

MODELOVANIE DYNAMICKÝCH SYSTÉMOV V ELEKTROENERGETIKE

Doc. Ing. Martin Ernek PhD.

Slovak University of Technology in Bratislava Faculty of Electrical
Engineering and Information Technology

2025

Obsah prednášky

- ▶ Nariadenie EK 631/2016
- ▶ Simulačné prostredia využívané na pracovisku
- ▶ Prístupy k modelovaniu a identifikácii parametrov generátorov
- ▶ Postup identifikácie parametrov generátora v prostredí Matlab
- ▶ Praktické výsledky a vyhodnotenie

Nariadenie EK 631/2016

- ▶ V rámci nariadenia EK 631/2016 je v súčasnosti povinné vypracovať simulačné modely generátorov s podmienkami zhody:
 - ▶ Na žiadosť príslušného prevádzkovateľa sústavy alebo príslušného PPS poskytne vlastník zariadenia na výrobu elektrickej energie simulačné modely, ktoré náležite odrážajú správanie jednotky na výrobu elektrickej energie pri simulácii ustáleného stavu a dynamickej simulácii (zložka 50 Hz) alebo pri prechodových elektromagnetických simuláciách.

Simulačné prostredia využívané na pracovisku

Simulačné prostredie	Výhody	Nevýhody
Matlab Script/ využitie ODE solvera	Rýchlosť, výpočtová nenáročnosť, ľahká paralelizácia, vhodné pre identifikáciu	Dynamický model ako odefun, vhodné využiť pre analýzy max. 2 generátory + sieť
Matlab / SimScape Electrical Specialized Power system	Jednoduchosť pri tvorbe modelov, predpripravené bloky, využitie ostatných nástrojov Matlabu, vhodné pre identifikáciu	Nie je vhodný pre väčšie modely rádovo 100 generátorov a viac z hľadiska výpočtovej náročnosti.
GE PSLF	Rýchlosť, výpočtová nenáročnosť, modely siete > 1000 generátorov.	Zložitý, tabuľkovo orientovaný softvér, náročné programovanie modelov, nie je možné vykonávať širšie analýzy.
DigiSilent Power Factory	Nástroj pre detailné modelovanie a simuláciu elektroenergetických systémov. Vytváranie modelov ako v Simulinku , prípadne import so Simulinku.	Zložitý, databázovo orientovaný softvér. Občasná neprehľadnosť.

Tvorba simulačného modelu generátora

- ▶ Základom modelu každej elektrickej siete sú modely generátorov, spotrebičov a prenosových prvkov.
- ▶ Pre simulačný model generátora je dôležité nájsť také parametre, aby jeho výstup zodpovedal nameraným údajom.
- ▶ Účelom identifikácie je vytvorenie sady parametrov, ktoré budú vhodne opisovať dynamické vlastnosti generátora.
- ▶ Parametre je vhodné hľadať na základe realizovateľných meraní: prechodové a frekvenčné charakteristiky generátora.
- ▶ Tento postup si ukážeme na príklade identifikácie parametrov hydrogenerátora.

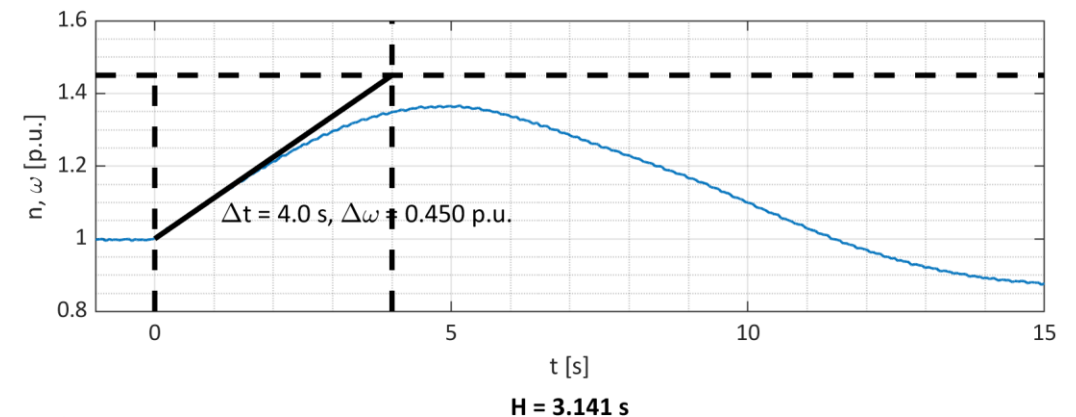
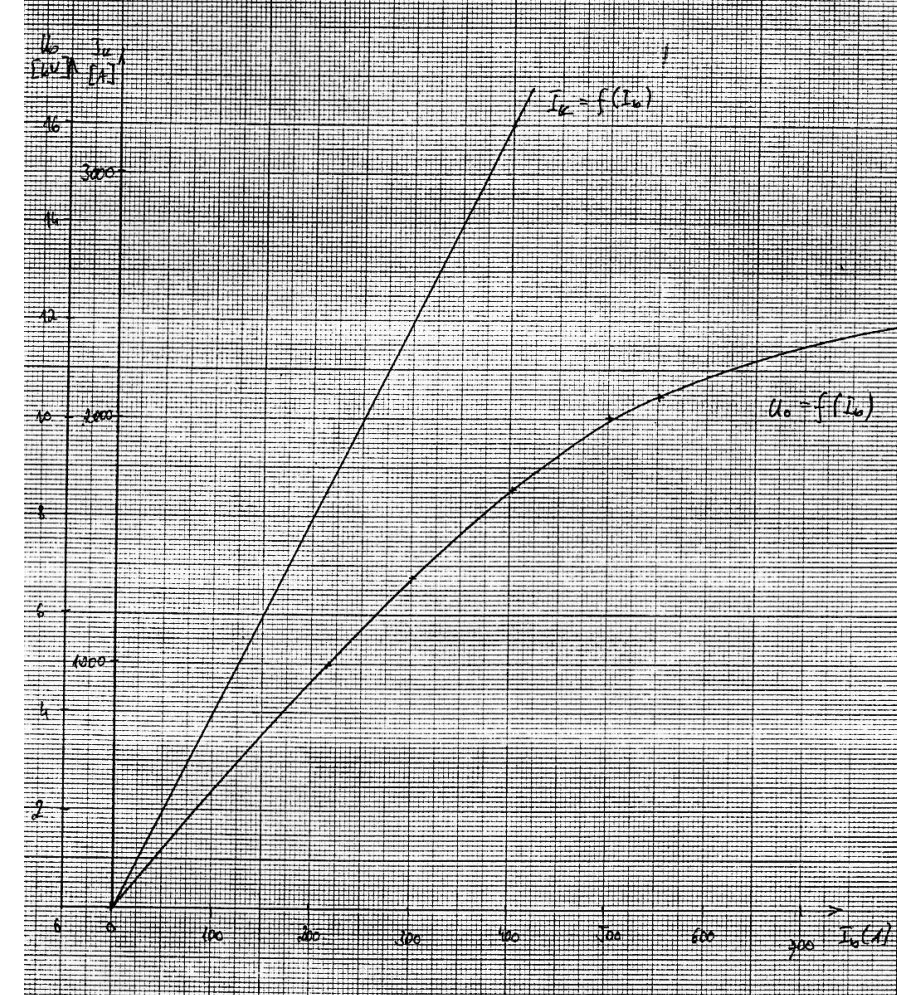
Identifikácia parametrov generátora VE

- postup

1. Analýza dostupných materiálov a odhad parametrov.
2. Vytvorenie datasetov z merania pre identifikáciu.
3. Výber simulačných modelov.
4. Výber účelovej funkcie.
5. Metóda optimalizácie.
6. Verifikácia nájdenných parametrov.

Identifikácia parametrov

- Určenie východiskového bodu pre identifikáciu:
 - Parametre generátora z datasheetu výrobcu.
 - Meranie synchronnej reaktancie x_d generátora zo skúšok naprázdno.
 - Určenie zotrvačnosti H zo skúšky náhleho odľahčenia generátora (Load rejection test).
 - Určenie známych zosilnení systému budenia na základe údajov od výrobcu a nameraných statických charakteristík.

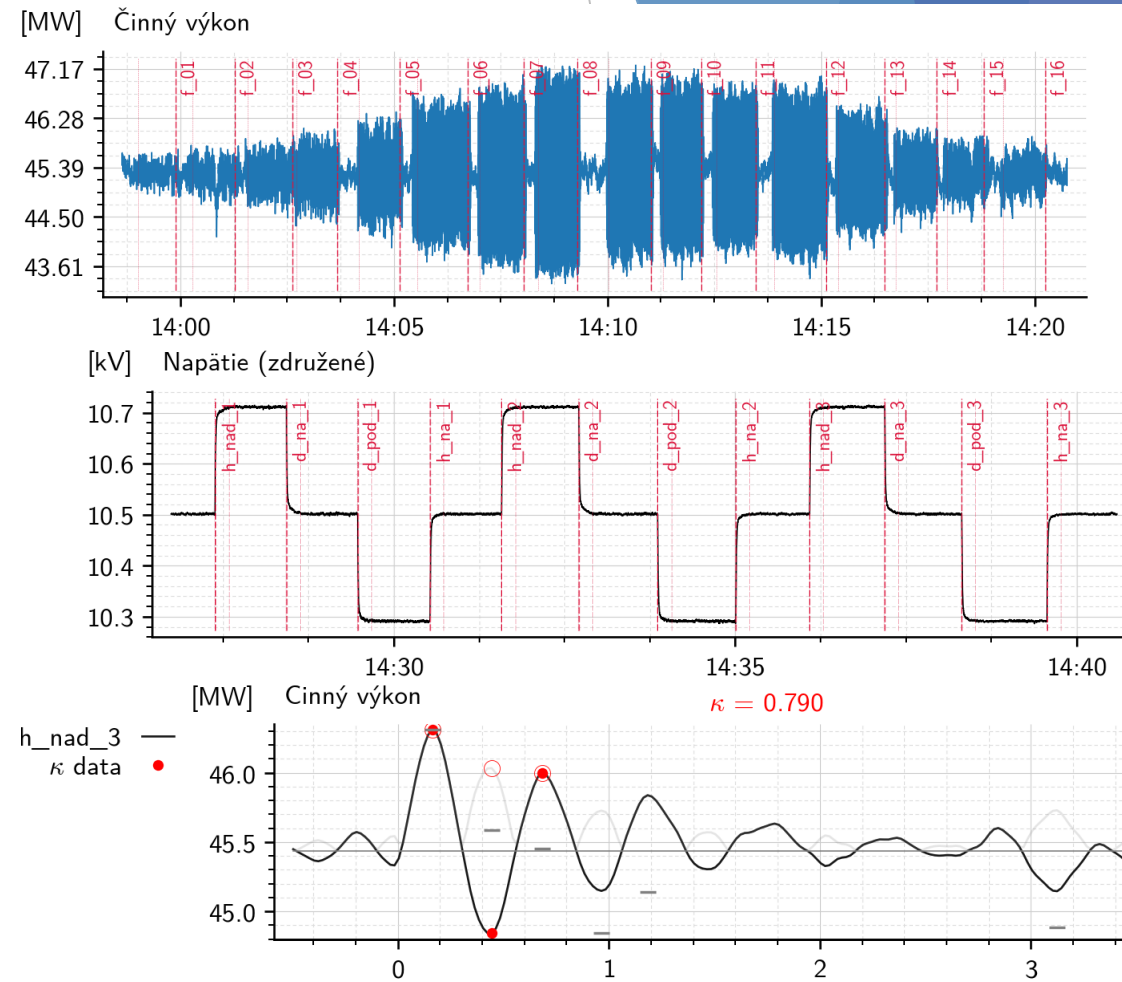


Identifikácia parametrov

- ▶ Parametre generátora, turbíny, budiča a ich riadiacich systémov môžeme rozdeliť do základných skupín:
 - ▶ Známe parametre - parametre regulačných slučiek, obmedzenia, rýchlosti ventilov, ekvivalentná, náhradná impedancia siete.
 - ▶ Parametre, ktoré je potrebné spresniť - reaktancie a časové konštanty generátora, priame zosilnenie budiča v prípade statického budenia.
 - ▶ Neznáme parametre - zotrvačnosť sústrojenstva, ďalšie zosilnenia v modeli budiča.

Identifikácia parametrov - súbor meraní

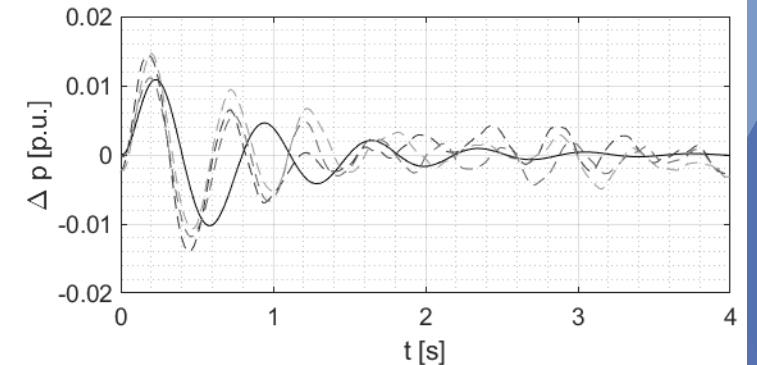
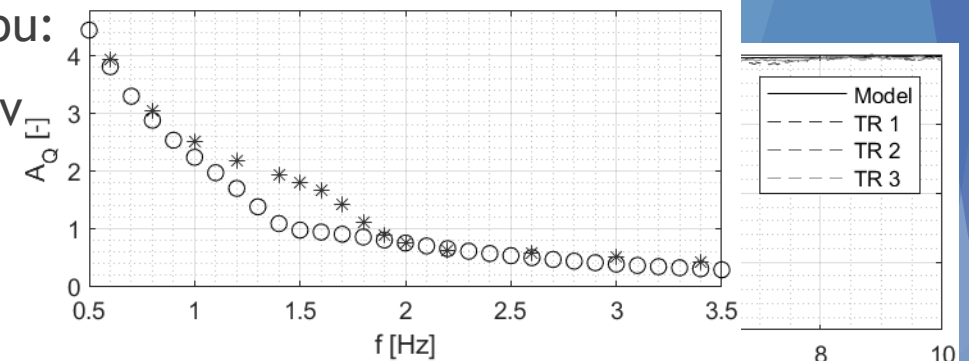
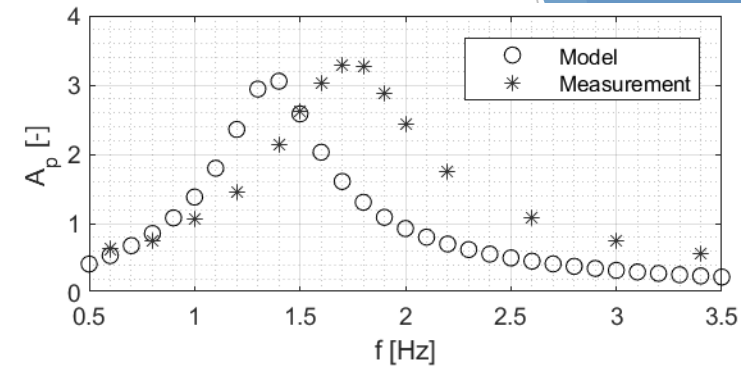
- ▶ Merania, ktoré je možné využiť pre identifikáciu:
- ▶ Merania v stave naprázdno:
 - ▶ Meranie prevodovej charakteristiky naprázdno
 - ▶ Meranie prechodovej charakteristiky budiaceho systému v stave naprázdno
 - ▶ Prechodová charakteristika v regulácii otáčok
- ▶ Súbor meraní v oblasti menovitého výkonu
 - ▶ Meranie prechodovej charakteristiky budenia so zapnutým PSS
 - ▶ Meranie prechodovej charakteristiky budenia s vypnutým PSS
 - ▶ Frekvenčné charakteristiky činného výkonu so zapnutým PSS
 - ▶ Frekvenčné charakteristiky činného výkonu s vypnutým PSS
 - ▶ Overenie funkčnosti obmedzovačov
 - ▶ Prechodové charakteristiky činného výkonu



Metodika pre identifikáciu parametrov

Metodika identifikácie sa dá zhrnúť do nasledovného postupu:

- Zvoliť vektor identifikovaných parametrov a intervalov, v ktorých očakávame, že sa budú hľadané parametre nachádzať.
- Zostavenie účelovej funkcie a voľba čiastkových kritériálnych funkcií, ktoré budú hovoriť o chybe medzi jednotlivými nameranými údajmi a simulačným modelom.
- Minimalizácia účelovej funkcie pomocou optimalizácie.
- Overenie výstupu modelu na novej sade verifikačných údajov alebo aspoň prostredníctvom nameraných údajov.



Identifikácia parametrov - účelová funkcia

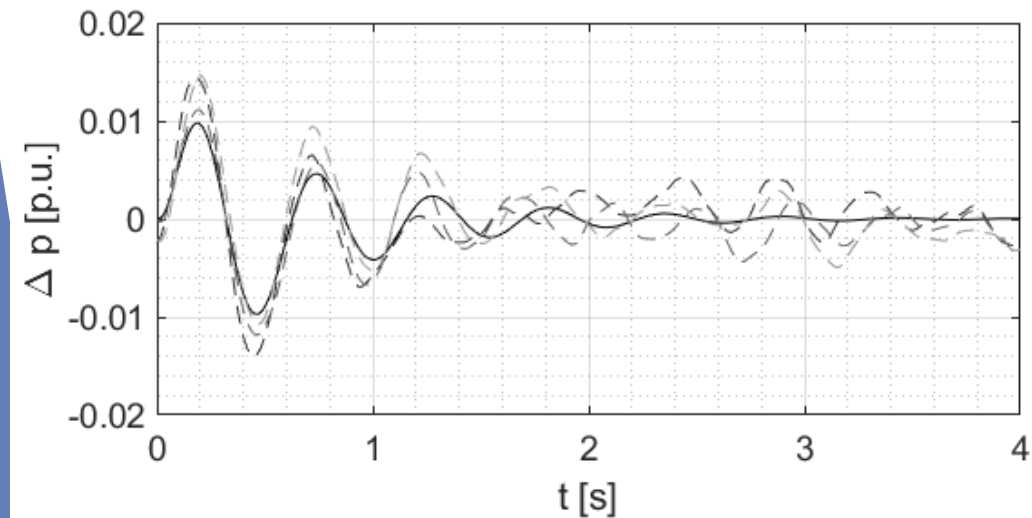
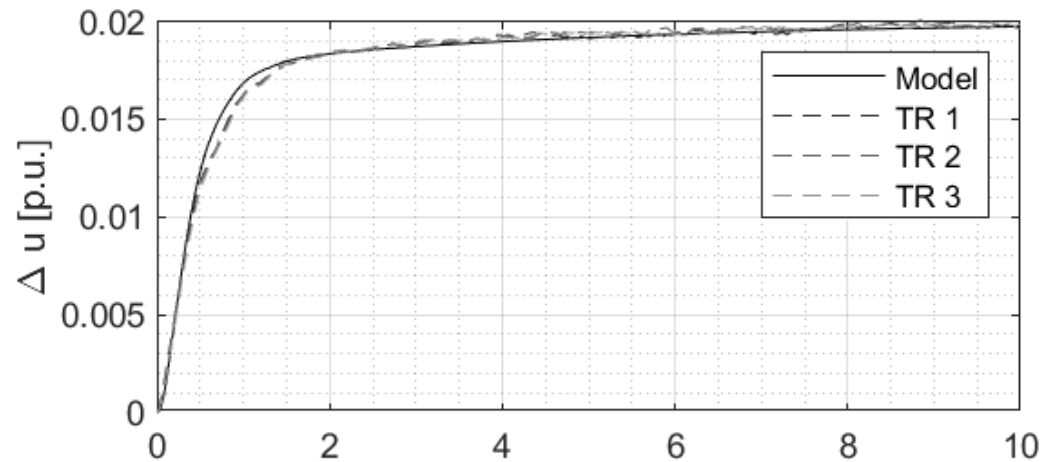
- ▶ Výber účelovej funkcie musí zohľadniť prechodové aj frekvenčné vlastnosti generátora. Namerané vlastnosti sa v účelovej funkcii porovnávajú s vlastnosťami simulačného modelu podľa stanoveného kritéria pre odchýlky. Najčastejšie je ako kritérium využívané: Normalized Root Mean Square Error (NRMSE).
 - ▶
$$NRMSE = \frac{|y_{ref} - y|}{|y_{ref} - \overline{y_{ref}}|}$$
- ▶ Kde y_{ref} sú nameranými údajmi, y sú údajmi modelu, $\overline{y_{ref}}$ sú strednou hodnotou nameraných údajov.
- ▶ Toto kritérium je možné využiť pre stanovenie podobnosti medzi nameranými údajmi a výstupom modelu:
 - ▶ $Podobnosť = (1 - NRMSE) * 100\%$

Identifikácia parametrov - optimalizácia

- ▶ Zostavená účelová funkcia je potom minimalizovaná pomocou vhodnej optimalizačnej metódy. Ak zvolíme pre ukončenie optimalizácie podmienku pre toleranciu hodnoty účelovej funkcie nasledovné výsledky.
- ▶ Porovnanie optimalizačných metód.

Optimalizačná metóda	Počet iterácií	Výpočtový čas (s)	Praktická využiteľnosť
Pattern Search	490	131	Vysoká
Genetic Algorithm (Matlab)	59	231	Stredná
Genetic Algorithm (Sekaj)	88	83	Vysoká
Particle Swarm Optimization	78	99,5	Vysoká

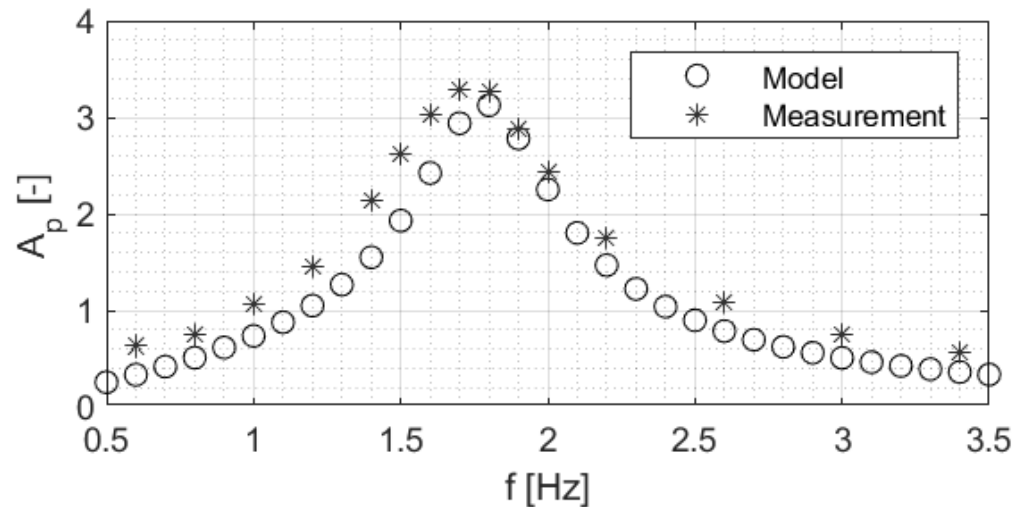
Identifikácia parametrov



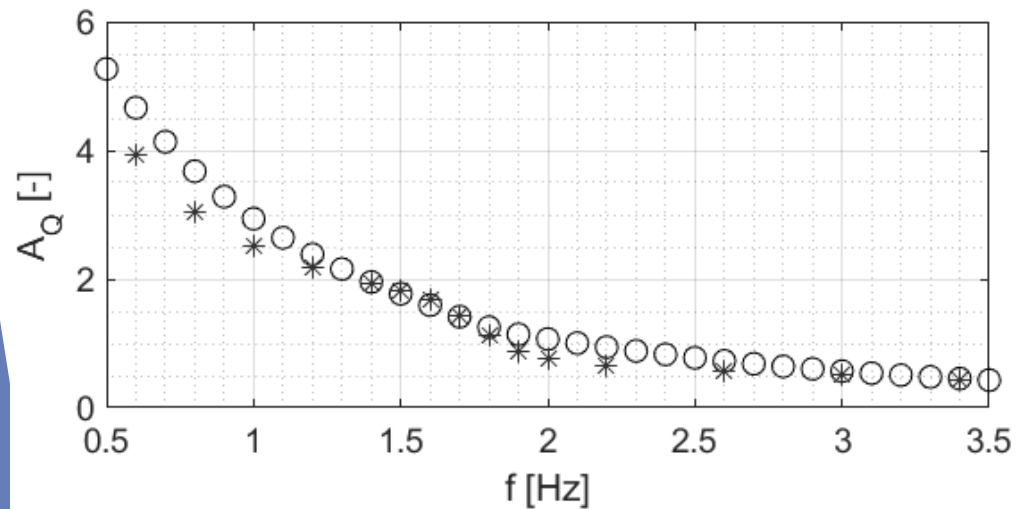
- Porovnanie prechodových charakteristík modelu a nameraných údajov pre parametre nájdené cez pattern search.

Charakteristika	Pôvodná podobnosť [%]	Podobnosť' [%]
TR1 V	83,23	90,87
TR1 P	0,26	60,09
TR2 V	85,8	89,76
TR2 P	-6,21	67,87
TR3 V	86,33	88,89
TR3 P	-12,28	56,69

Identifikácia parametrov



- Porovnanie prechodových charakteristík modelu a nameraných údajov pre parametre nájdené cez pattern search.



Charakteristika	Pôvodná podobnosť [%]	Podobnosť [%]
FR P	-1,38	63,78
FR Q	69,66	77,71

Záver

- ▶ Matlab SimScape Specialized Power System je vhodný pre modelovanie a simuláciu menších sietí.
- ▶ Nástroje Matlabu pre analýzu, spracovanie dát a optimalizáciu je vhodné využiť pre prípravu simulačných modelov do väčších modelov sietí pre veľké energetické simulačné prostredia.
- ▶ Global optimization toolbox je možné využiť pre hľadanie parametrov generátora vzhľadom na namerané prechodové a frekvenčné charakteristiky generátora.