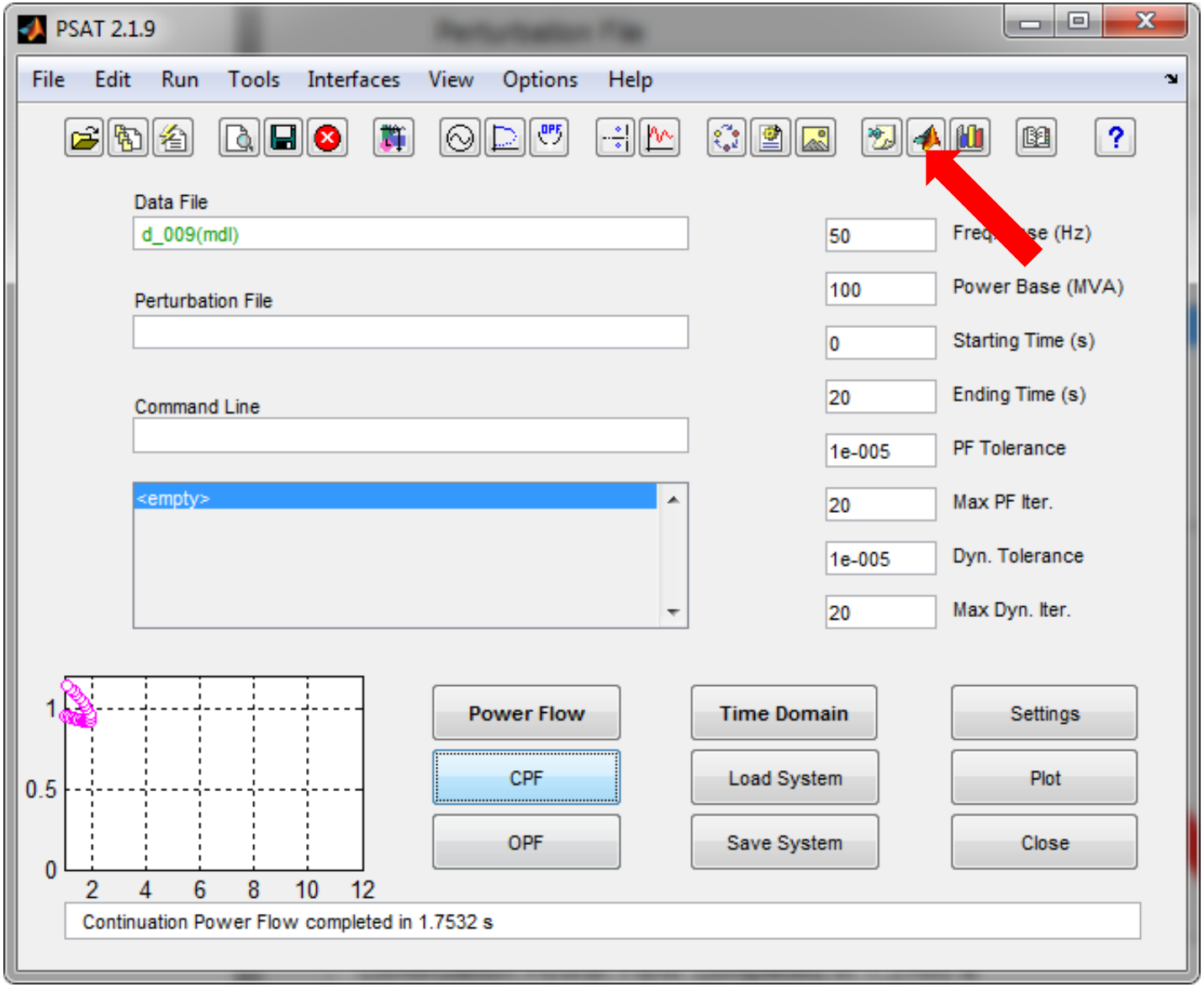
Řešení napěťové stability sítě – Continuation Power Flow Analysis - CPF:



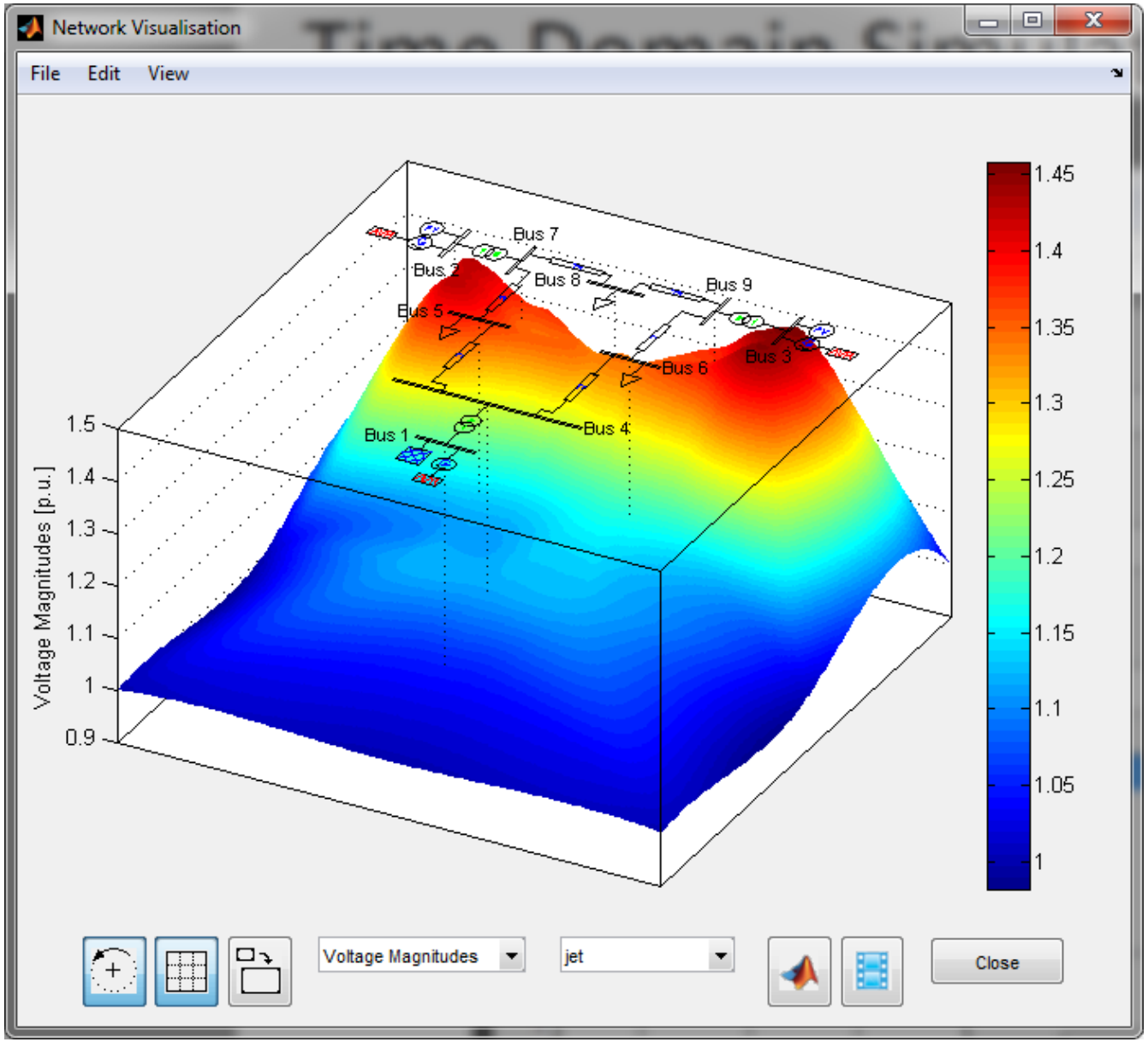
Řešení napěťové stability sítě – Continuation Power Flow Analysis - CPF:



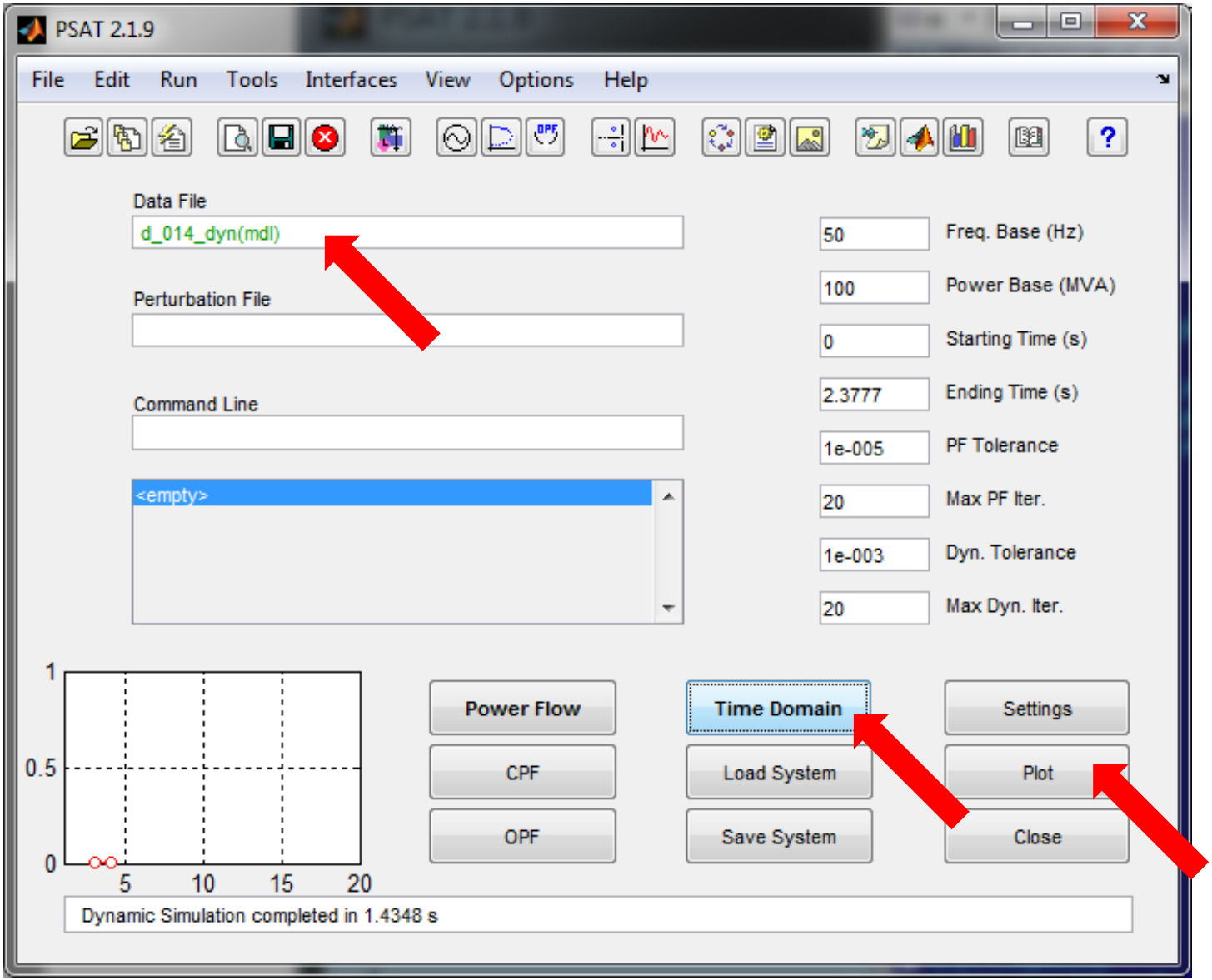
Řešení napěťové stability sítě – Continuation Power Flow Analysis - CPF:



Řešení napěťové stability sítě – Continuation Power Flow Analysis - CPF:

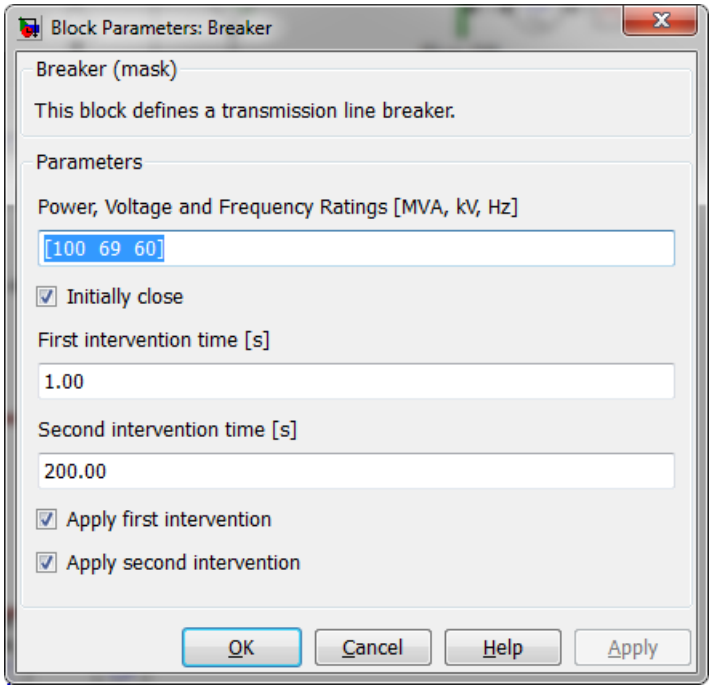


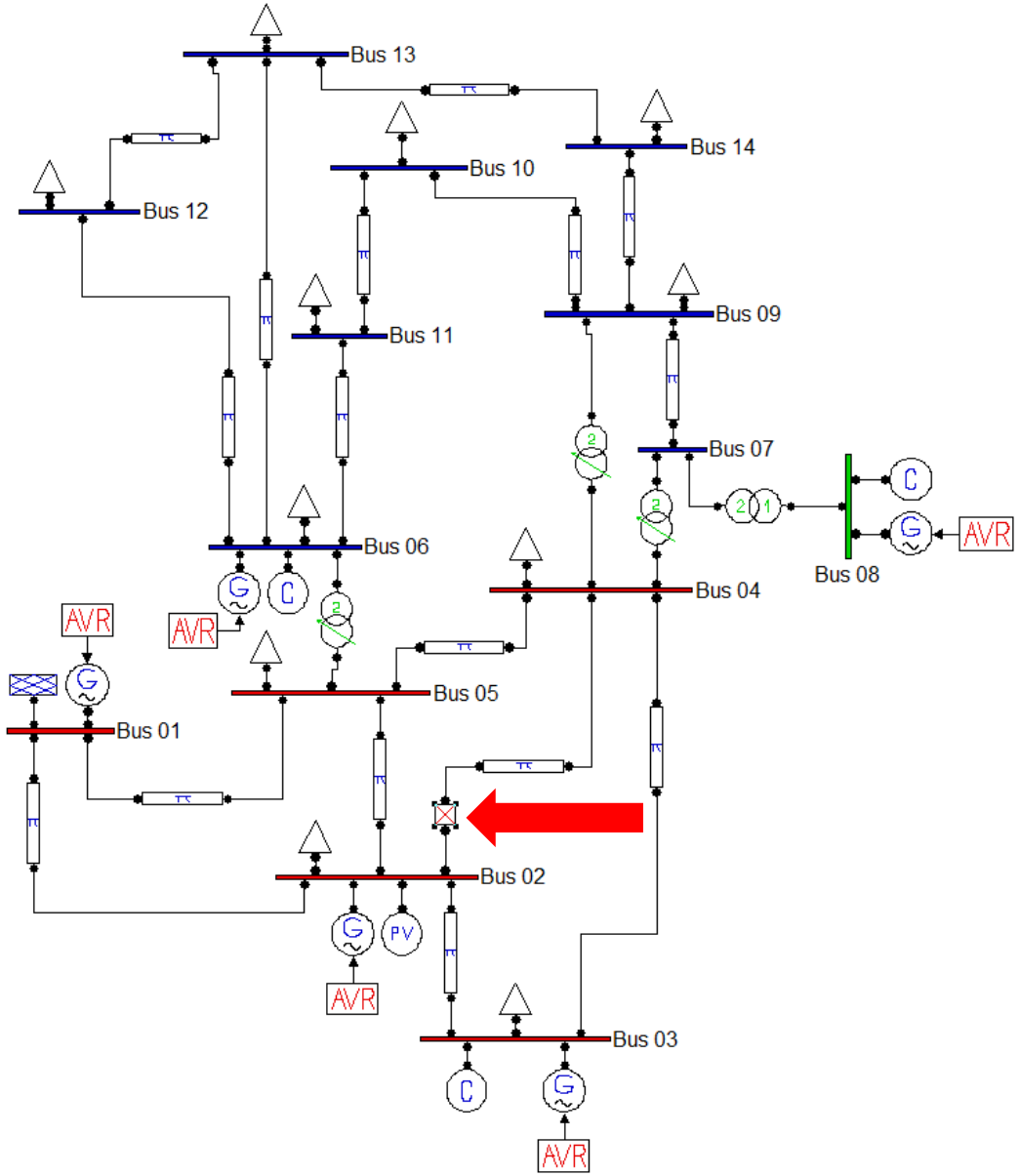
Řešení přechodného děje – Time Domain Simulation - TD:



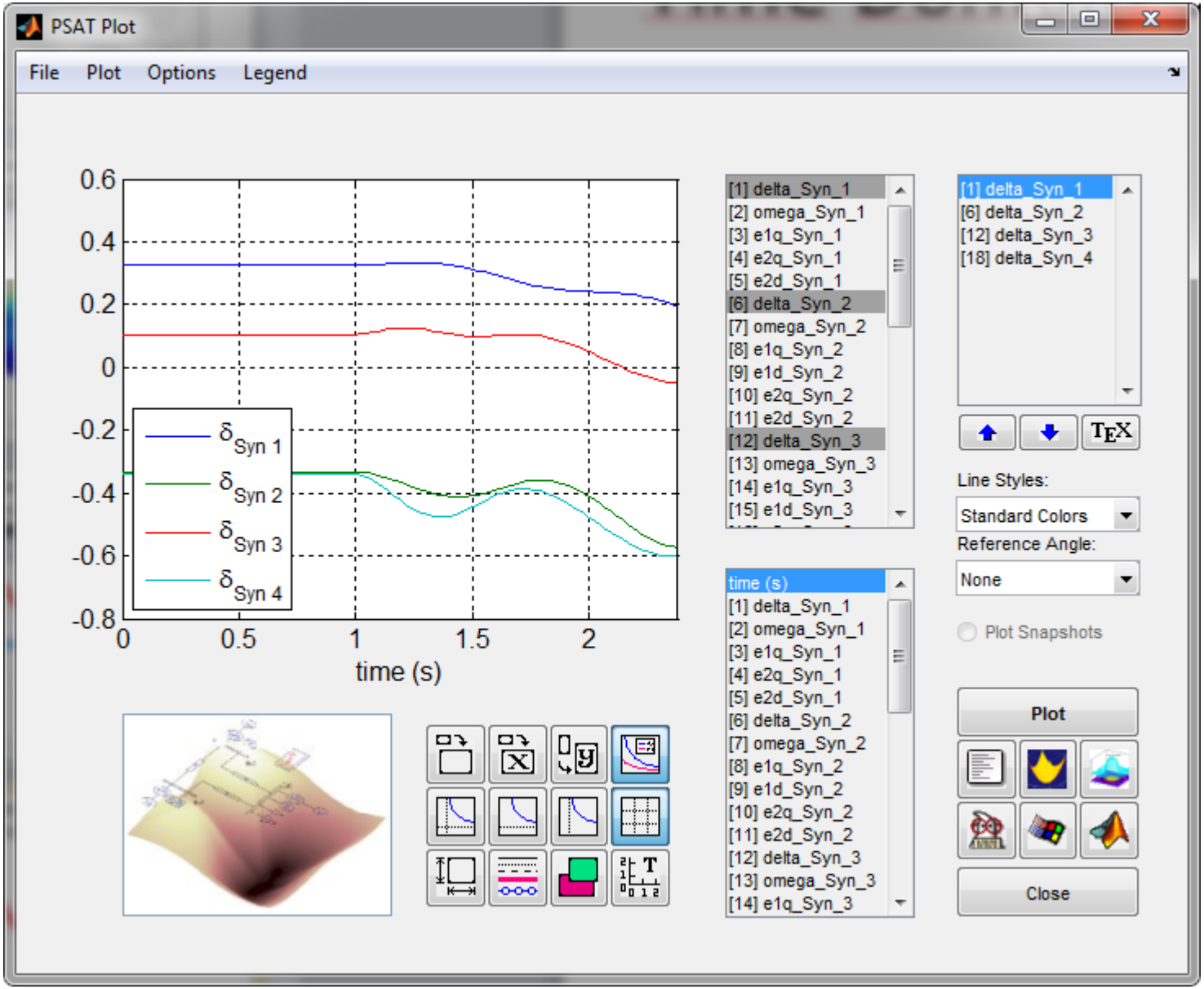
Řešení přechodného děje – Time Domain Simulation - TD:

Definice časově proměnného inicializačního prvku:

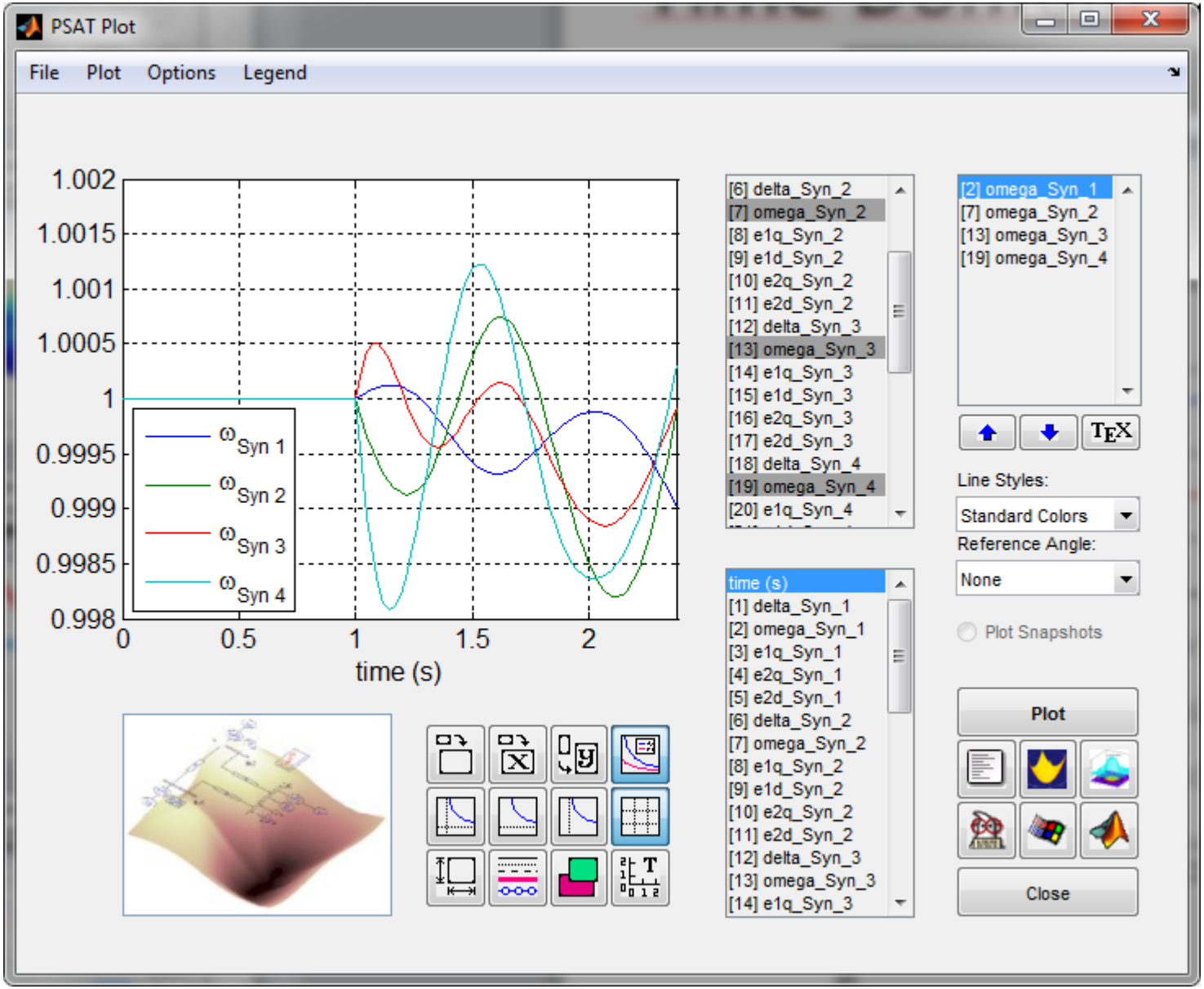




Řešení přechodného děje – Time Domain Simulation - TD:

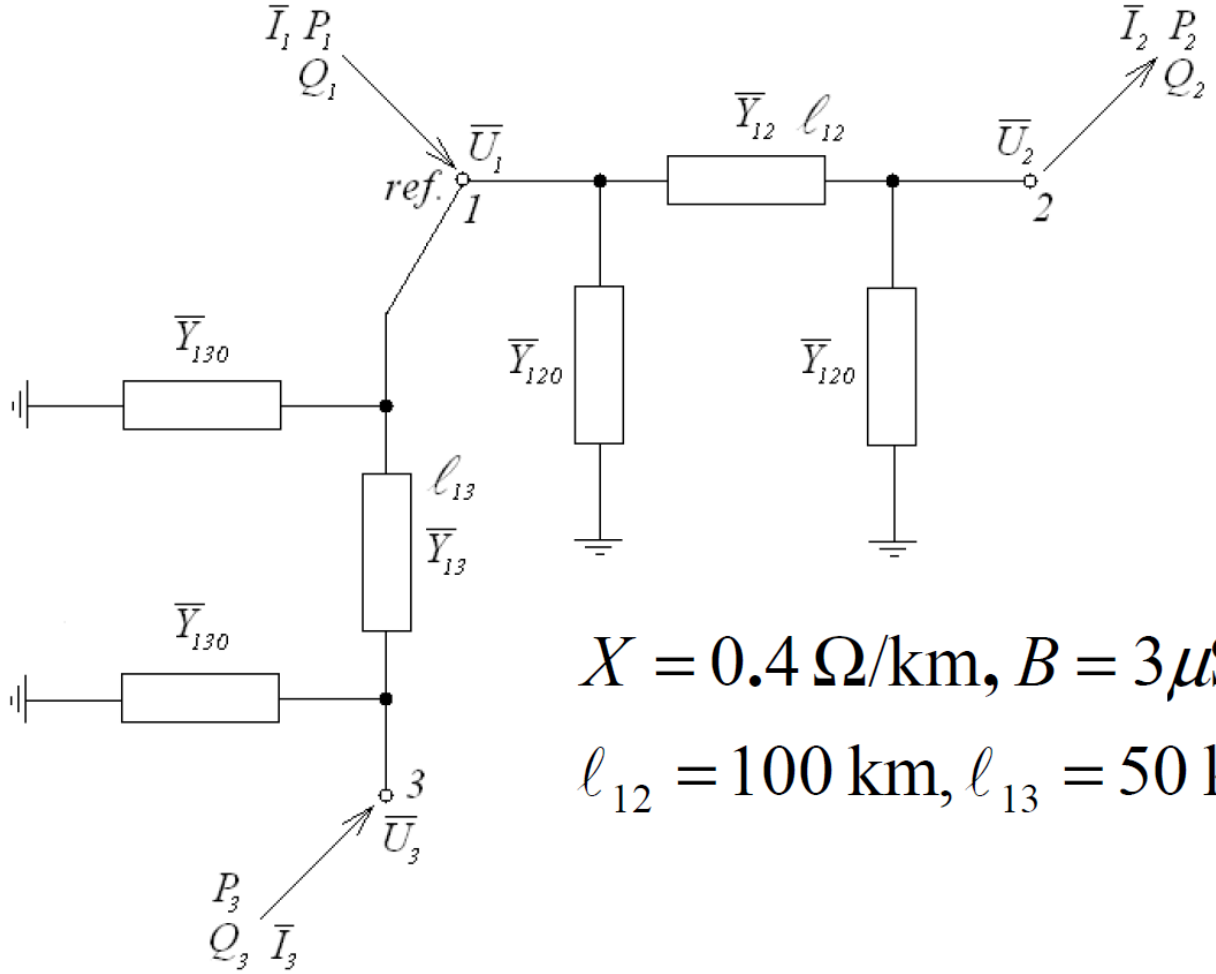


Řešení přechodného děje – Time Domain Simulation - TD:



Řešený příklad z předmětu TPR:

Řešte chod 3-uzlové soustavy



$$\overline{U}_1 = 110000 \cdot e^{j0^\circ}\ \mathrm{V}$$
$$P_2 = 50\ \mathrm{MW}$$
$$Q_2 = 10\ \mathrm{MVAr}$$
$$P_3 = 100\ \mathrm{MW}$$
$$Q_3 = 10\ \mathrm{MVAr}$$

$$X = 0.4\ \Omega/\mathrm{km},\ B = 3\mu\mathrm{S/km}$$
$$\ell_{12} = 100\ \mathrm{km},\ \ell_{13} = 50\ \mathrm{km}$$

$$U_2, \theta_2, U_3, \theta_3 = ?$$

Řešený příklad z předmětu TPR:

Iterační algoritmus:

$$\overline{U}_2^{(p)} = \frac{1}{\overline{A}_{22}}\left[\frac{P_2 - jQ_2}{\overline{U}_2^{*(p-1)}} - \overline{A}_{21}\overline{U}_1 - \sum_{3}^{3}\overline{A}_{ik}\overline{U}_k^{(p-1)}\right] = \frac{1}{\overline{A}_{22}}\left[\frac{P_2 - jQ_2}{\overline{U}_2^{*(p-1)}} - \overline{A}_{21}\overline{U}_1 - \overline{A}_{23}\overline{U}_3^{(p-1)}\right]$$

$$\overline{U}_3^{(p)} = \frac{1}{\overline{A}_{33}}\left[\frac{P_3 - jQ_3}{\overline{U}_3^{*(p-1)}} - \overline{A}_{31}\overline{U}_1 - \sum_{k=2}^{2}\overline{A}_{ik}\overline{U}_k^{(p)}\right] = \frac{1}{\overline{A}_{33}}\left[\frac{P_3 - jQ_3}{\overline{U}_3^{*(p-1)}} - \overline{A}_{31}\overline{U}_1 - \overline{A}_{32}\overline{U}_2^{(p)}\right]$$

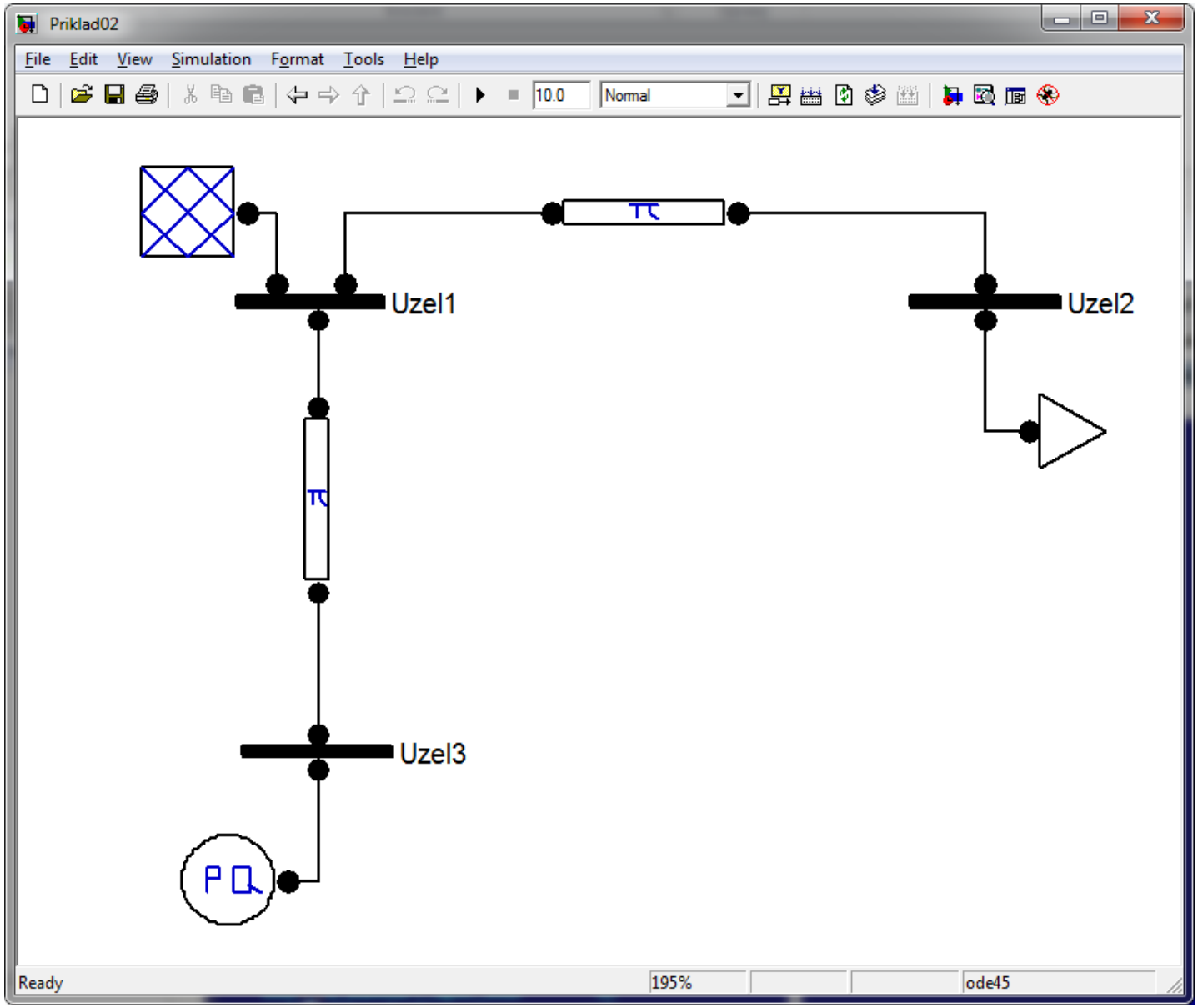
Admitanční matice:

$$\underline{\overline{A}} = j\begin{bmatrix} -0.074775 & 0.025 & 0.05 \\ 0.025 & -0.02485 & 0 \\ 0.05 & 0 & -0.049925 \end{bmatrix}$$

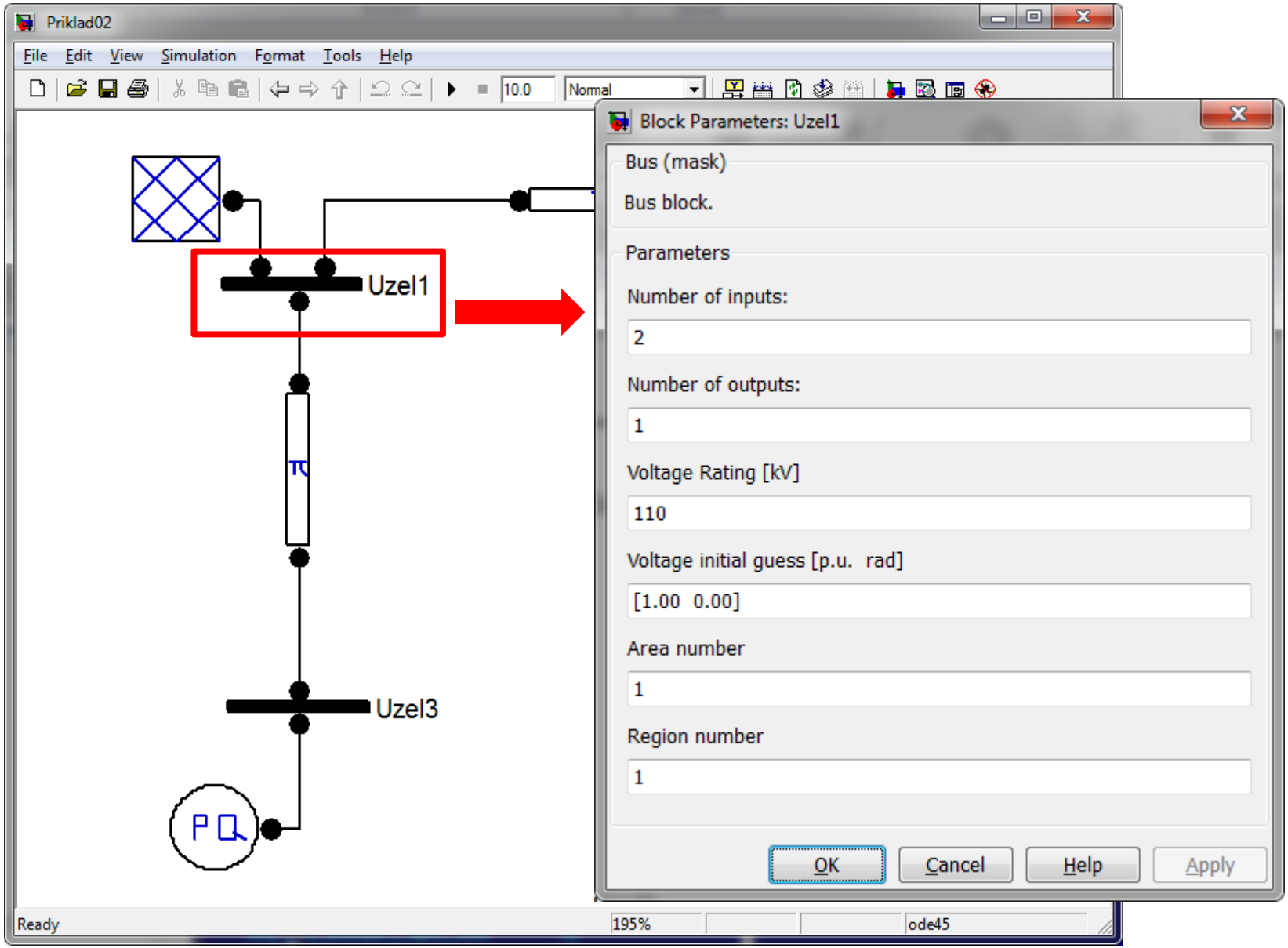
- Počáteční hodnoty:

$$\underline{\overline{x_0}} = \begin{bmatrix} 110000\ e^{j0} \\ 110000\ e^{j0} \\ 110000\ e^{j0} \end{bmatrix} [\mathrm{V}]$$

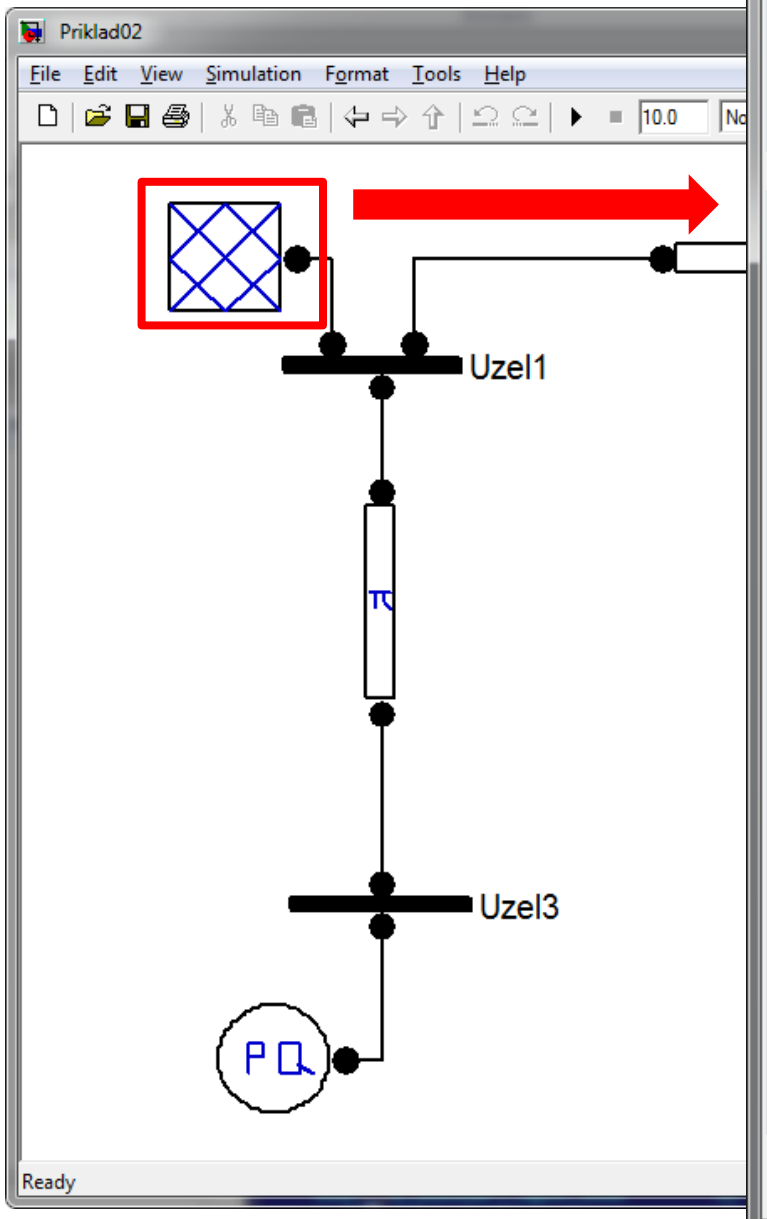
Řešený příklad z předmětu TPR:

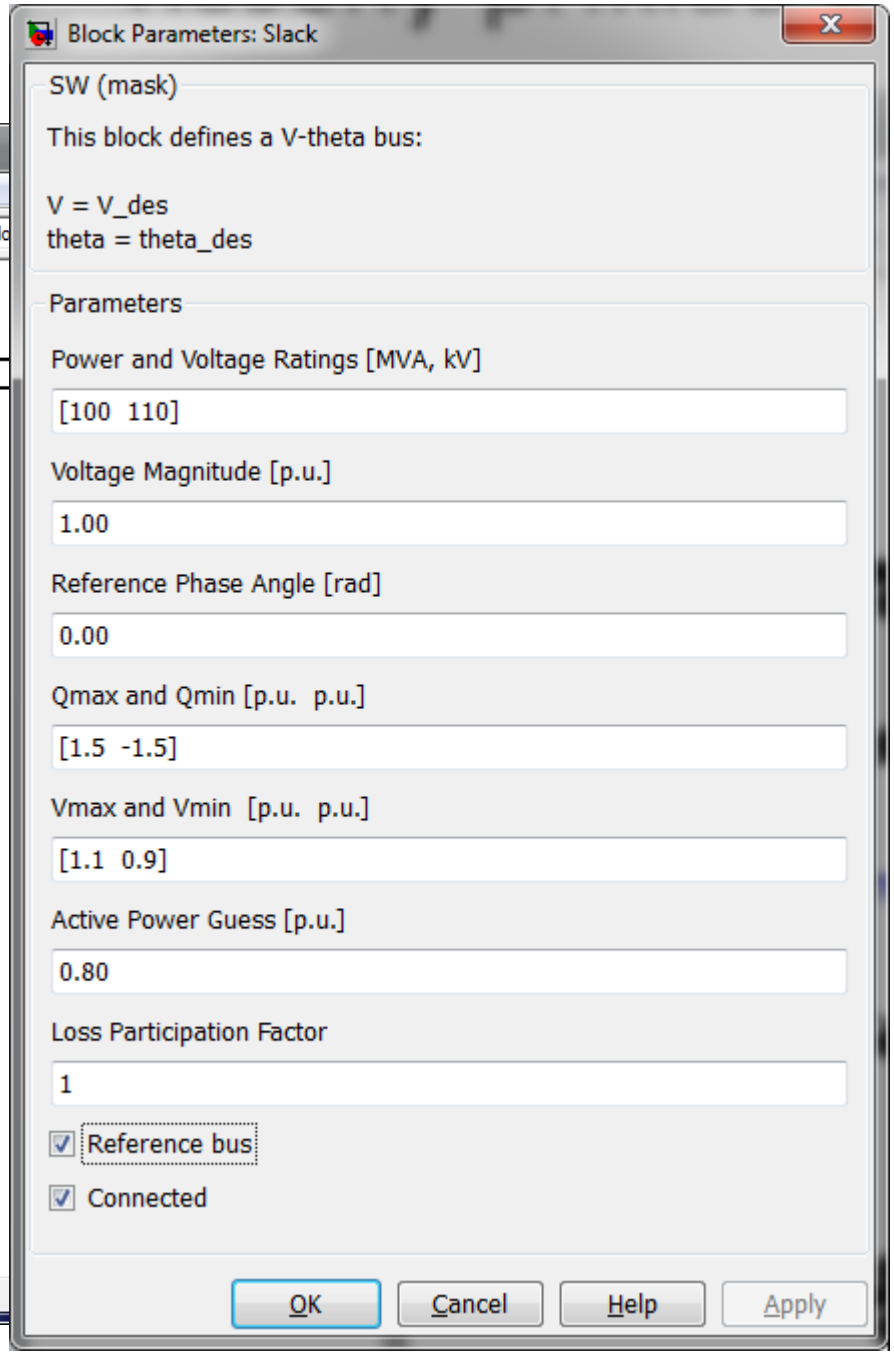


Řešený příklad z předmětu TPR:

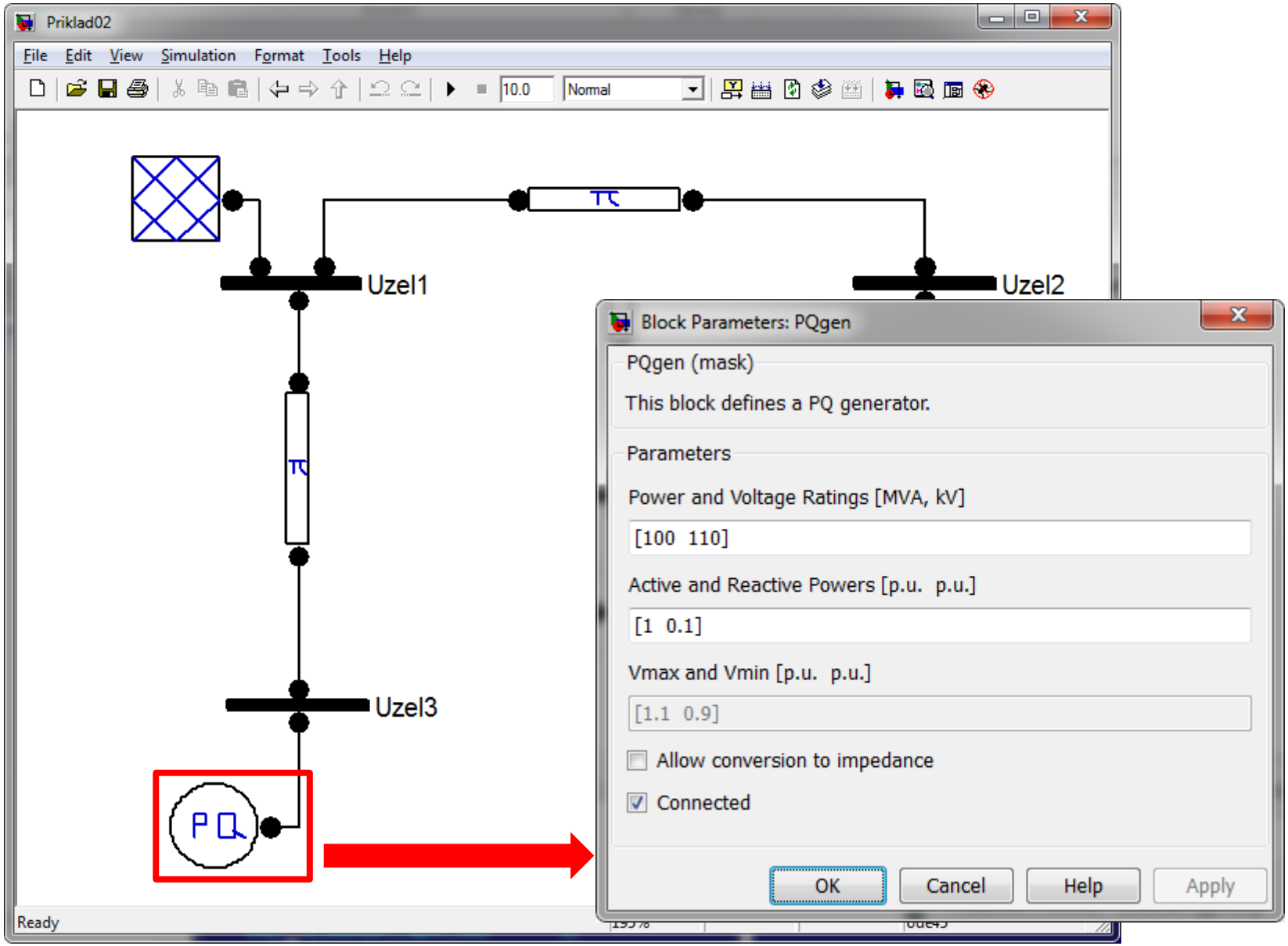


Řešený příklad z předmětu

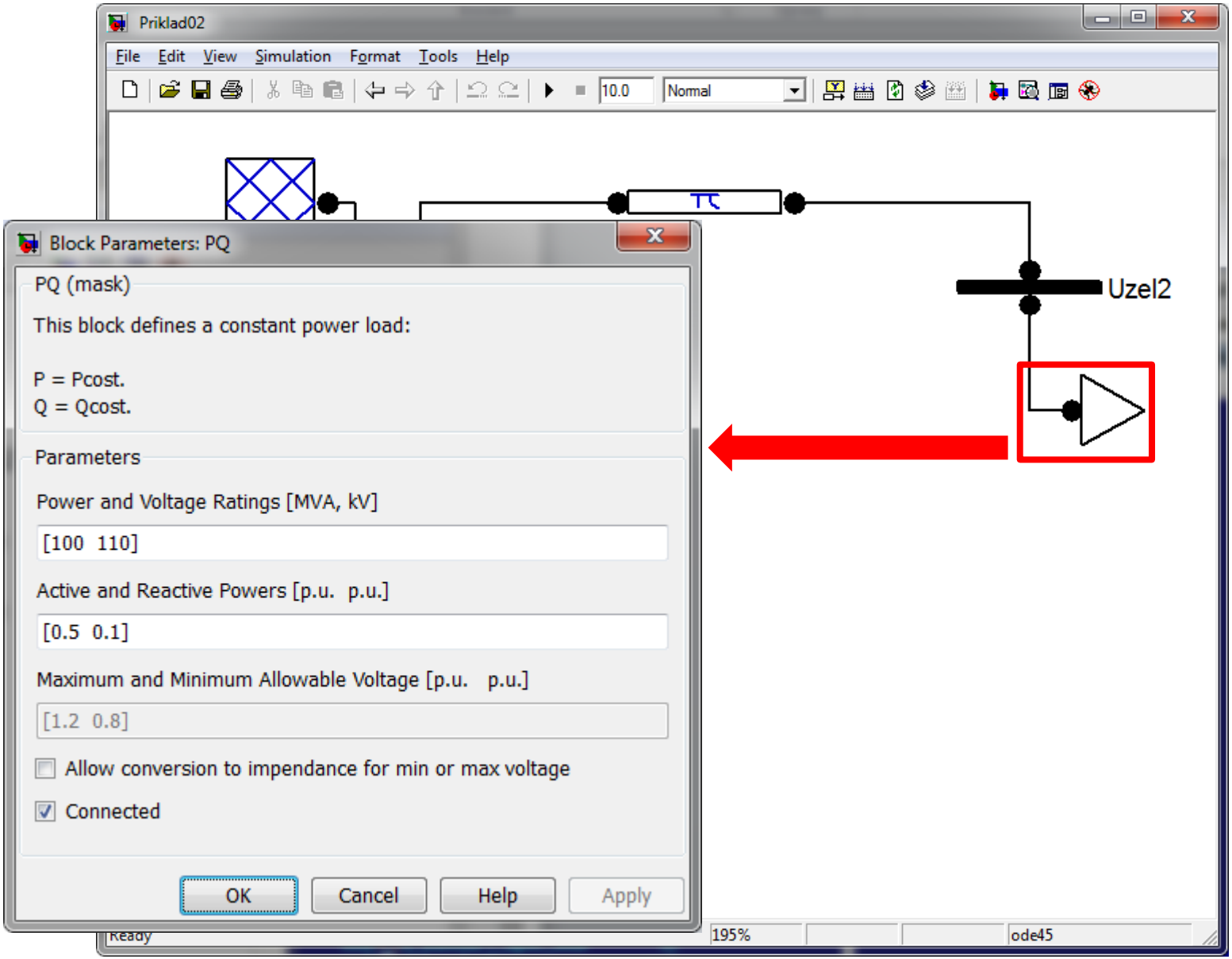




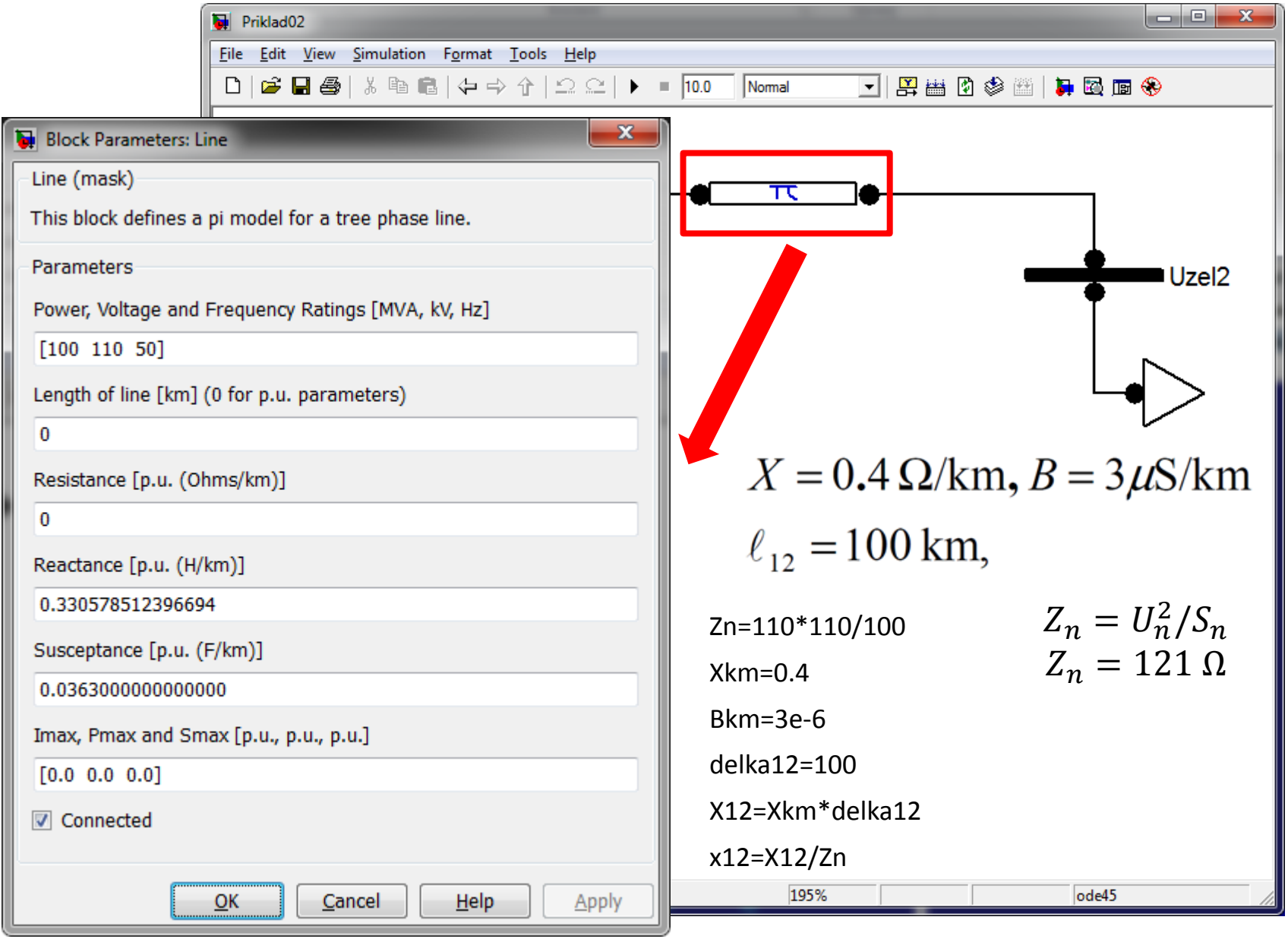
Řešený příklad z předmětu TPR:



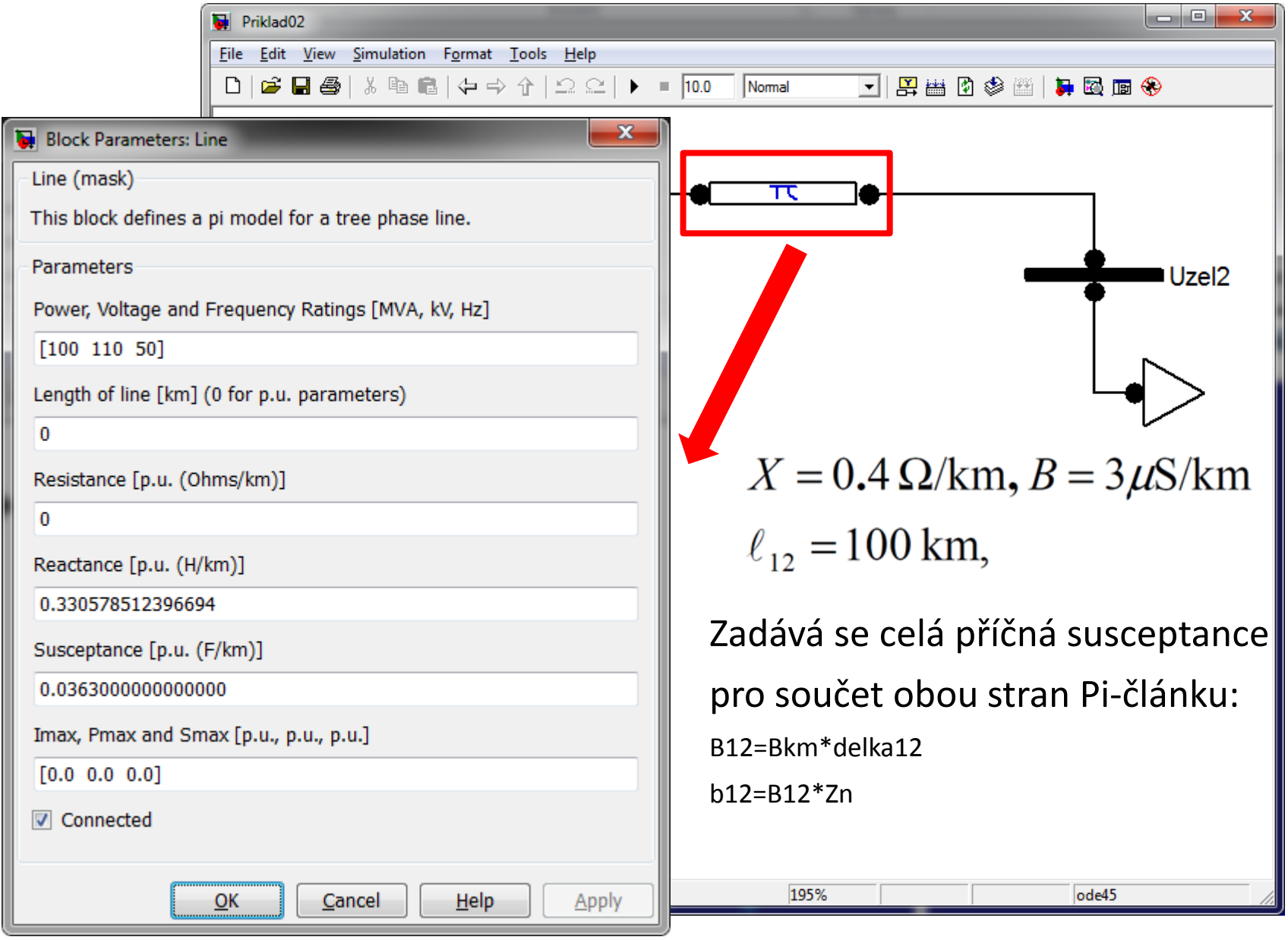
Řešený příklad z předmětu TPR:



Řešený příklad z předmětu TPR:

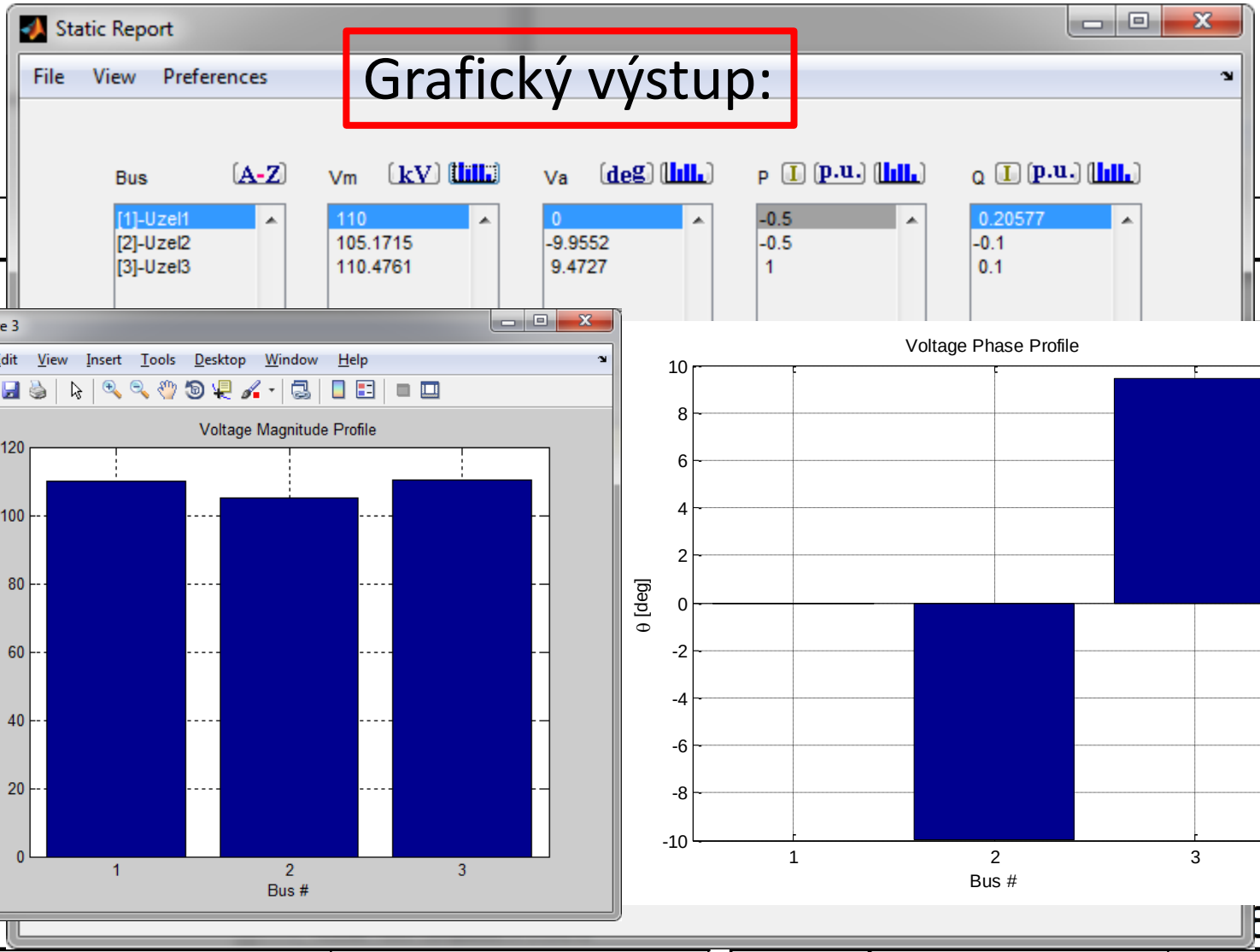


Řešený příklad z předmětu TPR:



Řešený příklad z předmětu TPR:

Grafický výstup:



p					θ_3
0					0
1					1′′
2					51′′
3					71′′
4					02′′
5					93′′
6					90′′
7					55′′
8					54′′
9					56′′
10					8′21,56′′
11	105171,47643	110476,12824	11	-9°57′18,67′′	9°28′21,56′′
12	105171,47629	110476,12820	12	-9°57′18,67′′	9°28′21,56′′

Lister - [C:\WORK\W1\Priklad01_01.txt]

File Edit Options Encoding Help 51 %

Textový výstup:

```
POWER FLOW REPORT

P S A T  2.1.9

Author:  Federico Milano, (c) 2002-2013
e-mail:  federico.milano@ucd.ie
website: faraday1.ucd.ie/psat.html

File:  E:\PORTAPP\MatLab.R2010b\R2010b\toolbox\psat\Priklad01.mdl
Date:  27-Nov-2016 16:13:27


NETWORK STATISTICS

Buses:                          3
Lines:                          2
Generators:                     1
Loads:                          2

SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations:           4
Maximum P mismatch [p.u.]       0
Maximum Q mismatch [p.u.]       0
Power rate [MVA]                100

POWER FLOW RESULTS

Bus          V            phase        P gen        Q gen        P load       Q load
             [p.u.]       [rad]        [p.u.]       [p.u.]       [p.u.]       [p.u.]

Uzel1        1            0           -0.5          0.20577      0            0

Uzel2        0.9561      -0.17375      0            0            0.5          0.1

Uzel3        1.0043       0.16533      1            0.1          0            0
```

12	105171,47629	110476,12820	12	-9°57´18,67´´	9°28´21,56´´

Lister - [C:\WORK\W1\Priklad01_01.txt]

File Edit Options Encoding Help 96 %

Textový výstup:

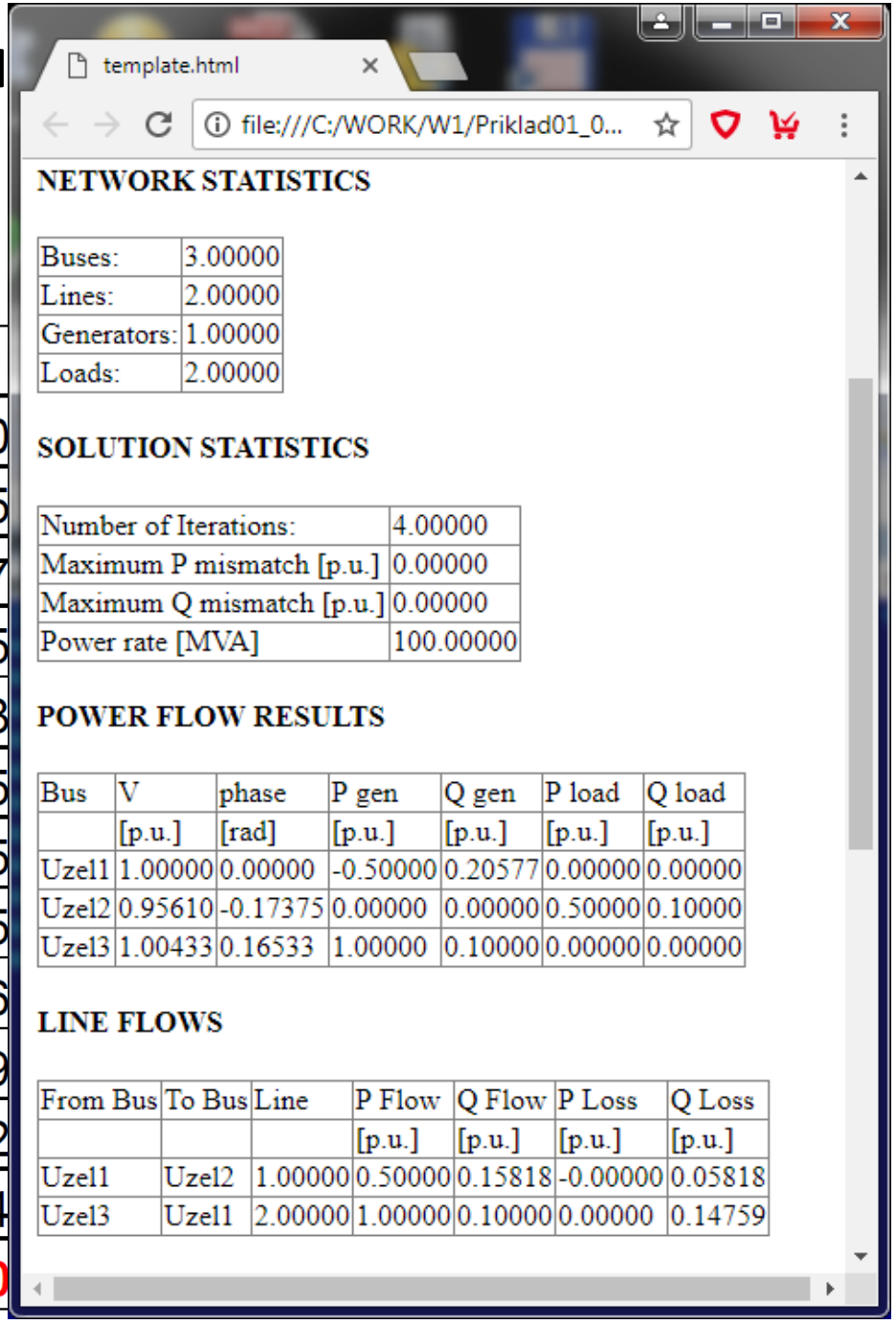
```
LINE FLOWS

From Bus     To Bus       Line         P Flow       Q Flow       P Loss       Q Loss
                                       [p.u.]       [p.u.]       [p.u.]       [p.u.]

Uzel1        Uzel2        1            0.5          0.15818      0            0.05818
Uzel3        Uzel1        2            1            0.1          0            0.14759

LINE FLOWS

From Bus     To Bus       Line         P Flow       Q Flow       P Loss       Q Loss
                                       [p.u.]       [p.u.]       [p.u.]       [p.u.]

Uzel2        Uzel1        1           -0.5         -0.1          0            0.05818
Uzel1        Uzel3        2           -1            0.04759      0            0.14759

GLOBAL SUMMARY REPORT

TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.]              0.5
REACTIVE POWER [p.u.]          0.30577

TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.]              0.5
REACTIVE POWER [p.u.]          0.1
```

12	105171,47629	110476,12820	12	-9°57´18,67´´	9°28´21,56´´	

Řešený příklad z předmětu

Výstup HTML (pro www):

p	U_2	U_3
0	110000,00000	110000,00000
1	108557,79539	113456,92025
2	105374,88998	110502,59407
3	105284,10663	110555,03645
4	105178,50904	110476,87553
5	105175,34781	110478,27315
6	105171,71834	110476,14855
7	105171,60950	110476,18655
8	105171,48461	110476,12876
9	105171,48086	110476,12979
10	105171,47656	110476,12822
11	105171,47643	110476,12824
12	**105171,47629**	**110476,12820**



template.html

file:///C:/WORK/W1/Priklad01_0...

NETWORK STATISTICS

Buses:	3.00000
Lines:	2.00000
Generators:	1.00000
Loads:	2.00000

SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations:	4.00000
Maximum P mismatch [p.u.]	0.00000
Maximum Q mismatch [p.u.]	0.00000
Power rate [MVA]	100.00000

POWER FLOW RESULTS

Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
	[p.u.]	[rad]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Uzel1	1.00000	0.00000	-0.50000	0.20577	0.00000	0.00000
Uzel2	0.95610	-0.17375	0.00000	0.00000	0.50000	0.10000
Uzel3	1.00433	0.16533	1.00000	0.10000	0.00000	0.00000

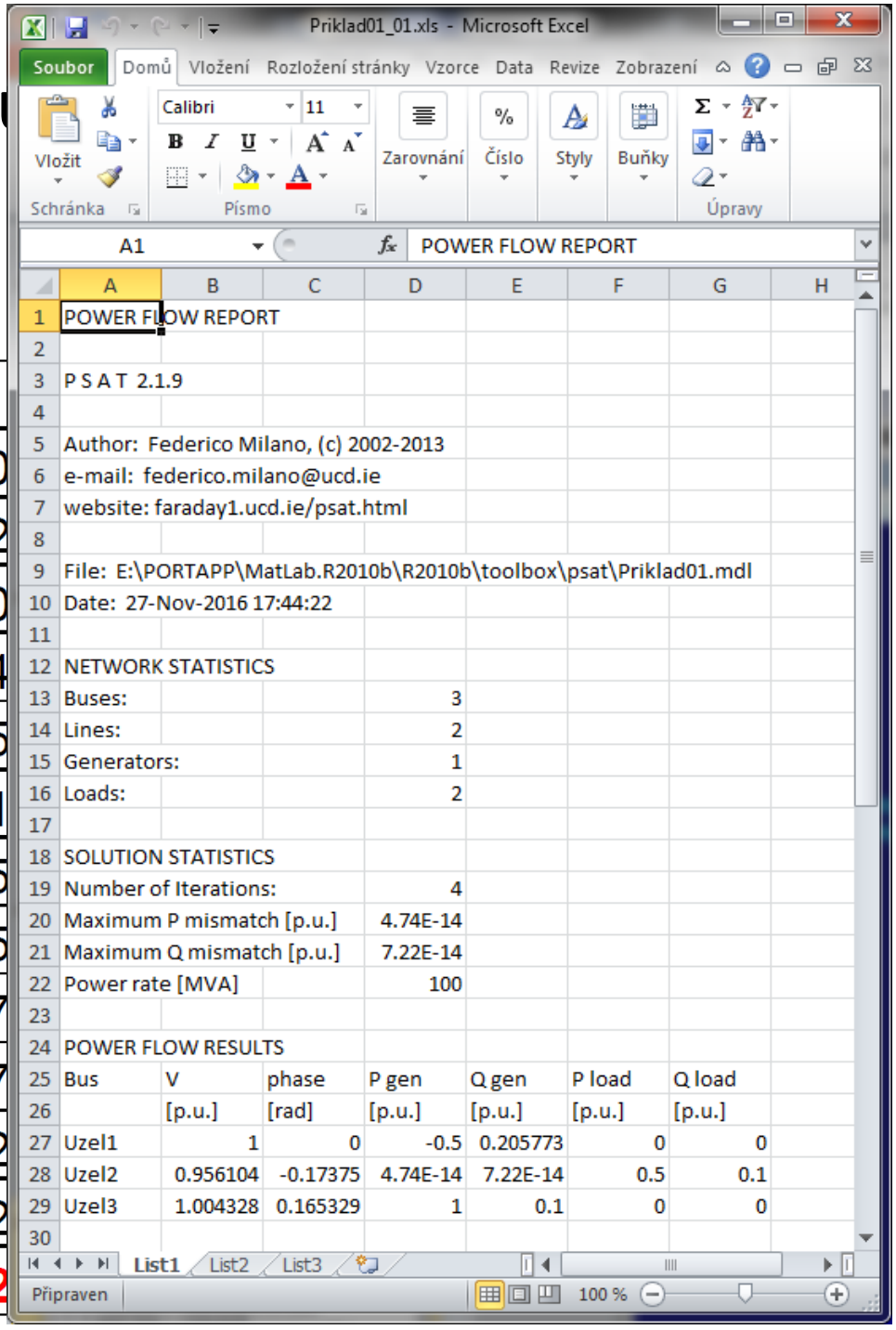
LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Uzel1	Uzel2	1.00000	0.50000	0.15818	-0.00000	0.05818
Uzel3	Uzel1	2.00000	1.00000	0.10000	0.00000	0.14759

Řešený příklad z předmětu

Výstup MS-EXCEL (xlsx):

p	U_2	U_3
0	110000,00000	110000,0000
1	108557,79539	113456,9202
2	105374,88998	110502,5940
3	105284,10663	110555,0364
4	105178,50904	110476,8755
5	105175,34781	110478,2731
6	105171,71834	110476,1485
7	105171,60950	110476,1865
8	105171,48461	110476,1287
9	105171,48086	110476,1297
10	105171,47656	110476,1282
11	105171,47643	110476,1282
12	**105171,47629**	**110476,1282**



Řešený pří

p	U_2
0	110000,
1	108557,
2	105374,
3	105284,
4	105178,
5	105175,
6	105171,
7	105171,
8	105171,
9	105171,
10	105171,
11	105171,
12	**105171,**

Priklad01_01-OverleafVerse.pdf - Adobe Acrobat Reader DC

Soubor Úpravy Zobrazení Okna Nápověda

Domovská stránka Nástroje Priklad01_01-Overl... Přihlásit se

1 / 2 150%

Table 1: Network statistics

Buses:	3.00000
Lines:	2.00000
Generators:	1.00000
Loads:	2.00000

Výstup LaTeX/pdf:

Table 2: Solution statistics

Number of iterations:	4.00000
Maximum p mismatch [p.u.]	0.00000
Maximum q mismatch [p.u.]	0.00000
Power rate [mva]	100.00000

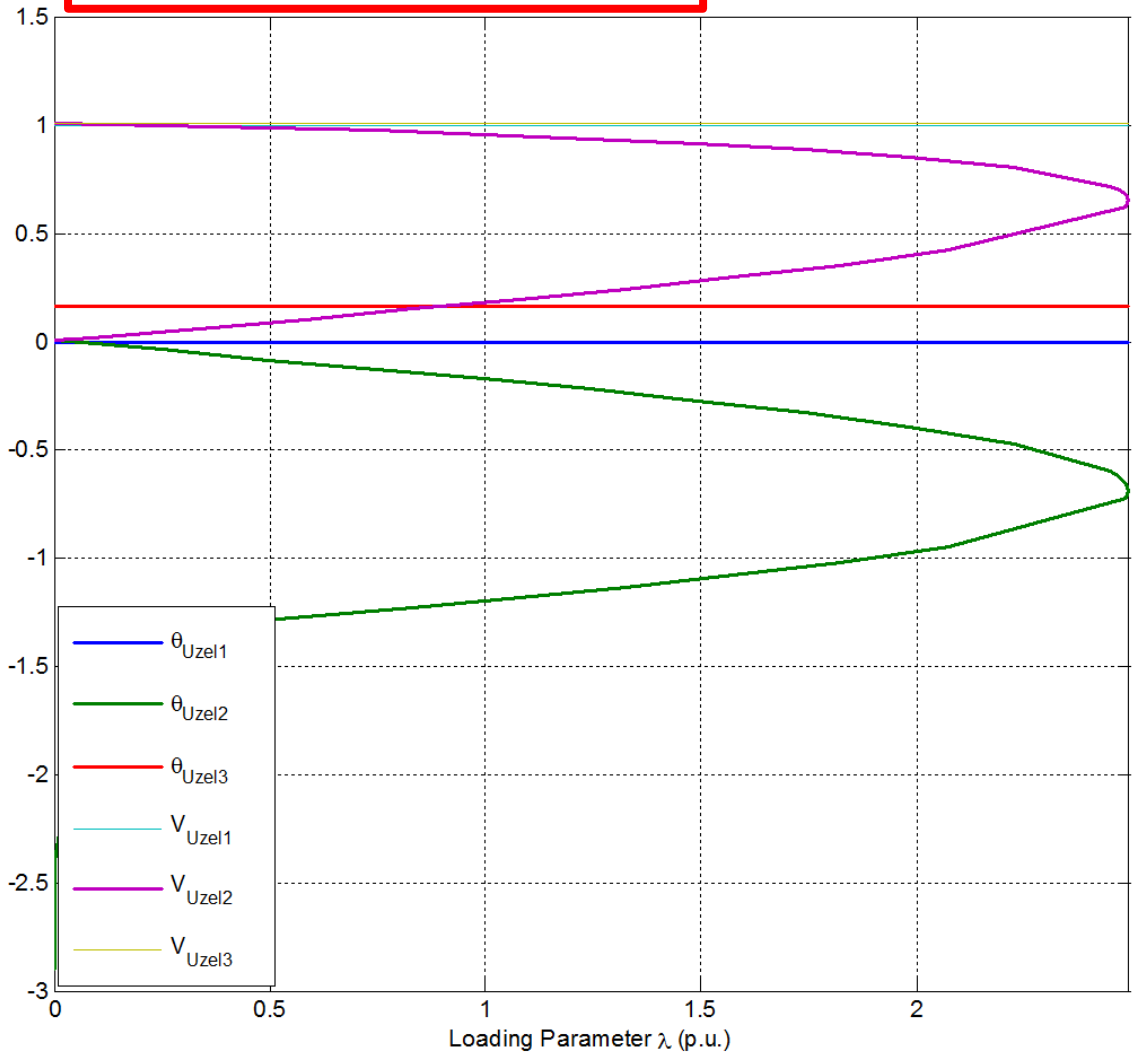
Table 3: Power flow results

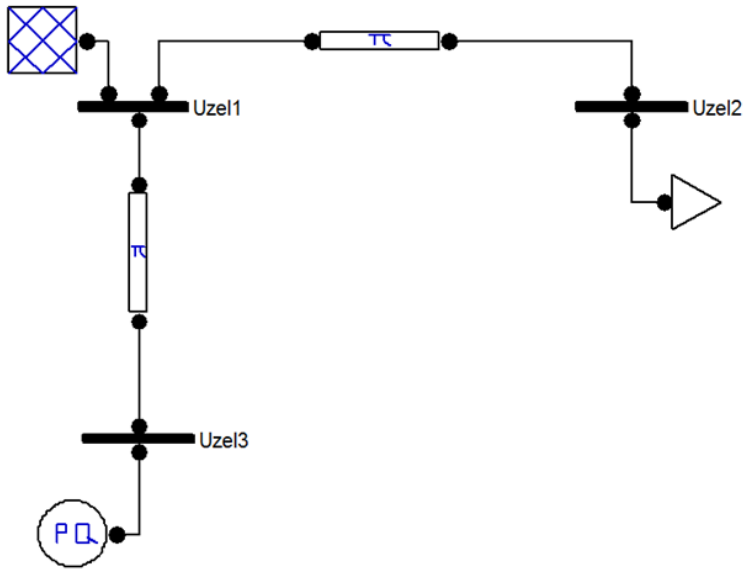
Bus	V [p.u.]	Phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Uzel1	1.00000	0.00000	−0.50000	0.20577	0.00000	0.00000
Uzel2	0.95610	−0.17375	0.00000	0.00000	0.50000	0.10000
Uzel3	1.00433	0.16533	1.00000	0.10000	0.00000	0.00000

8.27 x 11.69 "

Řešený příklad z předmětu TPR:

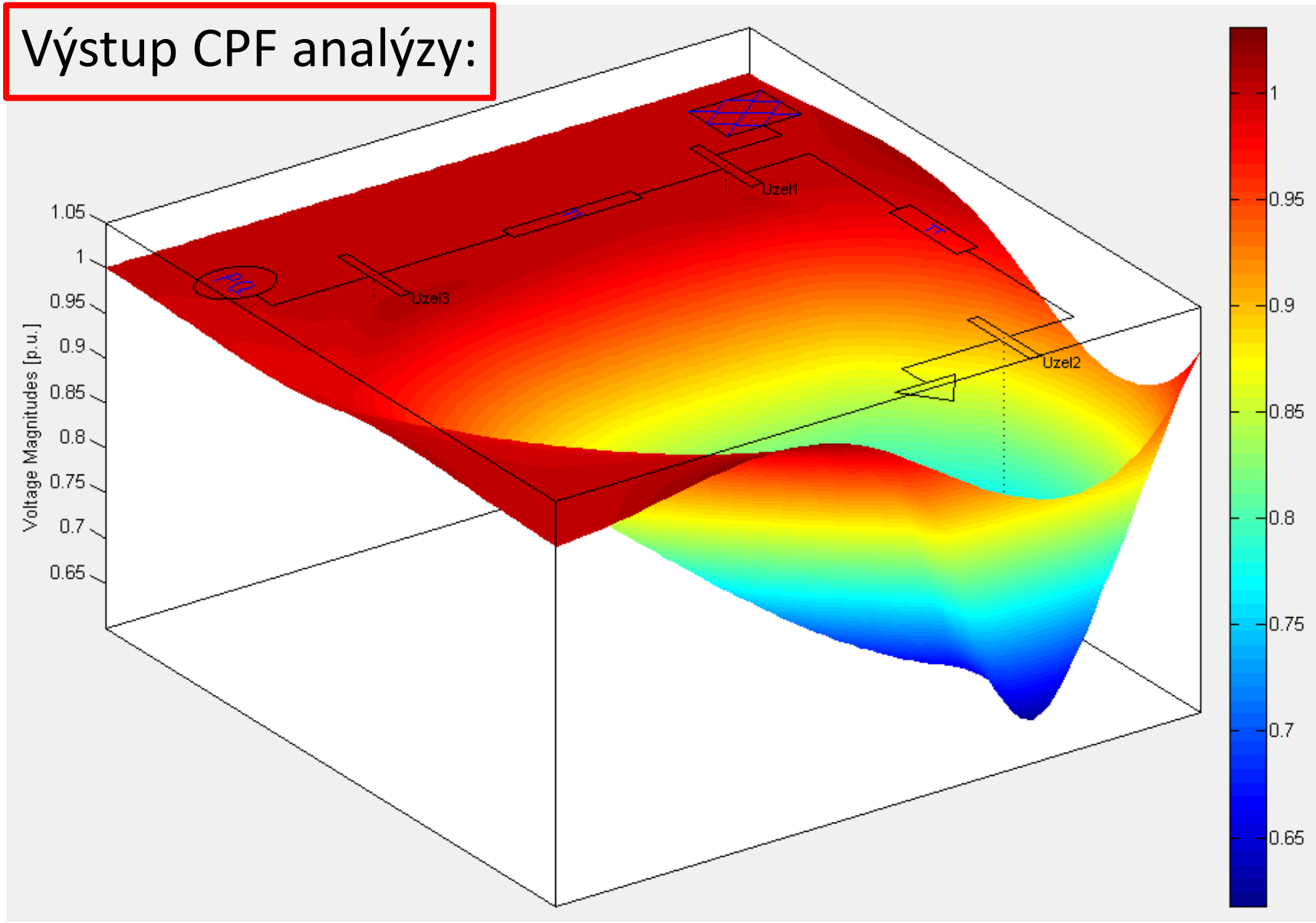
Výstup CPF analýzy:





Řešený příklad z předmětu TPR:

Výstup CPF analýzy:



Co je PSAT Závěr:

- Vhodný nástroj pro řešení ustálených stavů i přechodných elektro-mechanických dějů v elektrické síti pro výukové i vědecké účely.

- Vytváří rozhraní mezi různými software a vstupními daty, přičemž pohodlně vizualizuje získané výsledky.

PSAT (Power System Analysis Toolbox)

Další informace:
http://faraday1.ucd.ie/psat.html

https://groups.yahoo.com/neo/groups/psatforum/info