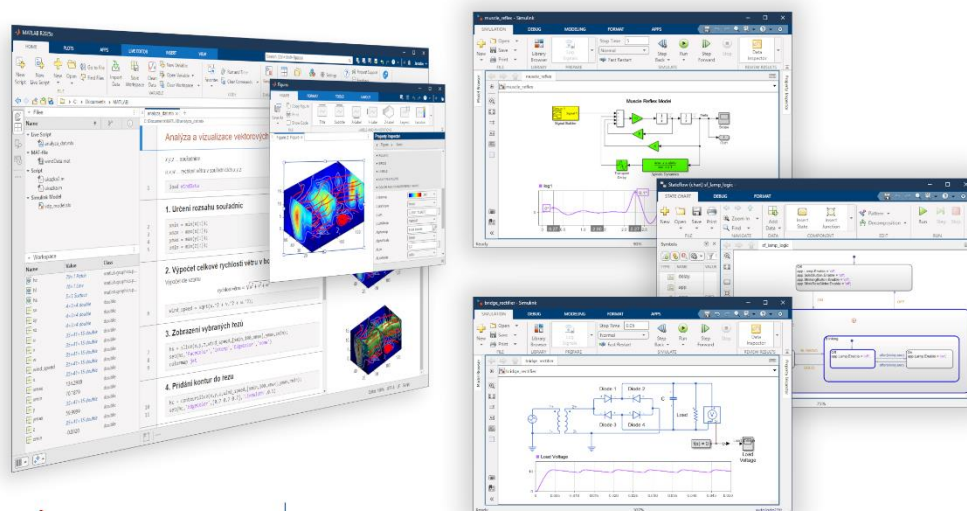


11.9.2025 Technical Computing Camp 2025

# Modelování, simulace a analýza dat v energetice

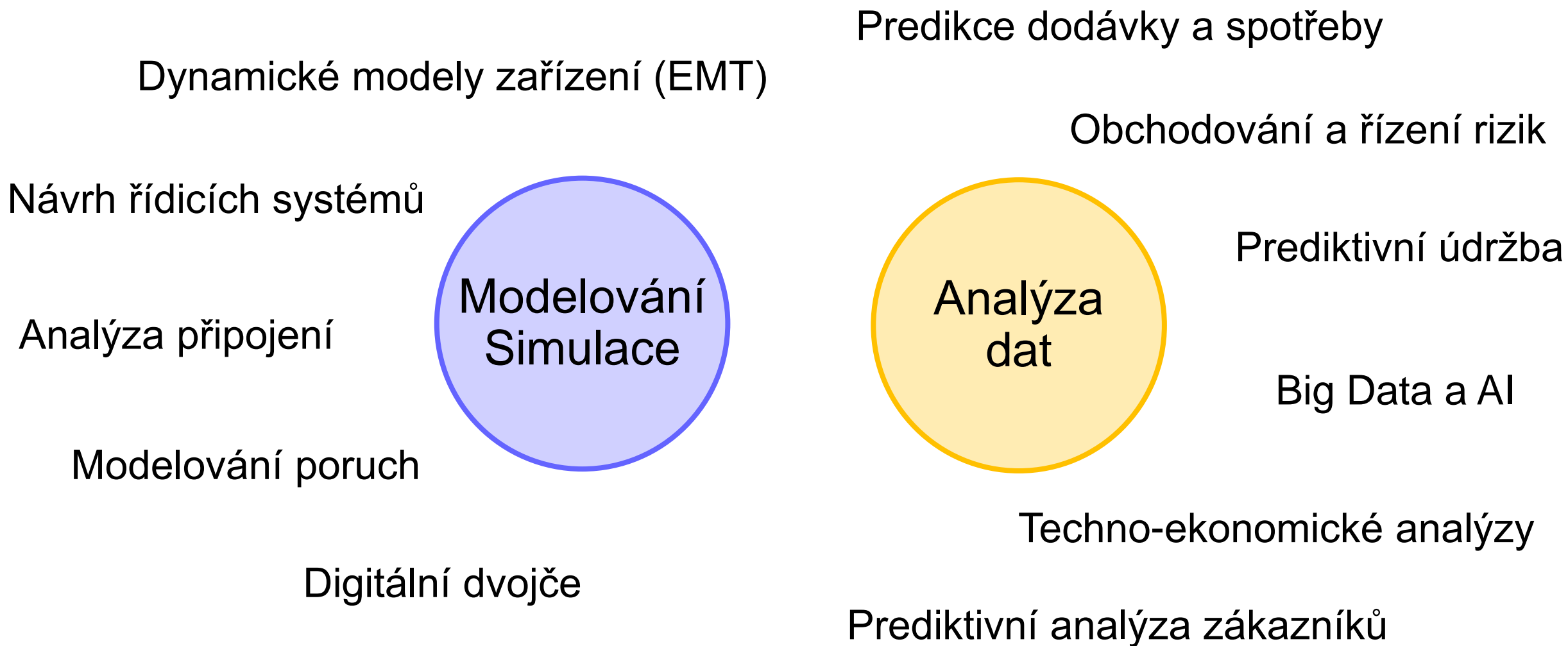


Jaroslav Jirkovský  
jirkovsky@humusoft.cz

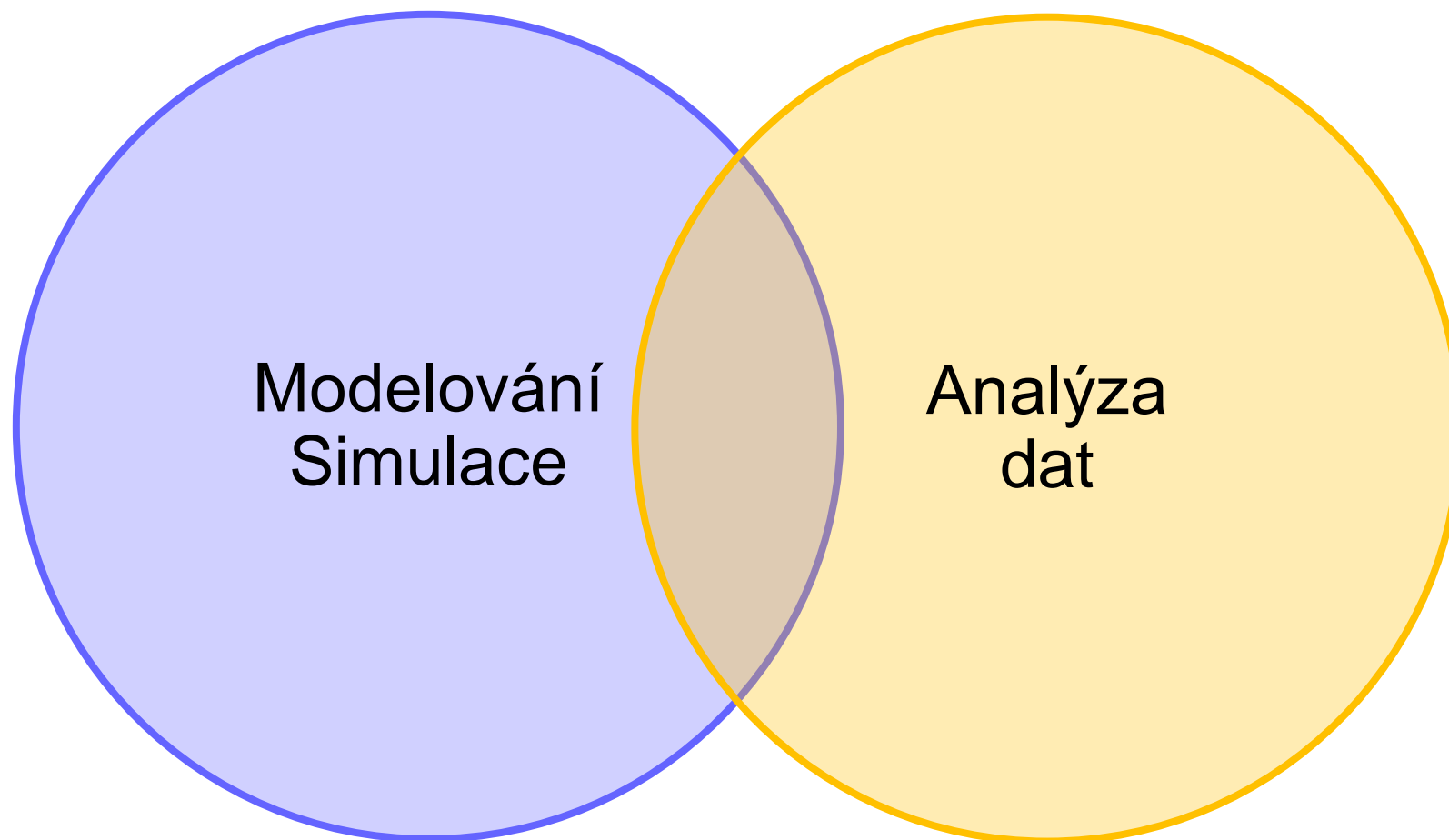
[www.humusoft.cz](http://www.humusoft.cz)  
[info@humusoft.cz](mailto:info@humusoft.cz)

[www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)

# Modelování, simulace a analýza dat v energetice



# Modelování, simulace a analýza dat v energetice

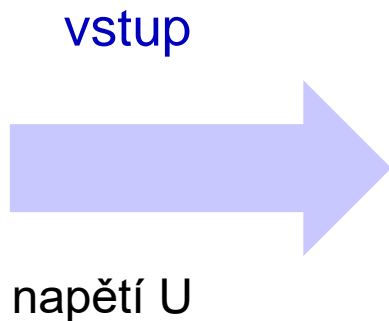
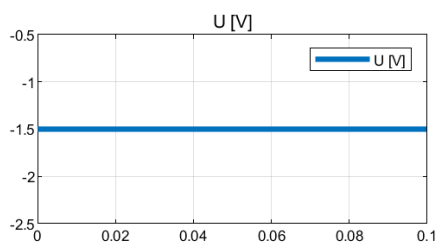


# Modelování a simulace systémů

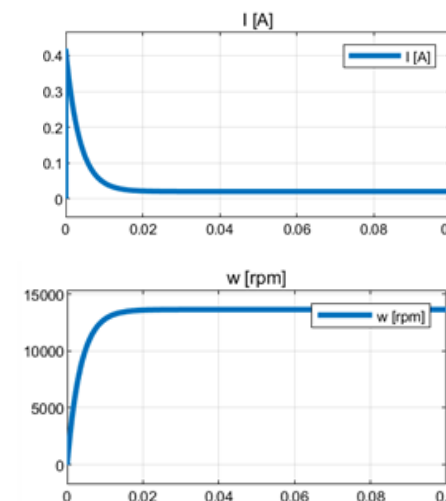
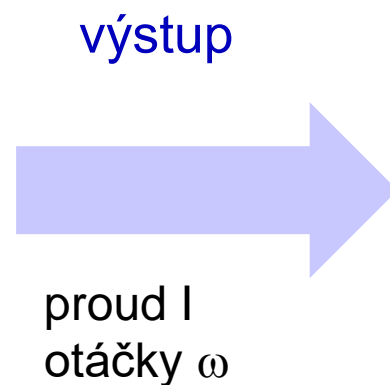
Elektrická zařízení

Řídicí systémy

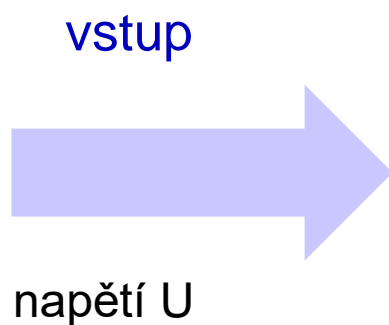
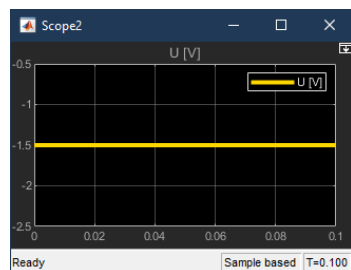
# Modelování a simulace systémů



SYSTEM

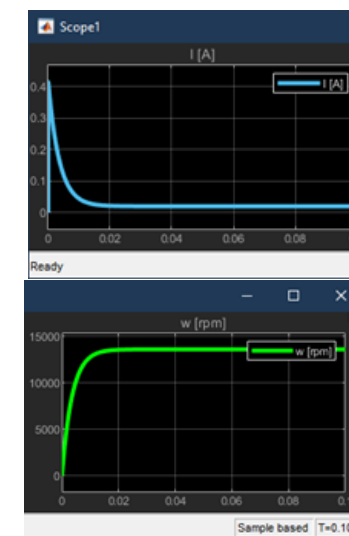
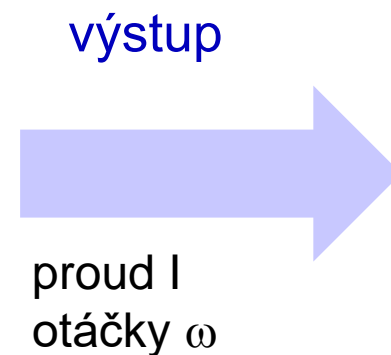


MODEL



$$x(t + 1) = f(x(t), u(t))$$

$$y(t) = g(x(t), u(t))$$

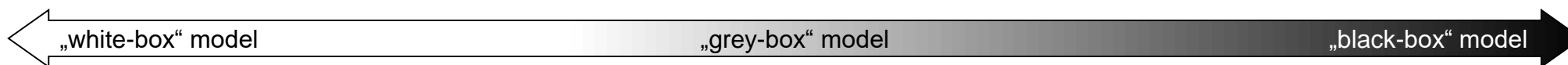


# Modelování a simulace systémů: Přístupy k modelování

- Pro různé situace jsou vhodné různé přístupy

**Fyzikální vztahy**

**Naměřená data**



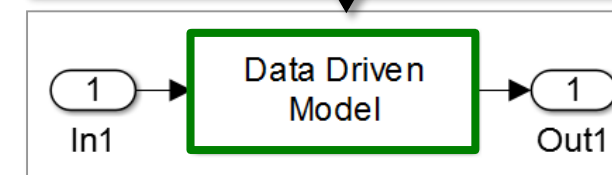
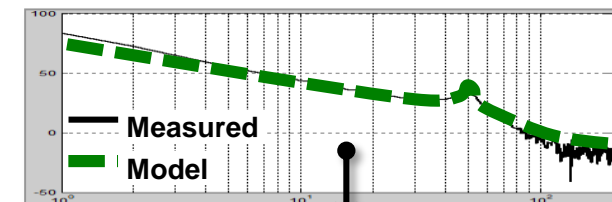
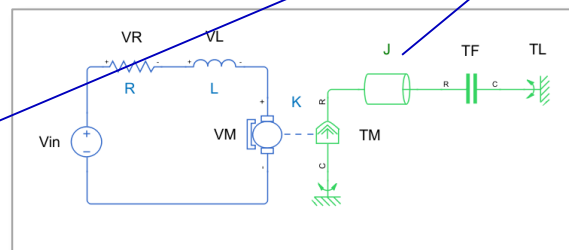
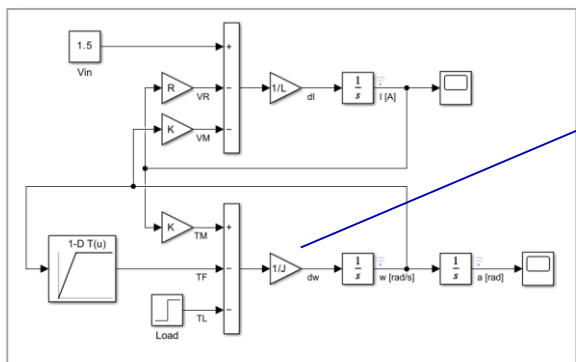
**Modelování rovnic**

**Fyzikální síť**

**Ladění neznámých parametrů**

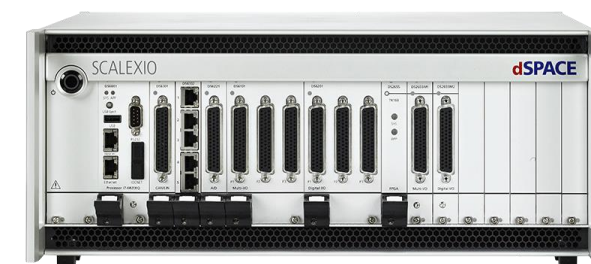
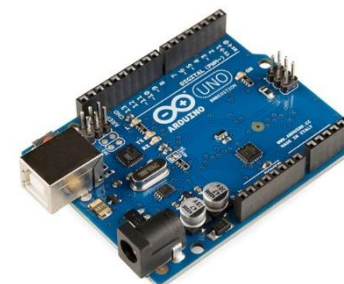
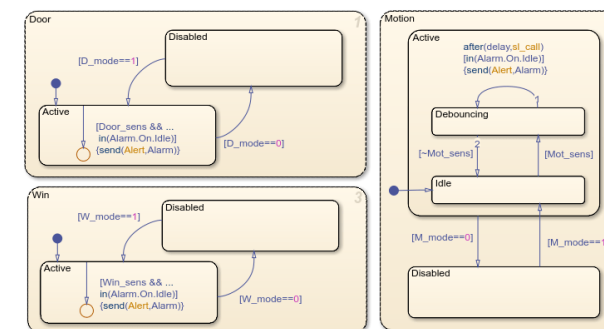
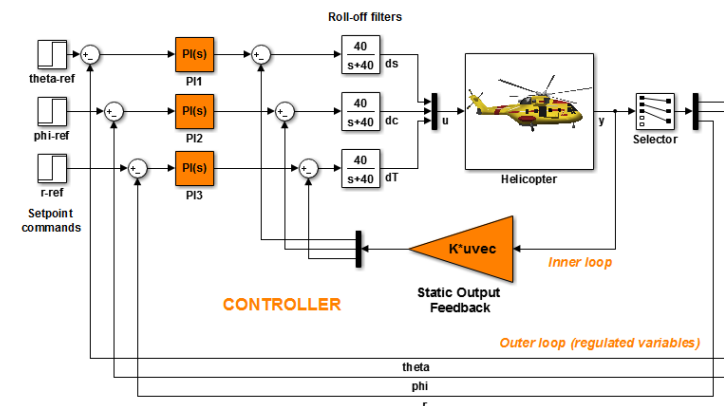
**Identifikace soustav**

$$L \frac{dI}{dt} = V_{in} - RI - K\omega \quad J \frac{d\omega}{dt} = KI - f(\omega) - T_L$$



# Modelování, simulace a implementace algoritmů

- Řídicí systémy
- Logické a rozhodovací systémy
- Zpracování signálu a komunikace
- Zpracování obrazu a počítačové vidění
- a další ...
- Společná simulace soustav a algoritmů
- Generování kódu pro cílové platformy
  - C/C++, HDL, PLC (strukturovaný text), CUDA
  - simulace a testování v reálném čase, produkce



# Modelování „power“ systémů

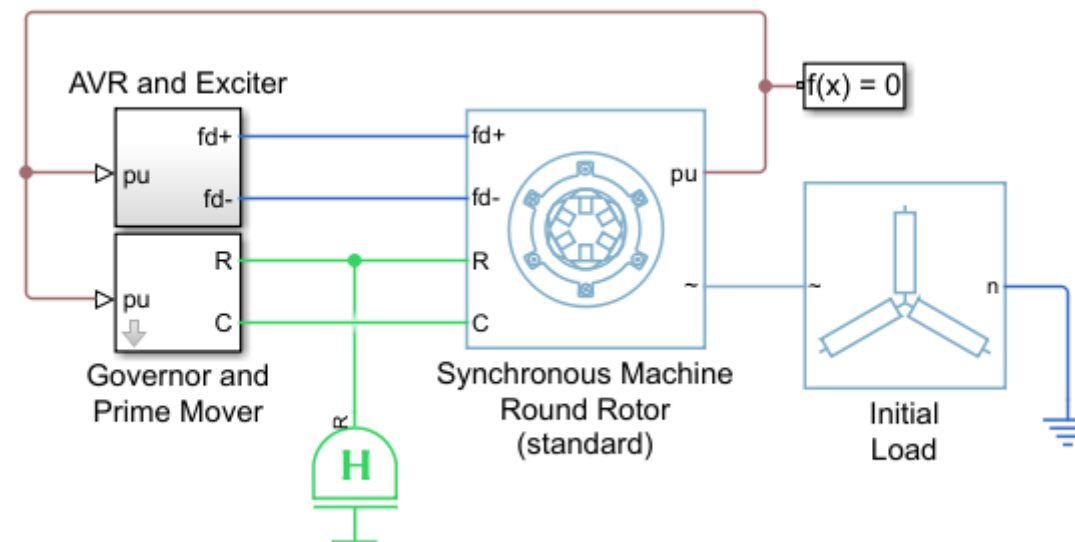
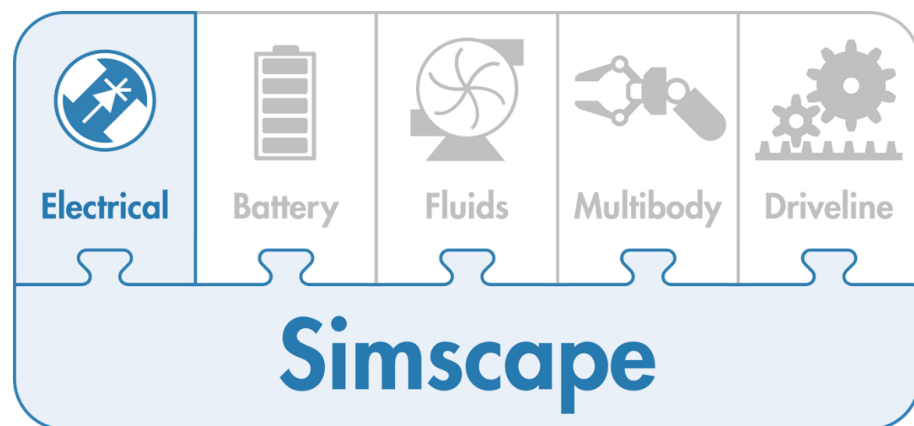
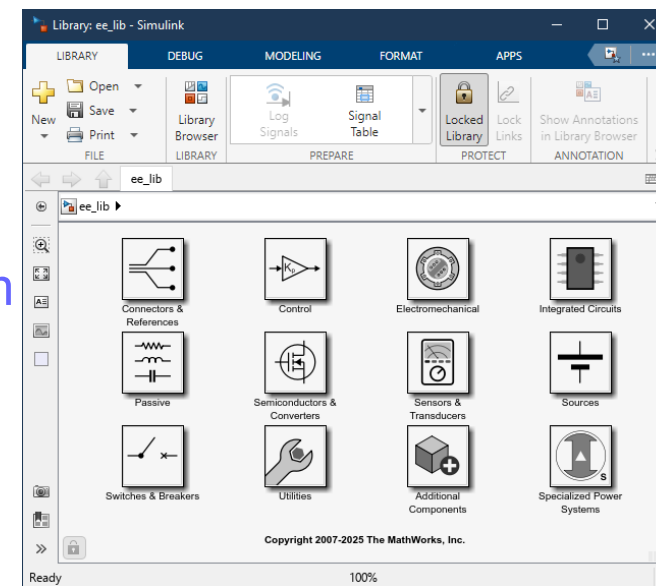
- Může to být:
  - konkrétní 3f elektrické zařízení
  - lokální mikrosíť
  - ale také elektrické vozidlo
- Obecně se jedná o elektrický systém, který obsahuje zdroj, distribuci a zátěže





# Simscape Electrical

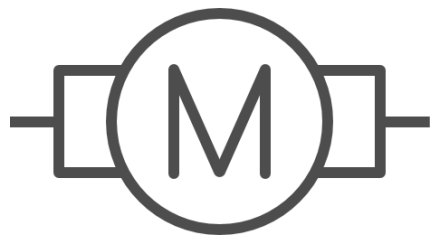
- Fyzikální modelování
  - topologie elektrického systému reprezentována schématickým
- Elektrické a elektro-mechanické systémy
  - výkonová elektronika, energetika, elektrické pohony, ...
  - prvky s různou úrovní detailu (volíme dle požadavků úlohy)



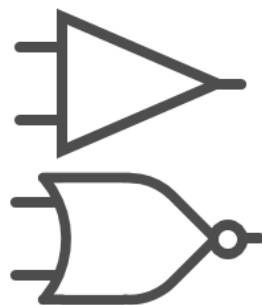
# Modely 1f prvků v Simscape Electrical



polovodičové prvky



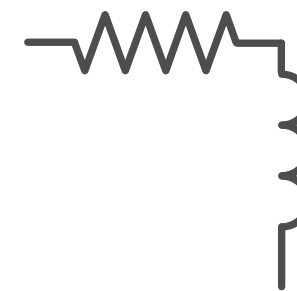
motory, akční prvky



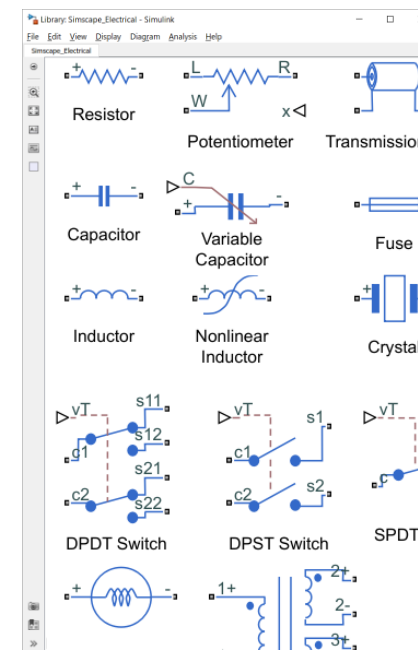
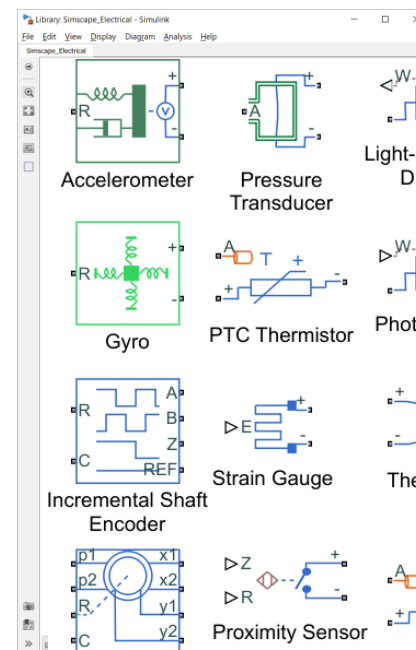
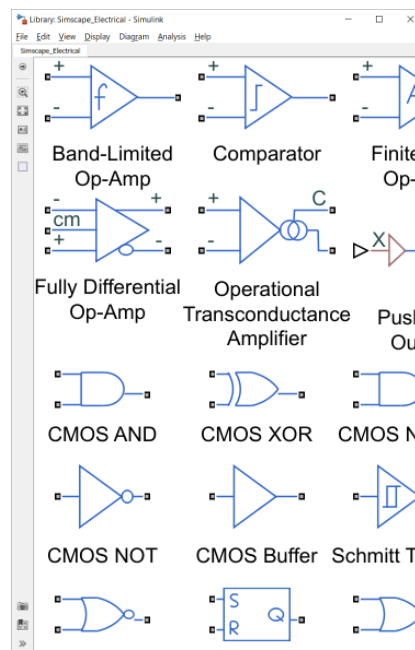
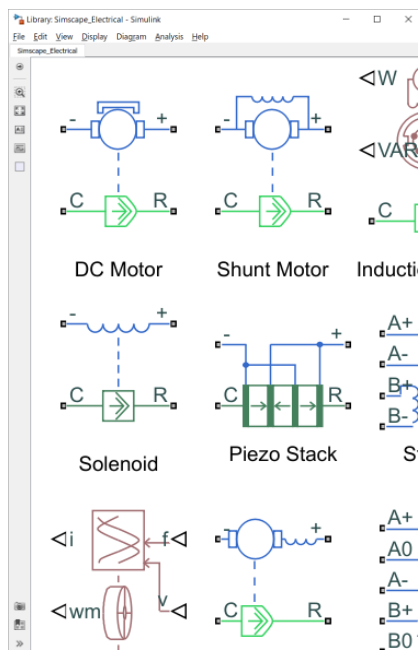
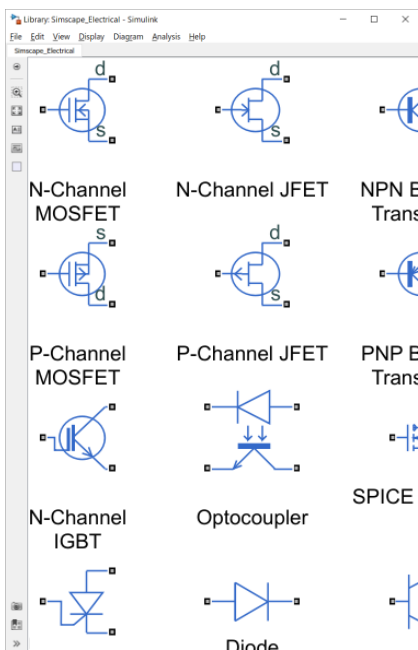
op. zesilovače, logická hradla



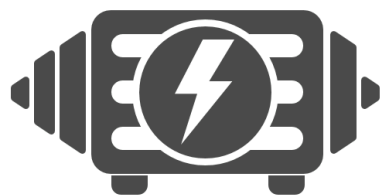
senzory



pasivní součástky



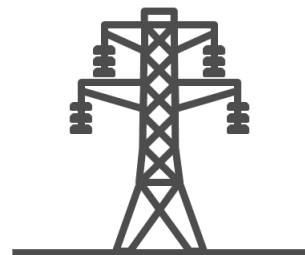
# Modely 3f prvků v Simscape Electrical



třífázové motory



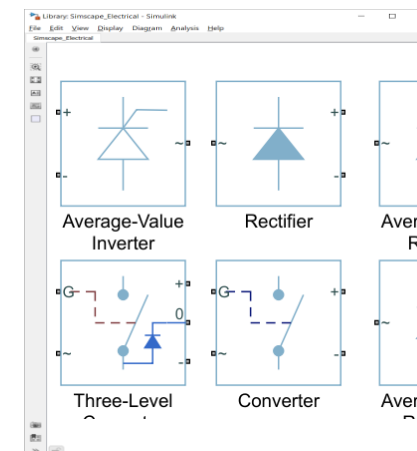
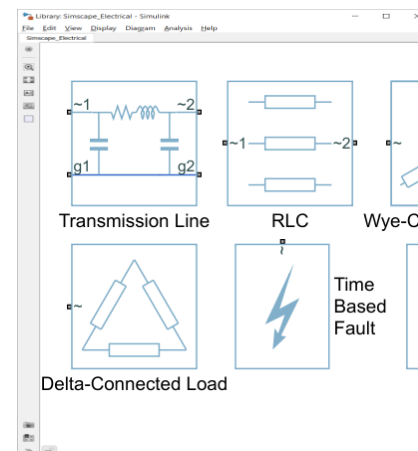
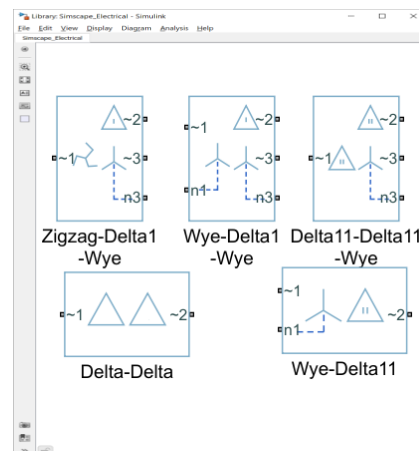
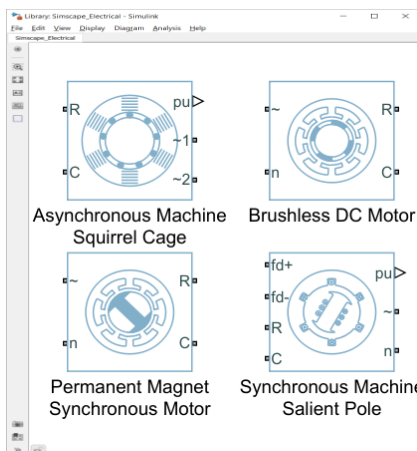
transformátory



vedení,  
FACTS

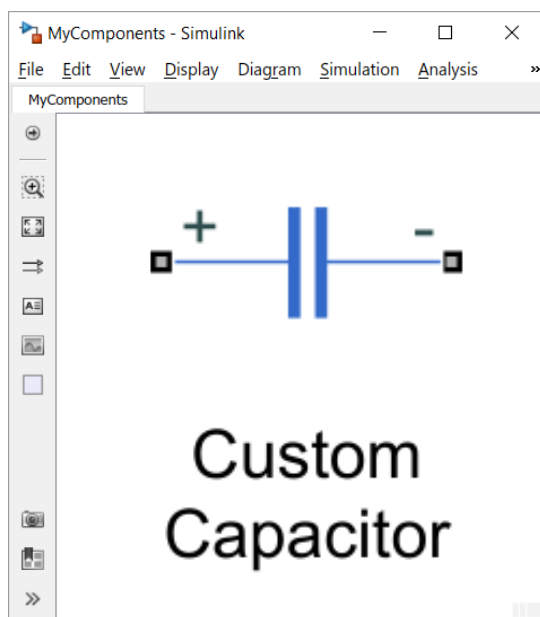


měníče,  
střídače



# Modely prvků v Simscape Electrical

+ možnost vytvoření vlastních prvků pomocí jazyka Simscape Language



```

equations
    v == i*r + vc;
    i == c*vc.der + g*vc;
end

```

The screenshot shows a code editor window with the following Simscape Language code:


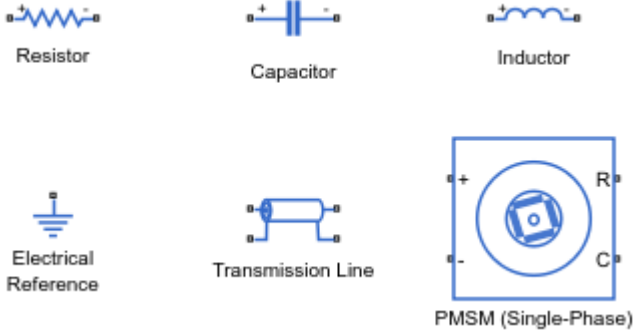

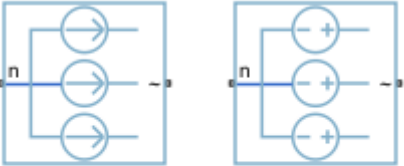
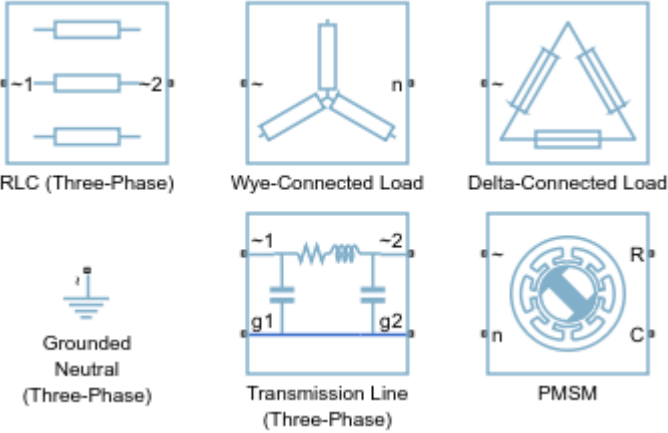
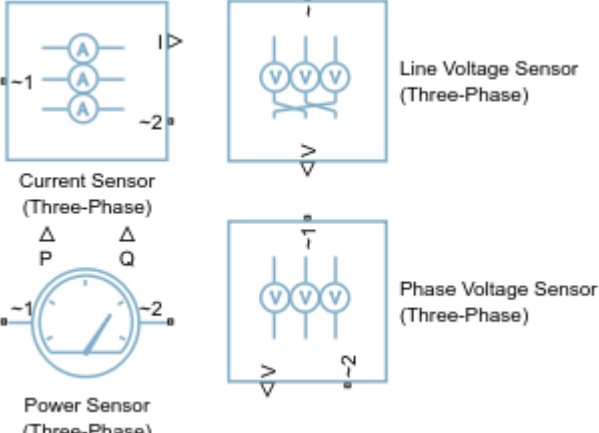
```

equations
    v == i*r + vc;
    i == c*vc.der + g*vc;
end

```

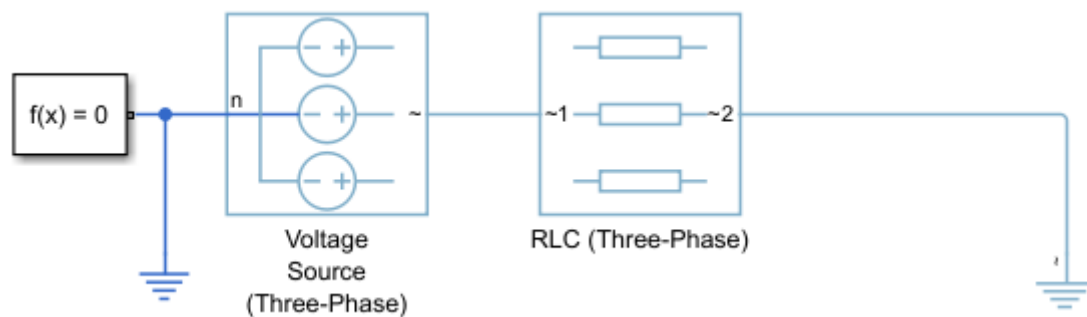
The status bar at the bottom indicates "Simscape model file" and "Ln 16 Col 5".

# 1f vs. 3f systémy v Simscape: Jak je poznat?

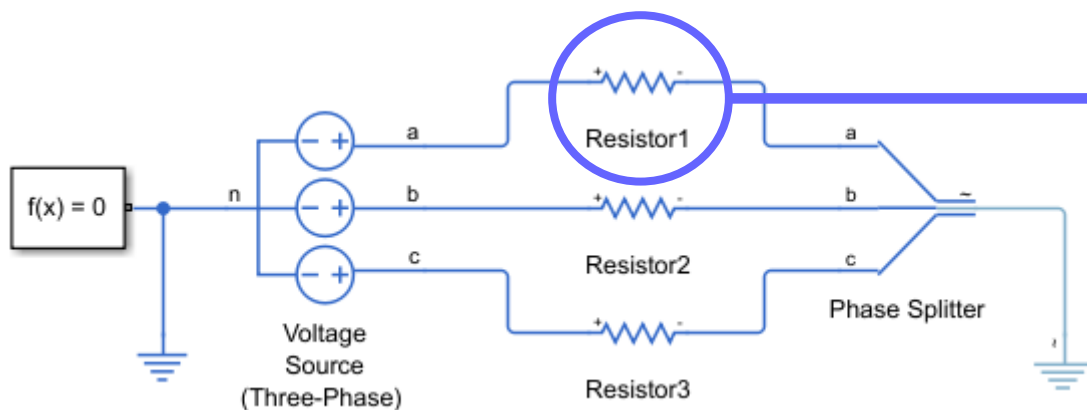
Ukázky	Zdroje	Prvky	Měření
1f	 <p>AC Current Source      AC Voltage Source</p>	 <p>Resistor      Capacitor      Inductor</p> <p>Electrical Reference      Transmission Line      PMSM (Single-Phase)</p>	 <p>Current Sensor      Voltage Sensor</p>
3f	 <p>Current Source (Three-Phase)      Voltage Source (Three-Phase)</p>	 <p>RLC (Three-Phase)      Wye-Connected Load      Delta-Connected Load</p> <p>Grounded Neutral (Three-Phase)      Transmission Line (Three-Phase)      PMSM</p>	 <p>Current Sensor (Three-Phase)      Line Voltage Sensor (Three-Phase)</p> <p>Power Sensor (Three-Phase)      Phase Voltage Sensor (Three-Phase)</p>

# Sdružené vs. oddělené spojnice 3f prvků

- 3f model se sdruženými spojnici (Composite)



- 3f model s oddělenými spojnici (Expanded)

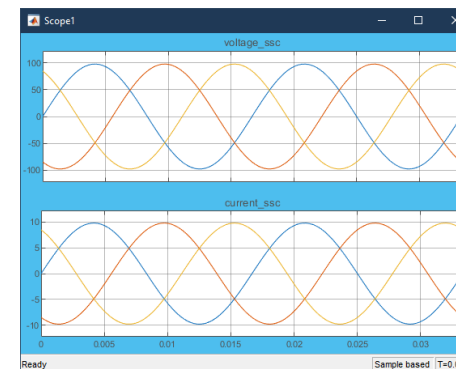
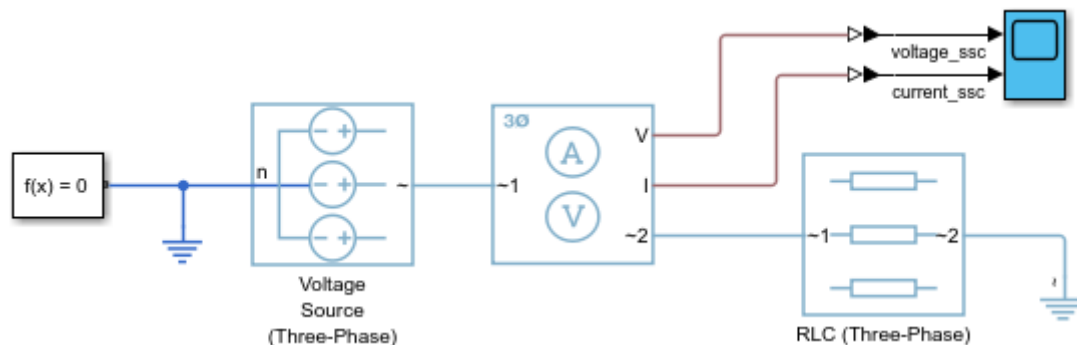


samostatný 1f prvek

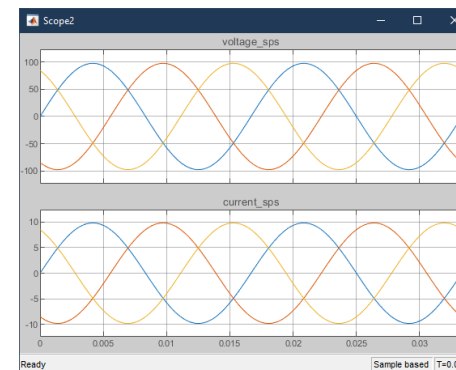
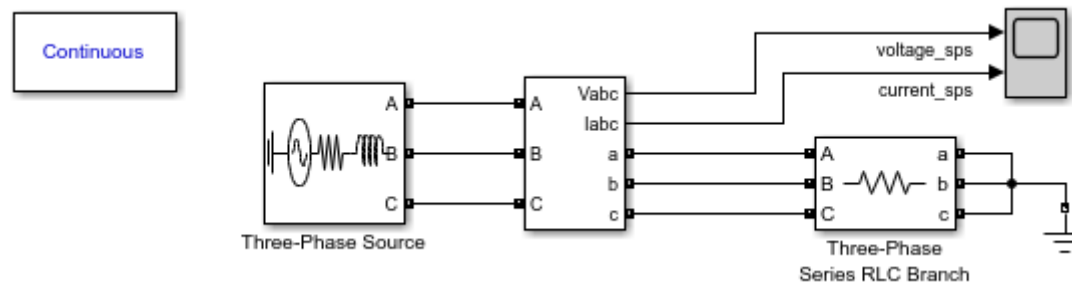
⇒ umožní modelovat nesymetrickou zátěž, apod.

# Simscape Electrical: Simscape vs. SPS

- Bloky založené na technologii Simscape

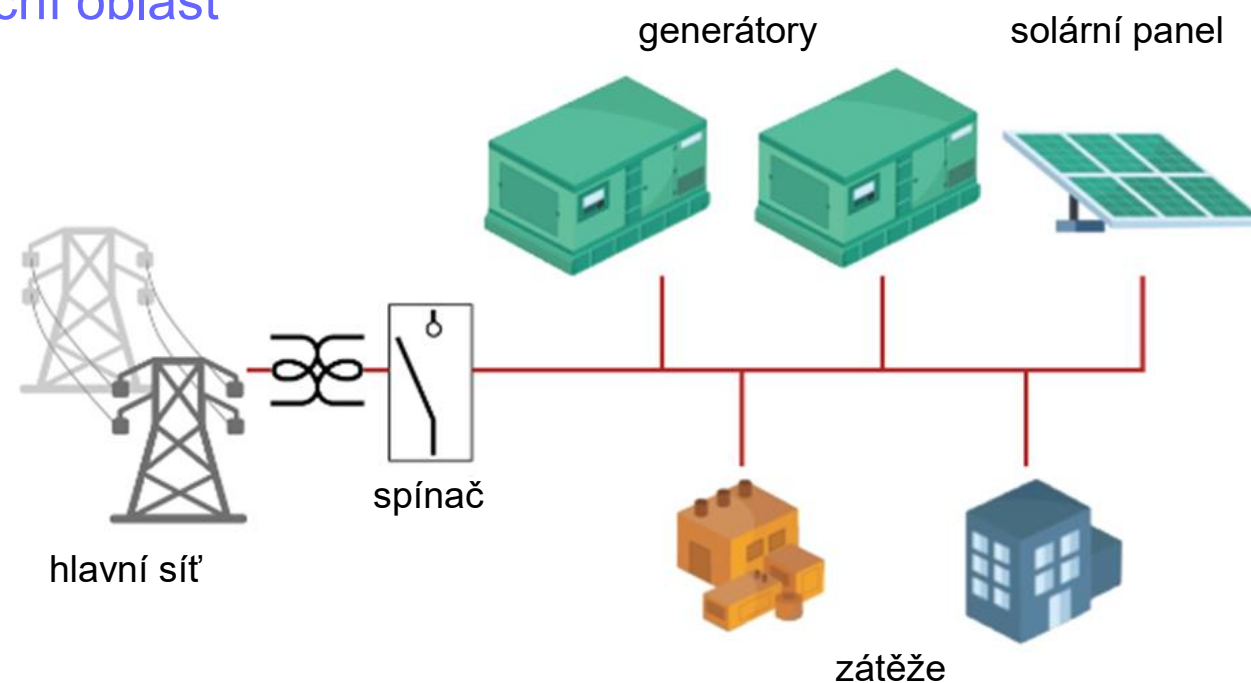


- Bloky založené na starší technologii: knihovna Specialized Power Systems



# Ukázkový příklad: Mikrosíť

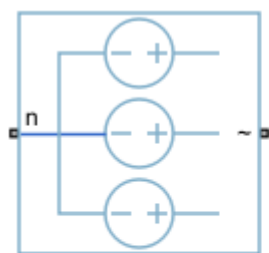
- Mikrosíť je složena z několika propojených prvků
  - dva synchronní generátory o výkonu 5 MVA
  - solární panel
  - soubor zátěží: průmyslová a rezidenční oblast
- Řídicí systémy
  - droop control
  - MPPT



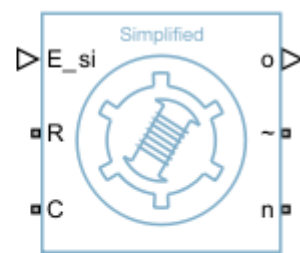


# Úroveň detailu

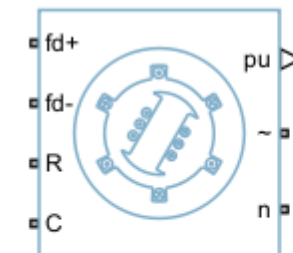
- Prvky můžeme modelovat na různé úrovni detailu
  - například jako model generátoru můžeme využít:



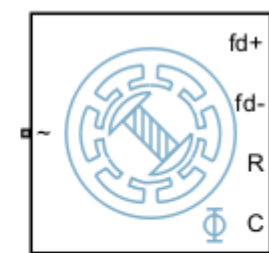
Voltage Source  
(Three-Phase)



Simplified  
Synchronous Machine



Synchronous Machine  
Salient Pole

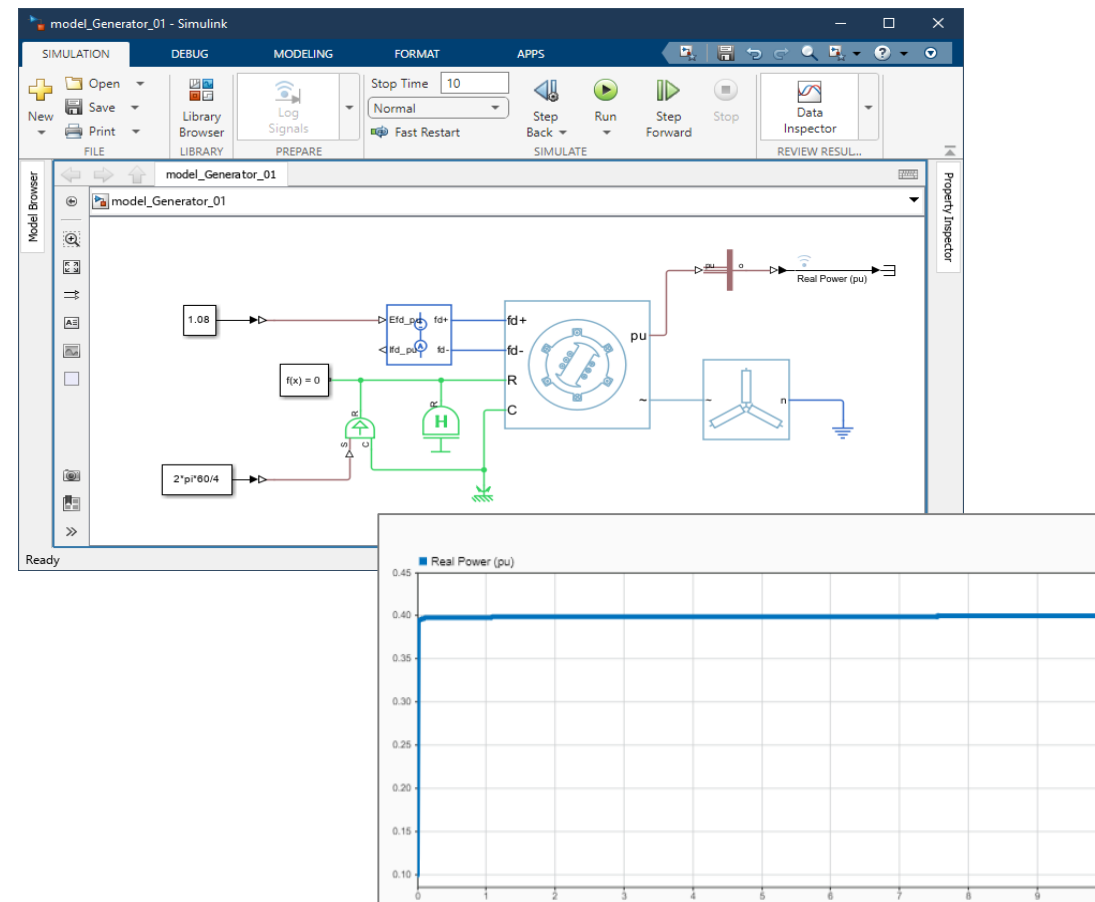


FEM-Parameterized  
Synchronous Machine

- Modely mají odlišnou sadu parametrů a zachycují odlišné dynamické jevy
- Je dobré volit přiměřenou úroveň
  - dle potřeby zadání a cílů simulačního modelu
  - detail vs. rychlost simulace

# Model synchronního generátoru v otevřené smyčce

- Elektrické prvky
  - Synchronous Machine Salient Pole
  - Synchronous Machine Field Circuit
  - Wye-Connected Load
- Mechanické prvky
  - Machine Inertia
  - Ideal Angular Velocity Source
- Měření
  - Synchronous Machine Measurement

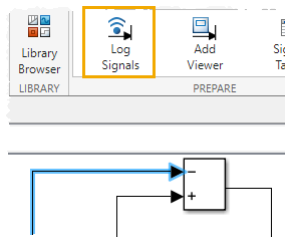


Odporová zátěž 2 MW ~ výkon generátoru 0.4 pu

# Simulation Data Inspector

- Grafický nástroj pro prohlížení výsledků simulace

- zobrazení logovaných signálů



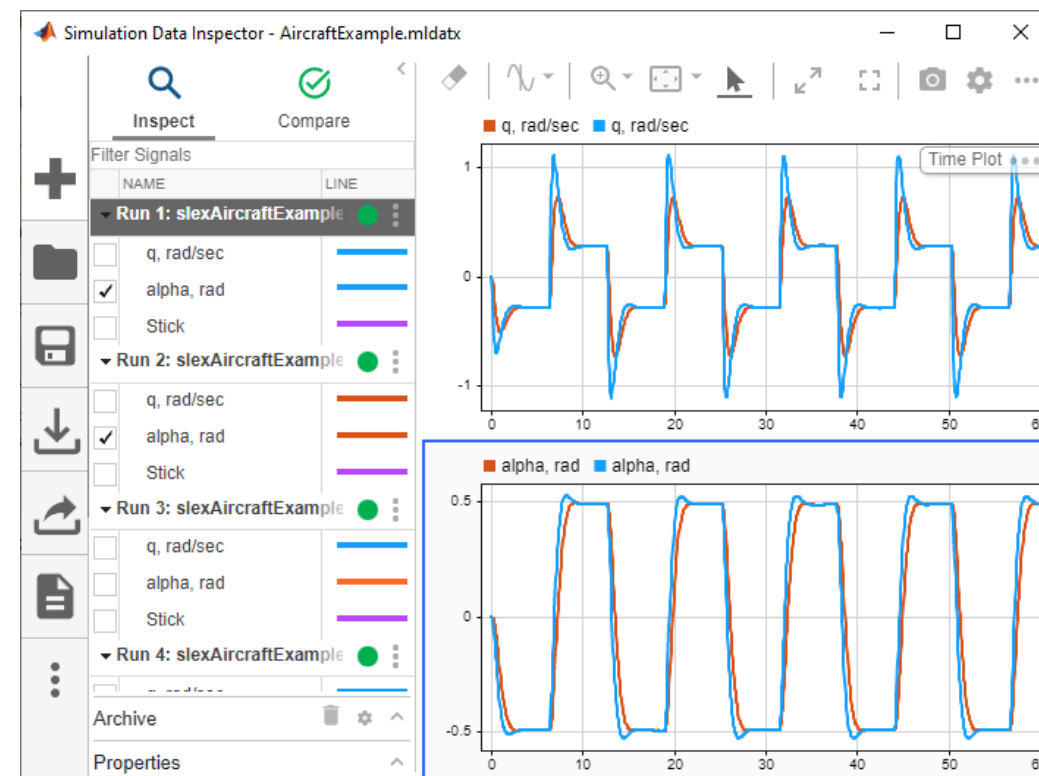
- přizpůsobení vzhledu a rozložení oken

- různé typy grafů

- zobrazení hodnot v čase

- export průběhů do workspace/souborů

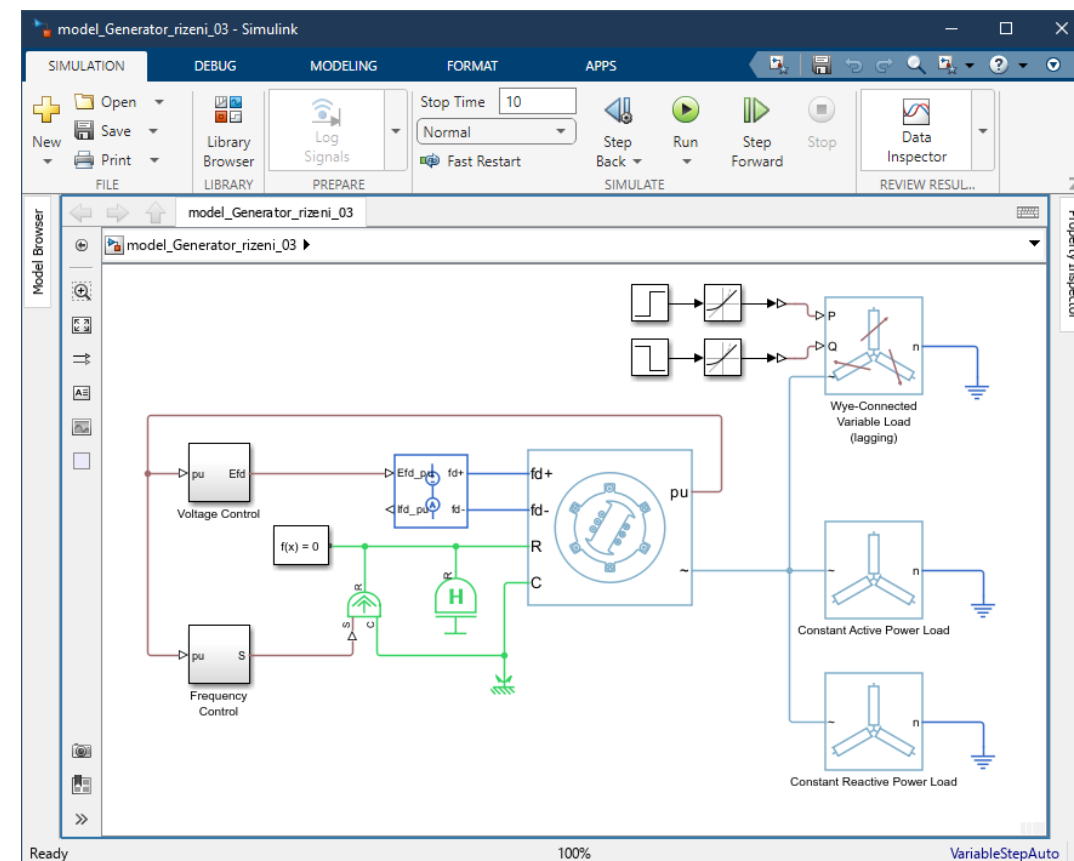
- automatické porovnání průběhů



- Umožní porovnání průběhů z více po sobě jdoucích simulací

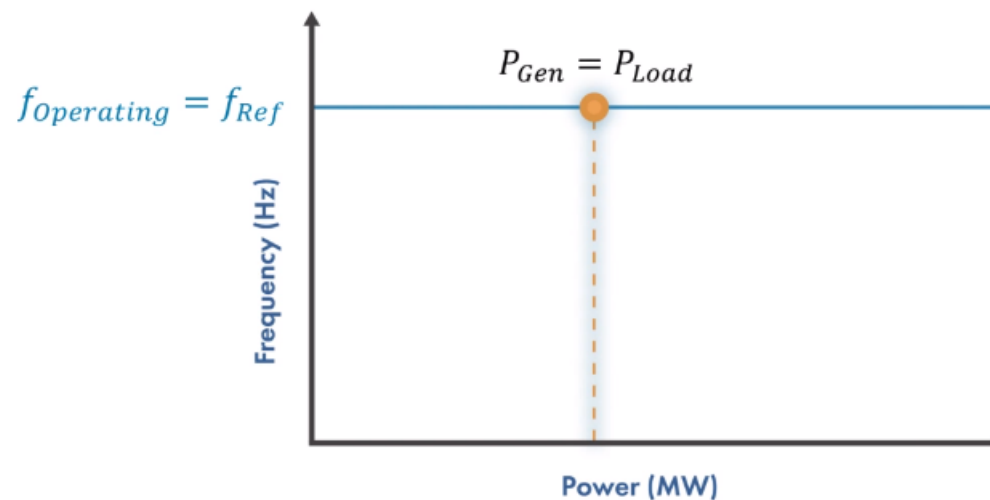
# Model synchronního generátoru s řízením

- Vyrovnaná spotřeba a dodávka energie
  - $P_{GEN} = P_{LOAD}$
  - $Q_{GEN} = Q_{LOAD}$
- Dvě řídicí smyčky
  - řídicí systém pro regulaci otáček
  - řídicí systém pro regulaci budoucího napětí
- Mechanický hnací prvek
  - Ideal Torque Source
- Simulace proměnné zátěže
  - Wye-Connected Variable Load (lagging)



# Řízení generátoru: Isochronní řízení

- Chování systému
  - při nárůstu zatížení má generátor tendenci zpomalit
  - řídicí systém zvýší točivý moment hnacího stroje, aby otáčky zůstaly na zadané hodnotě
- $\Rightarrow$  otáčky generátoru (a tím frekvence) zůstávají konstantní bez ohledu na zatížení



- Obdobně lze řídit budicí napětí pro dosažení konstantního výstupního napětí

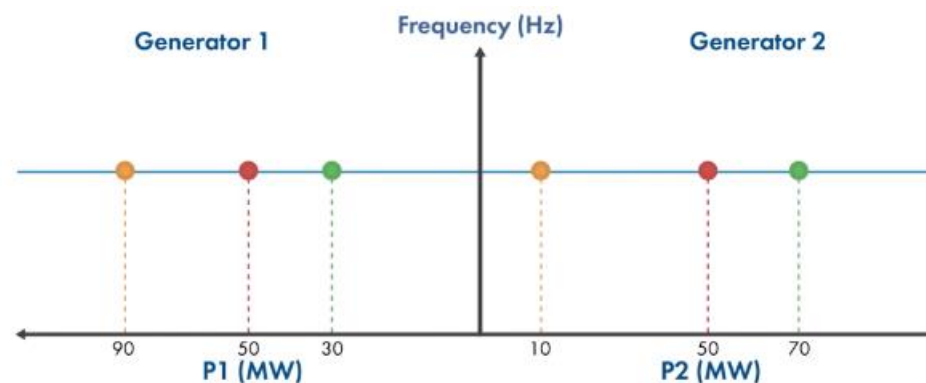
# Řízení generátoru: Isochronní řízení

- Nevýhoda isochronního řízení
  - při spojení dvou (a nebo více) zdrojů není jasně dáno rozdělení výkonu
- Oba zdroje musí pracovat na stejné frekvenci
- To lze ale dosáhnout pro libovolné nastavení výstupního výkonu

$$- 90 \text{ MW} + 10 \text{ MW} = 100 \text{ MW}$$

$$- 50 \text{ MW} + 50 \text{ MW} = 100 \text{ MW}$$

$$- 30 \text{ MW} + 70 \text{ MW} = 100 \text{ MW}$$



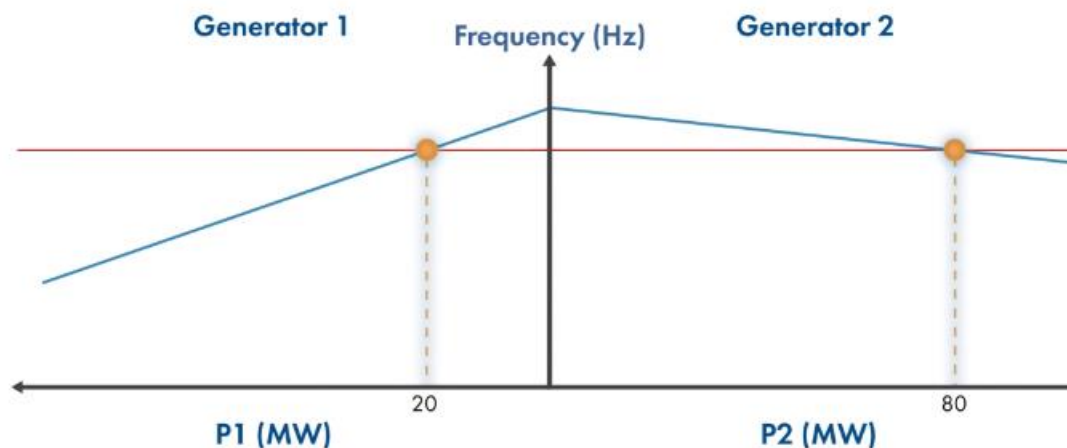
- Včetně nechtěných kombinací : 120 MW a -20 MW = 100 MW

# Řízení generátoru: Metoda Droop Control

- Definuje drobný pokles frekvence pro rostoucí hodnotu výkonu P generátoru
- Oba zdroje musí pracovat na stejné frekvenci
- $\Rightarrow$  Existuje jediný bod, kde je podmínka splněna

– 20 MW + 80 MW = 100 MW

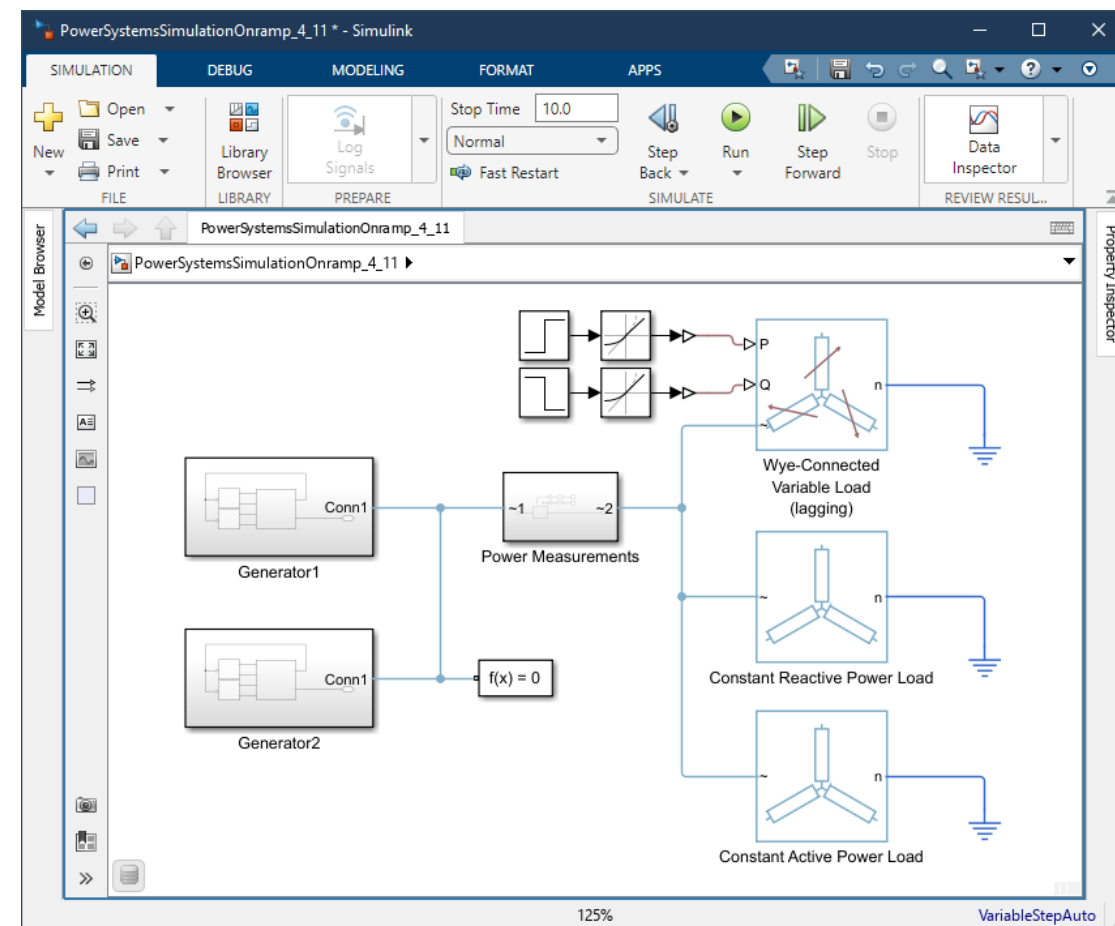
$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{D_1}{D_2}$$



- Obdobně definuje pokles výstupního napětí pro rostoucí hodnotu výkonu Q

# Model se dvěma generátory

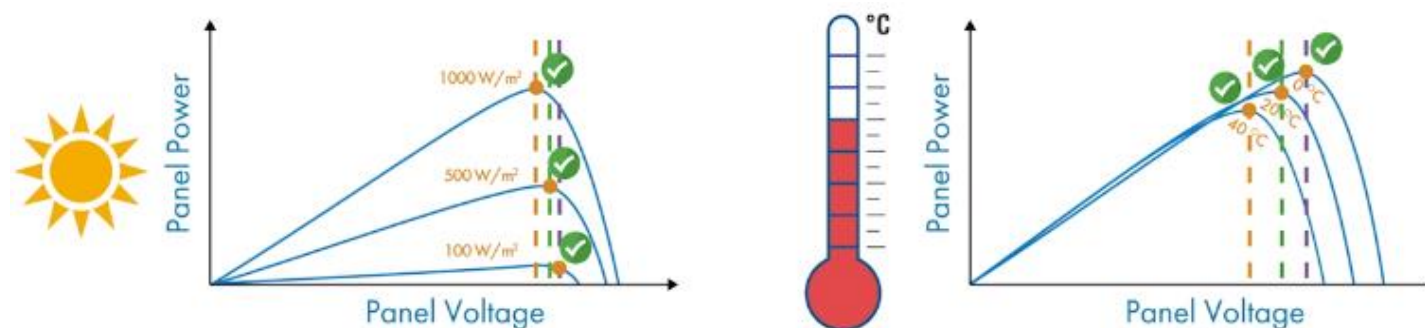
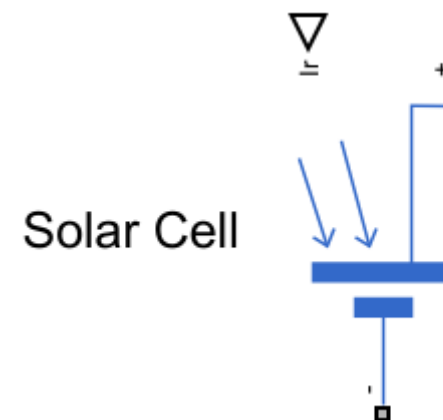
- Generátor včetně řízení jako subsystém
  - zkopírování a připojení druhého generátoru
  - stejný výkon (5 MVA)
- Metoda řízení: Droop Control
  - generátor 1: droopP1, droopQ1
  - generátor 2: droopP2, droopQ2





# Fotovoltaický článek

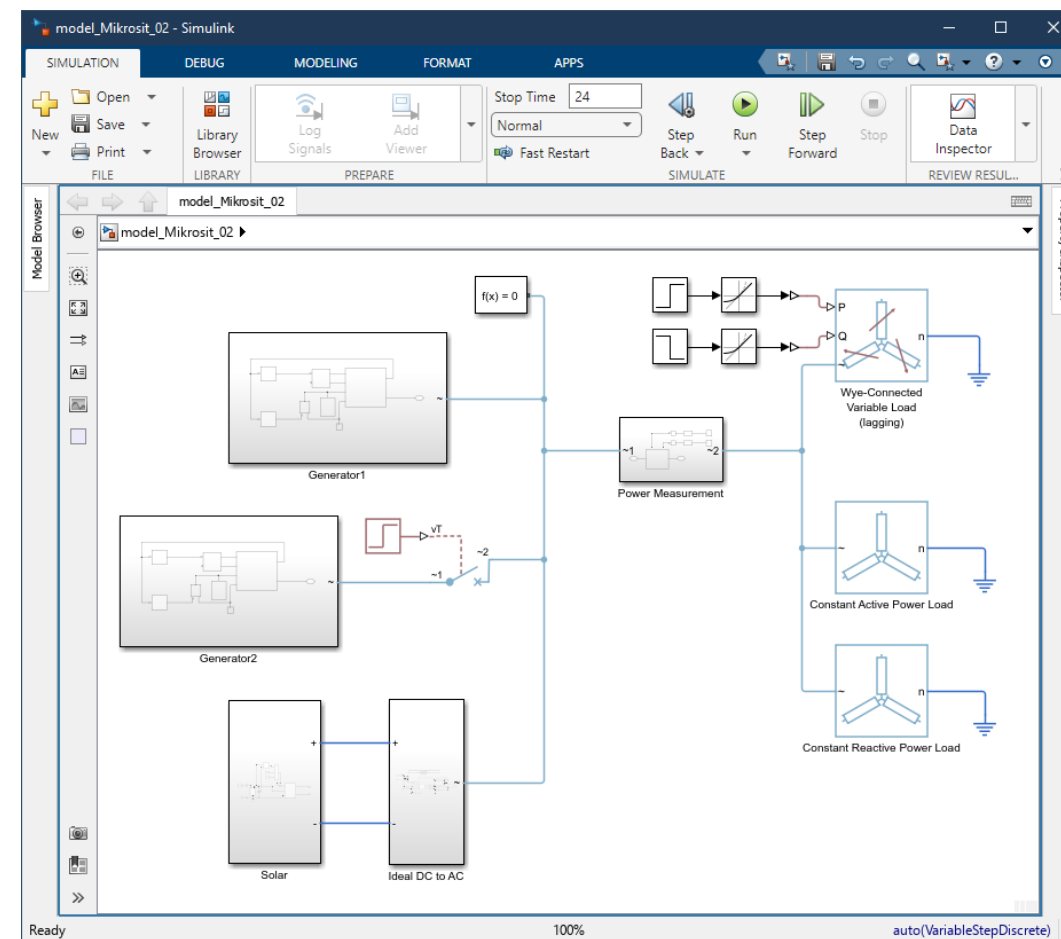
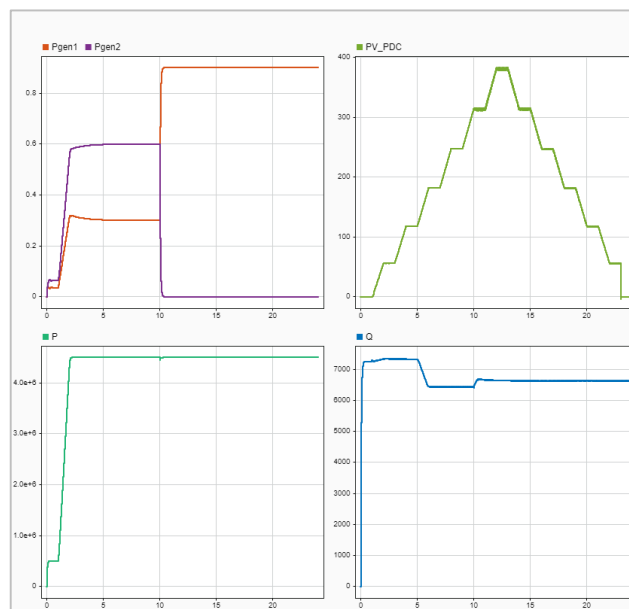
- Blok *Solar Cell*
  - zdroj stejnosměrného proudu
  - velikost osvitů dána vstupním signálem
- Řízení výkonu pomocí DC-DC měniče
  - využívá algoritmus MPPT



- K síti připojen přes DC-AC měnič

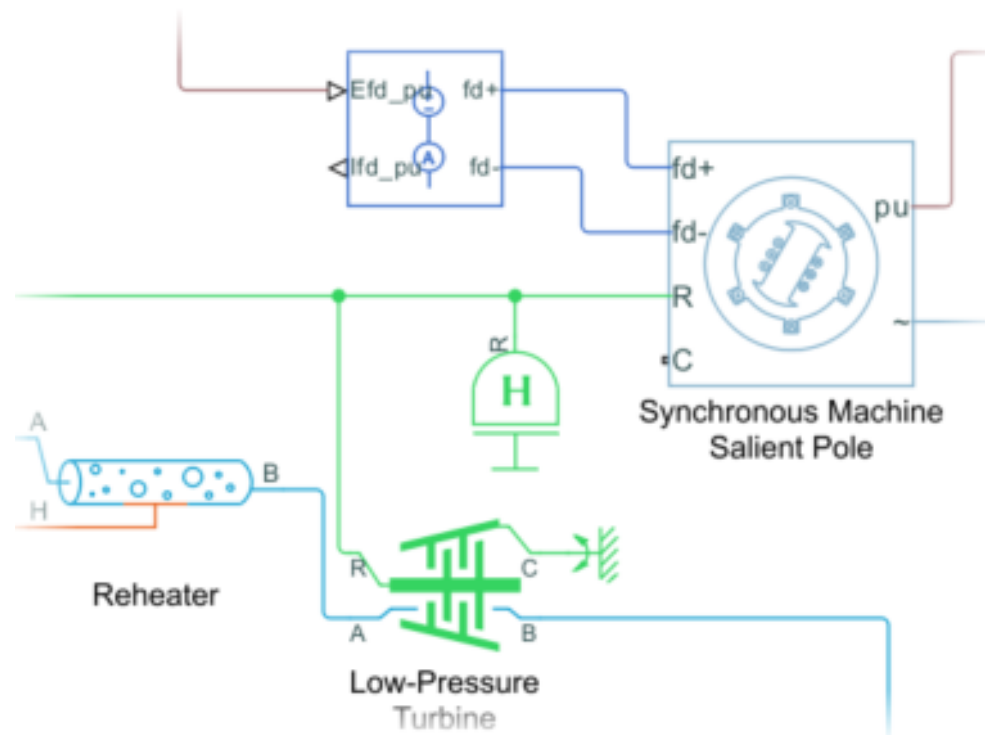
# Zapojení do mikrosítě

- Propojení prvků do společného modelu
- Simulace událostí na úrovni systémů
  - odpojení jednoho ze zdrojů
  - dodávku převezmou zbývající zdroje

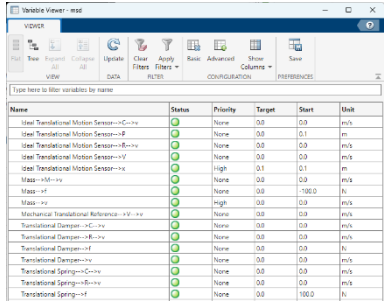
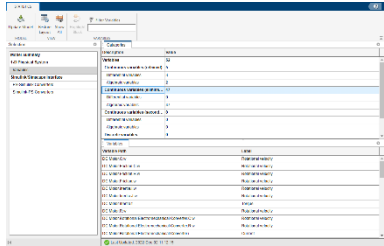
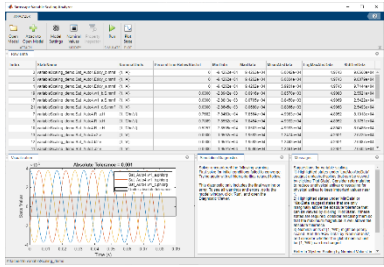
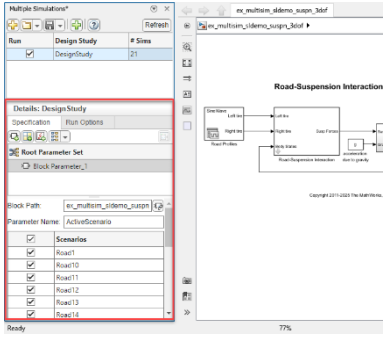
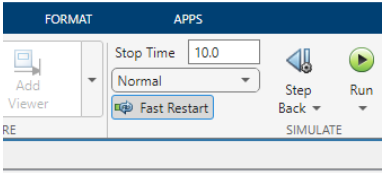
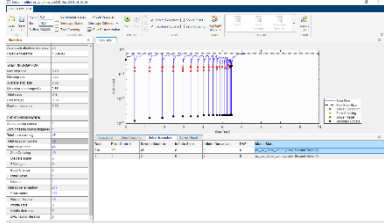
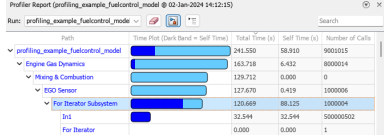
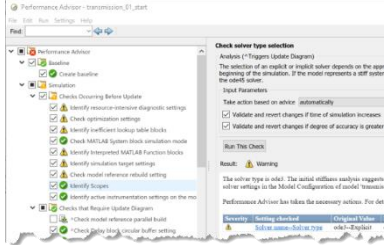
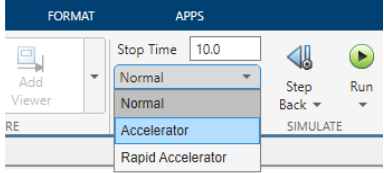
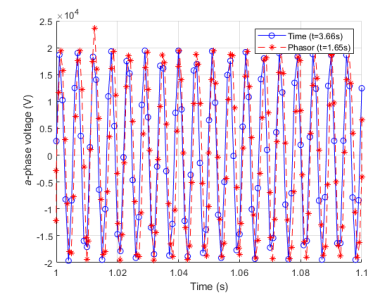


## Další možnosti modelování

- Model se soustředí na elektrickou část systému
- Dále bychom mohli vytvořit detailnější popis mechanické části generátoru
  - například model termodynamického cyklu, zachytit tepelné jevy, apod.



# 10 nástrojů pro efektivní nastavení modelu a rychlejší simulaci

<h3>Variable Viewer</h3> 	<h3>Statistics Viewer</h3> 	<h3>Variable Scaling Analyzer</h3> 	<h3>Multiple Simulations Panel</h3> 	<h3>Fast Restart</h3> 
<h3>Solver Profiler</h3> 	<h3>Simulink Profiler</h3> 	<h3>Performance Advisor</h3> 	<h3>Accelerator Mode</h3> 	<h3>Phasor Mode</h3> 

## Další typické úlohy a příklady

- [Microgrid Resynchronization with Main Grid](#)
- [Microgrid Planned Islanding from Main Grid](#)
- [IEEE 9-Bus Loadflow](#)
- [IEEE 39-Bus System](#)

## Uživatelská reference

- OMRON Develops Solar Inverter Control Algorithm for Anti-Islanding Control



## Uživatelská reference

- Sandia National Laboratories Simulates Hawaii Microgrid and Photovoltaic Systems





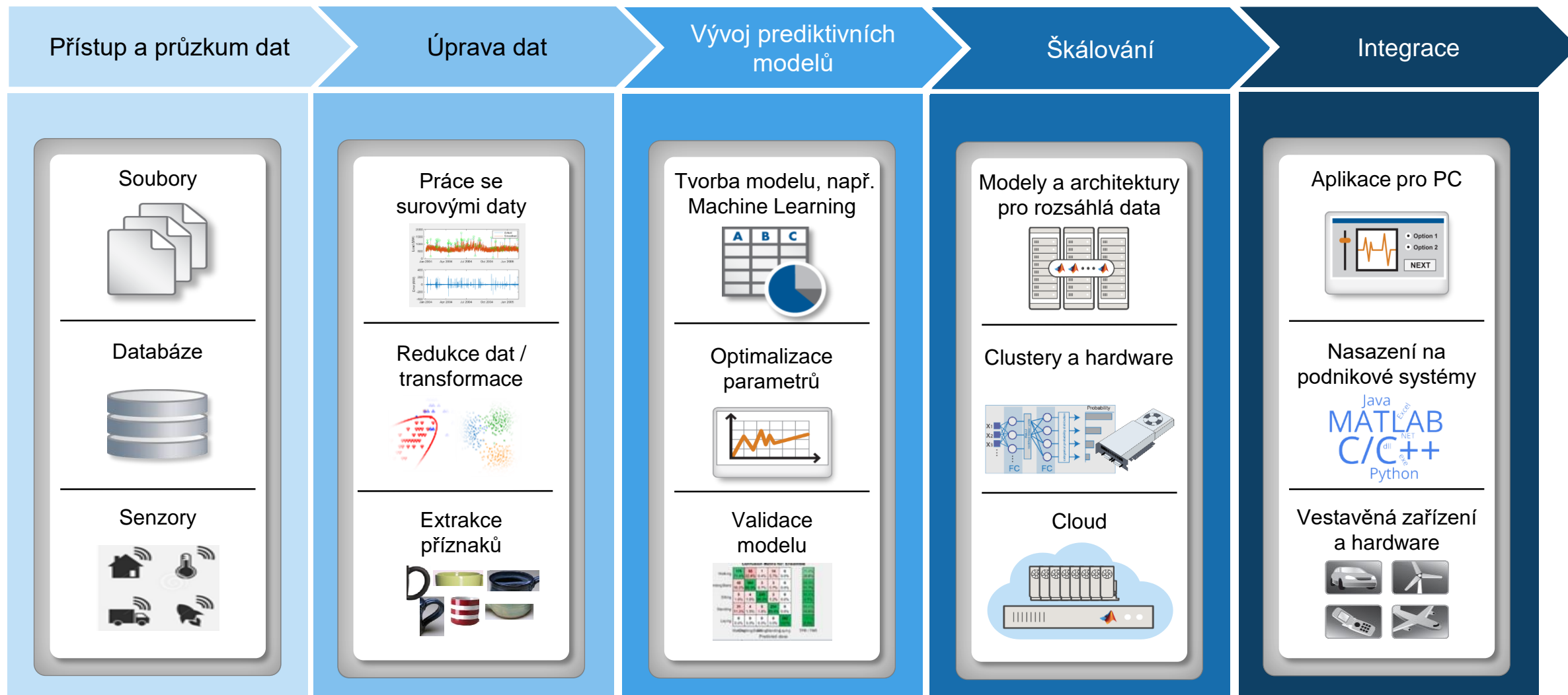
# Analýza dat

Prediktivní analytika

Techno-ekonomická analýza



# Pracovní postup při analýze dat



# Předpovídání v energetice

- Predikce zatížení
  - zlepšit provozování systému, plánování a účast na trhu
- Predikce větru
  - pochopení nejistot a rizik pro provoz systému, plánování a účast na trhu
- Predikce slunečního osvětlení
  - pochopení nejistot a rizik pro provoz systému, plánování a účast na trhu
- Predikce cen
  - zlepšení účasti na trhu a finančního zajištění

## Kdo předpovědi potřebuje?

výroba

přenos

distribuce

maloobchod s elektřinou

obchodníci s energiemi

*velcí spotřebitelé elektřiny  
(mimo energetický průmysl)*

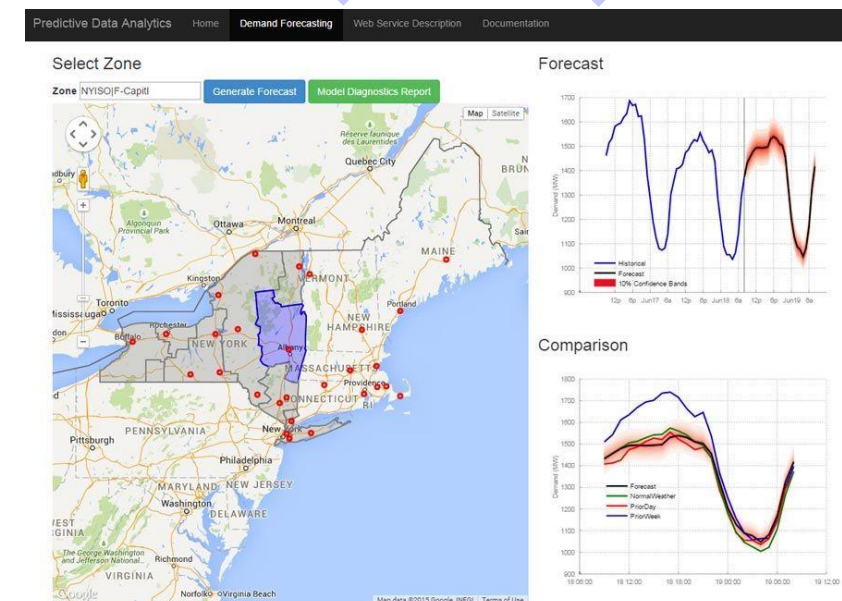
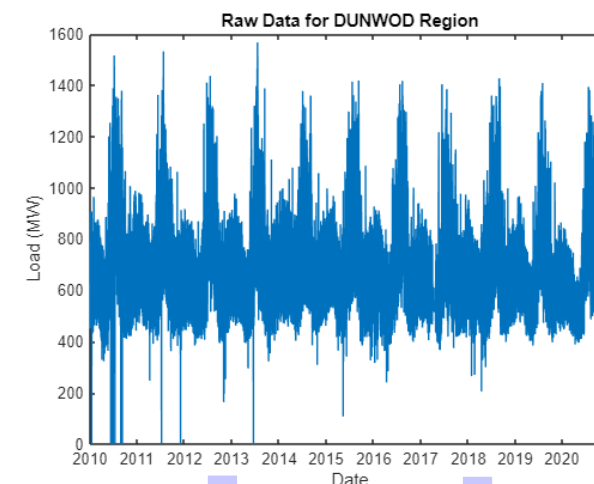
# Ukázka: Studie prognózy budoucího zatížení

- Motivace

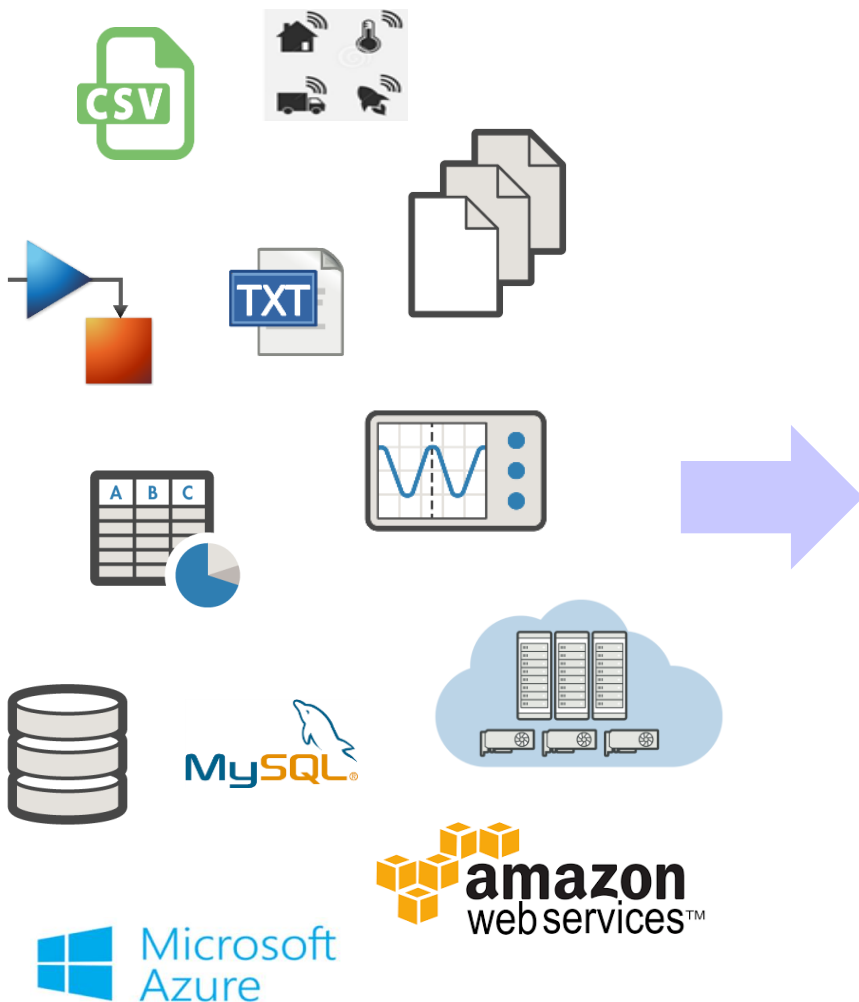
- plánování množství elektřiny, kterou budou elektrárny muset vyrobit
- vzhled do nadcházející dynamiky trhu

- Řešení

- přístup k historickým datům o zatížení a počasí
- čištění a úprava dat
- sloučení dat z více zdrojů
- modelování časových řad pro extrakci důležitých prediktorů
- trénování modelu strojového učení pro predikci budoucího zatížení



# Krok 1: Přístup k historickým datům zatížení a počasí



Import - C:\MATLAB\StormEvents\_Mass2015.csv

IMPORT VIEW

Delimited Column delimiters: Comma Range: A2:BA8772 Output Type: Table

Replace unimportable cells with NaN

Exclude rows with Blank cells

StormEvents\_Mass2015.csv

	month_name	event_type	cz_type	cz_fips	cz_name	wfo	end_date_ti...	cz_timezone	injuries_dir...	injuries_indi...	deaths_dire...	deaths_indi...	damage_pr...	dama
1	January	Winter Wea...	Z	1	NORTHER...	ALY	04-Jan-201...	EST-5	0	0	0	0		
2	January	High Wind	Z	10	EASTERN H...	BOX	05-Jan-201...	EST-5	0	0	0	0	0.00K	0.00K
3	January	Strong Wind	Z	12	SOUTHERN...	BOX	05-Jan-201...	EST-5	0	0	0	0	7.50K	0.00K
4	January	Strong Wind	Z	8	WESTERN ...	BOX	05-Jan-201...	EST-5	0	0	0	0	5.00K	0.00K
5	January	High Wind	Z	16	EASTERN N...	BOX	05-Jan-201...	EST-5	0	0	0	0	2.00K	0.00K
6	January	Strong Wind	Z	13	WESTERN ...	BOX	05-Jan-201...	EST-5	0	0	0	0	15.00K	0.00K
7	January	Strong Wind	Z	5	WESTERN ...	BOX	05-Jan-201...	EST-5	0	0	0	0	20.00K	0.00K
8	January	Strong Wind	Z	19	EASTERN P...	BOX	05-Jan-201...	EST-5	0	0	0	0	15.00K	0.00K
9	January	Strong Wind	Z	17	NORTHER...	BOX	05-Jan-201...	EST-5	0	0	0	0	12.50K	0.00K
10	January	Strong Wind	Z	14	SOUTHEAS...	BOX	05-Jan-201...	EST-5	0	0	0	0	2.00K	0.00K
11	January	High Wind	Z	15	SUFFOLK	BOX	05-Jan-201...	EST-5	0	0	0	0	0.00K	0.00K

# Krok 1: Přístup k historickým datům zatížení a počasí

- Využívejte datový typ, který je pro danou úlohu nejvhodnější
- `table`
  - tabulární data smíšeného typu
  - flexibilní indexování, organizace dat
- `timetable`
  - tabulární data s časovými značkami
  - indexování podle času, časového rozsahu
  - změny rozložení časů, synchronizace
- `datetime`
  - reprezentace daného časového okamžiku
- `categorical`
  - diskrétní nečíselná data

```
data(timerange("01-Jan-2017", "17-Mar-2017"), :)
```

```
ans = 161x4 timetable
```

	begin_timestamp	state	event_type	event_narrative	damage_total
1	21-Jan-2017 13:02:00	GEORGIA	Thunderstorm...	"a tree was blown d...	0
2	21-Jan-2017 05:14:00	ALABAMA	Tornado	"the tornado first tou...	750
3	05-Jan-2017 04:00:00	OHIO	Winter Weather	"the county garage ...	0
4	05-Mar-2017 18:00:00	OREGON	Snow	"there were reports ...	0
5	04-Feb-2017 12:15:00	WYOMING	Wind	"the wydot sensor a...	0
6	08-Feb-2017 08:00:00	INDIANA	Winter Weather	"the observers locat...	0
7	18-Jan-2017 18:00:00	CALIFORNIA	Winter Weather	"a spotter in moonri...	0
8	07-Feb-2017 07:00:00	CALIFORNIA	Flood	"major flooding from...	0
9	13-Jan-2017 15:00:00	KANSAS	Ice Storm	"ice accretion was 3...	0
10	02-Jan-2017 00:00:00	NEW YORK	Wind	"the airport station...	50

**Join Tables**

joinedData = Combine locdata and wsdata using join

▼ Select data

Left table:  Right table:

Merging variable:  Merging variable:  - +

- +

▼ Specify join

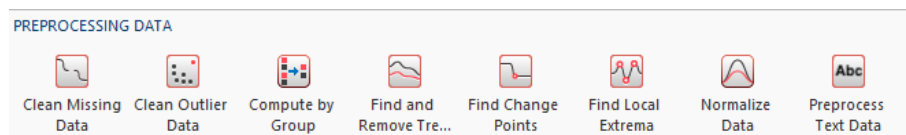
Outer join
  Left outer join
  Right outer join
  Inner join
  Join

▼ Display results

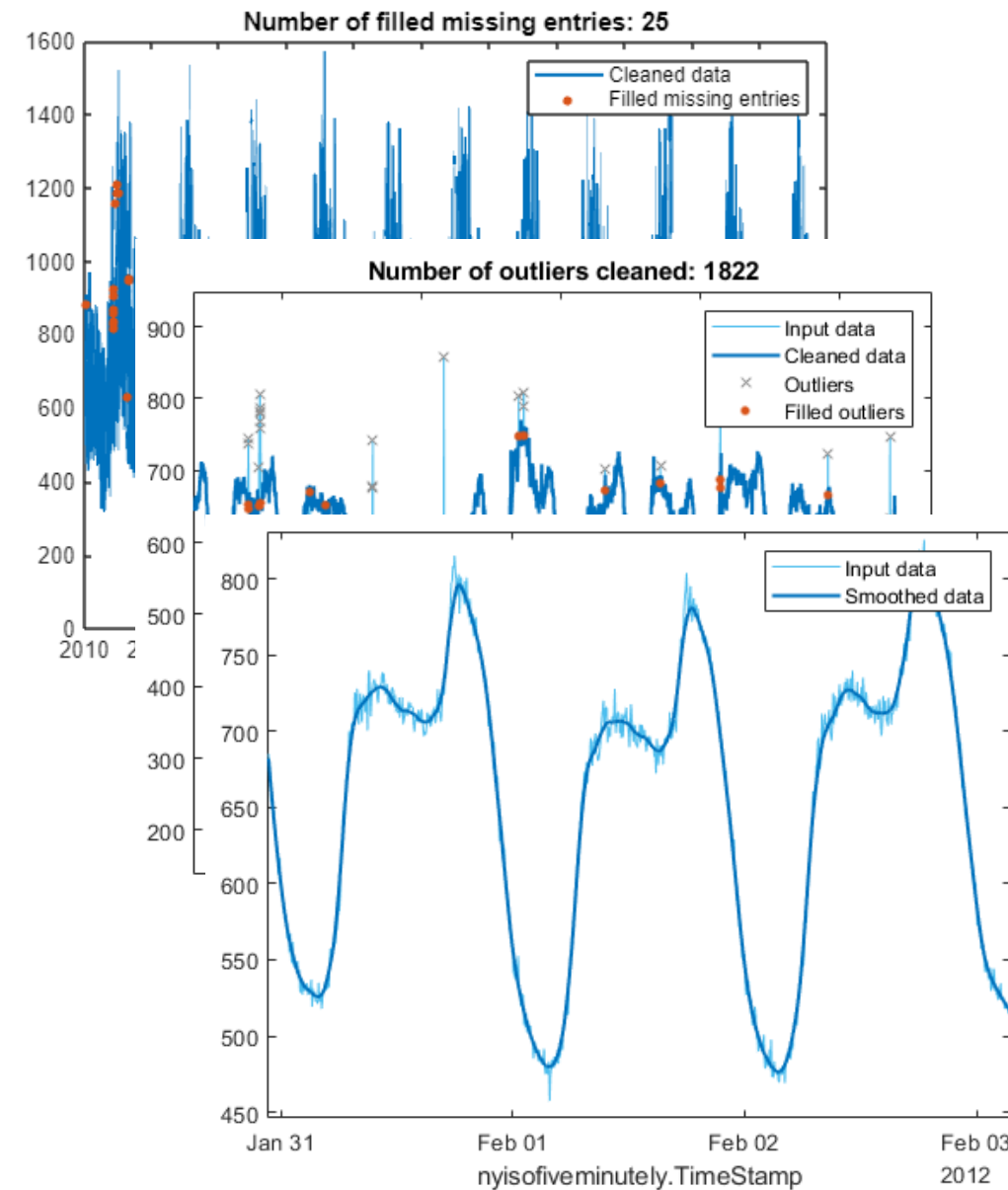
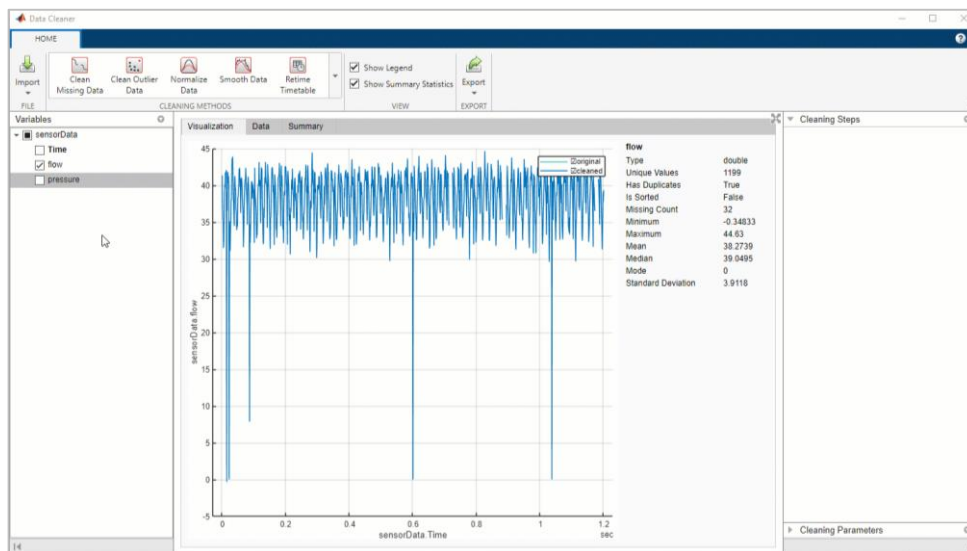
Input tables  Output table

# Krok 2: Úprava dat

- Čištění
  - připravené funkce (filloutliers, smoothdata, ...)
  - Tasky v prostředí Live Editor

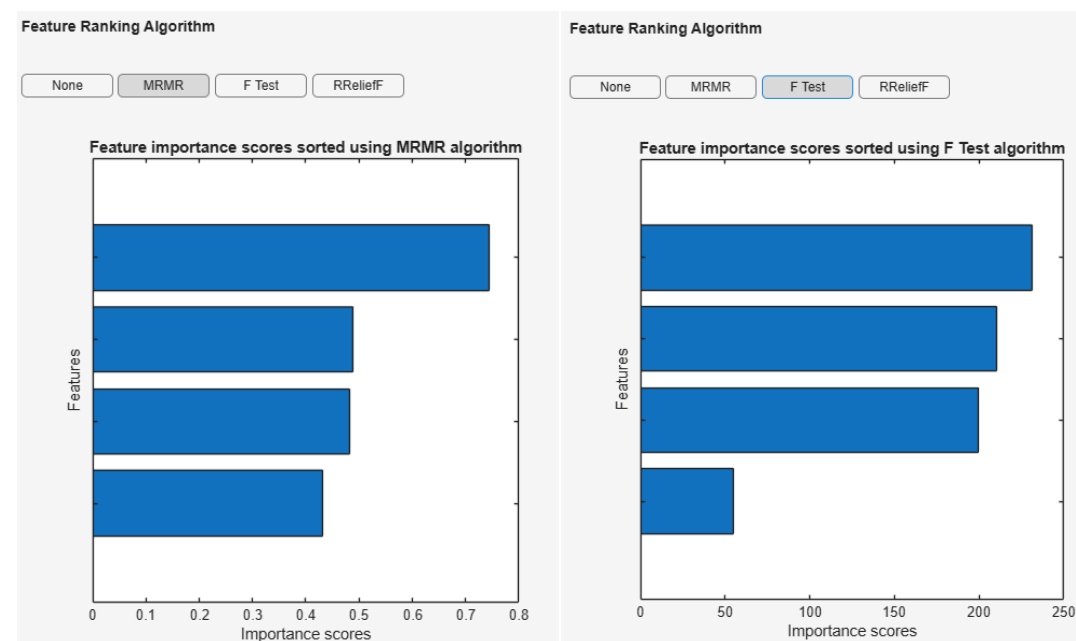


- grafická aplikace Data Cleaner



## Krok 2: Úprava dat

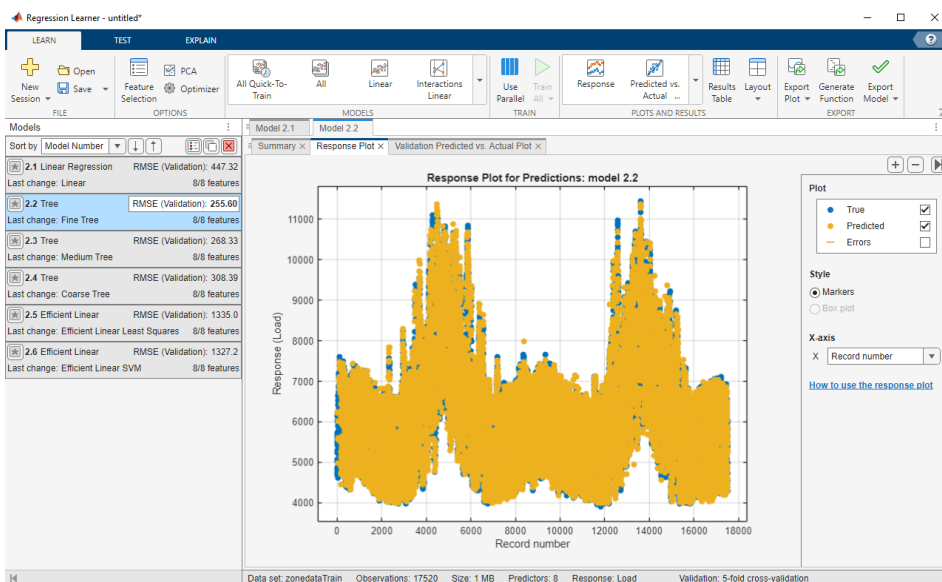
- Výběr vhodných prediktorů
  - výběr prediktorů z dostupných dat
  - posouzení relevance jednotlivých prediktorů vůči predikované veličině
  - MRMR, F Test, RReliefF
- Odvození nových prediktorů
  - PCA
  - uživatelské funkce



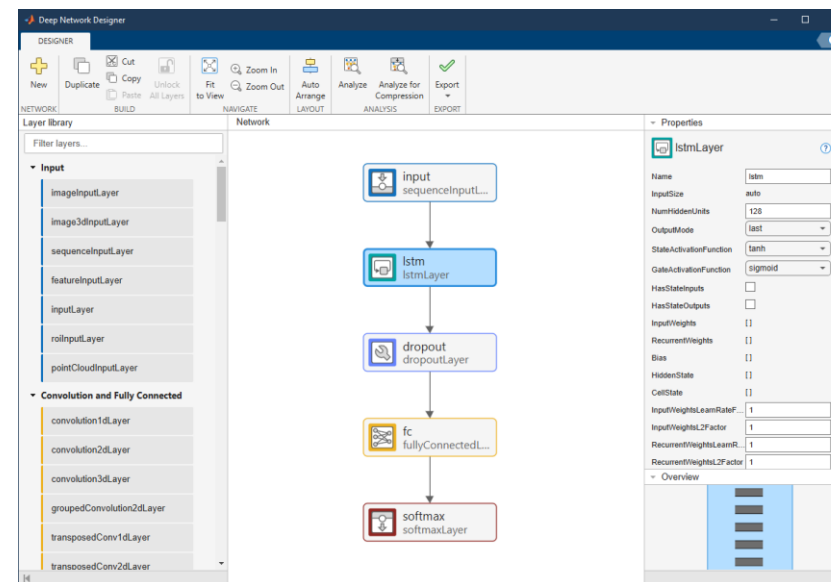
# Krok 3: Vývoj prediktivních modelů

- Výběr, učení a optimalizace hyperparametrů modelu
- Grafické aplikace
  - Regression Learner / Deep Network Designer / Experiment Manager

Machine learning



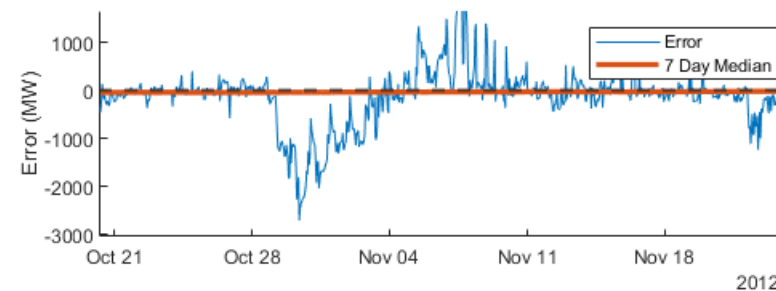
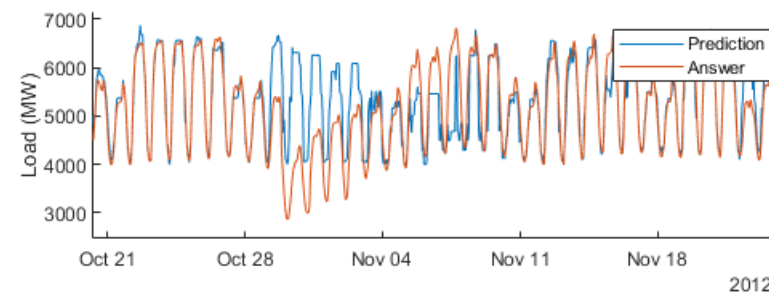
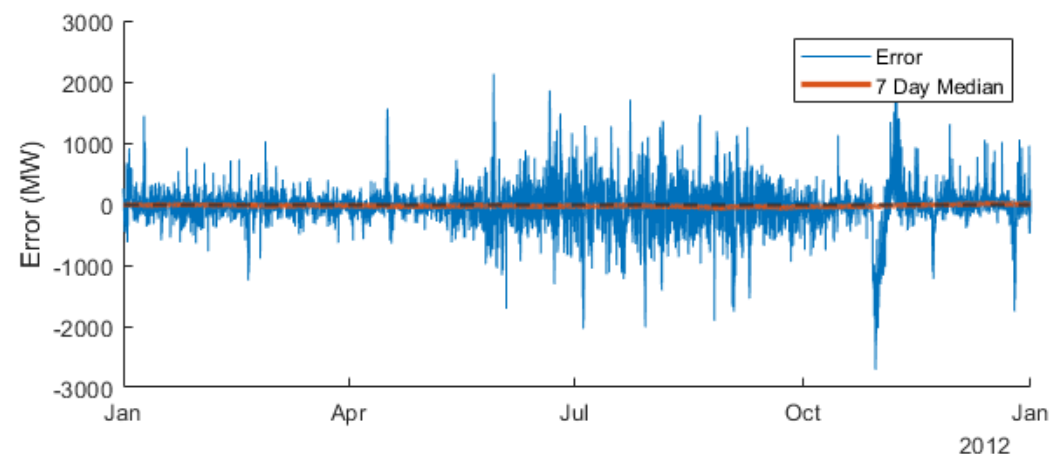
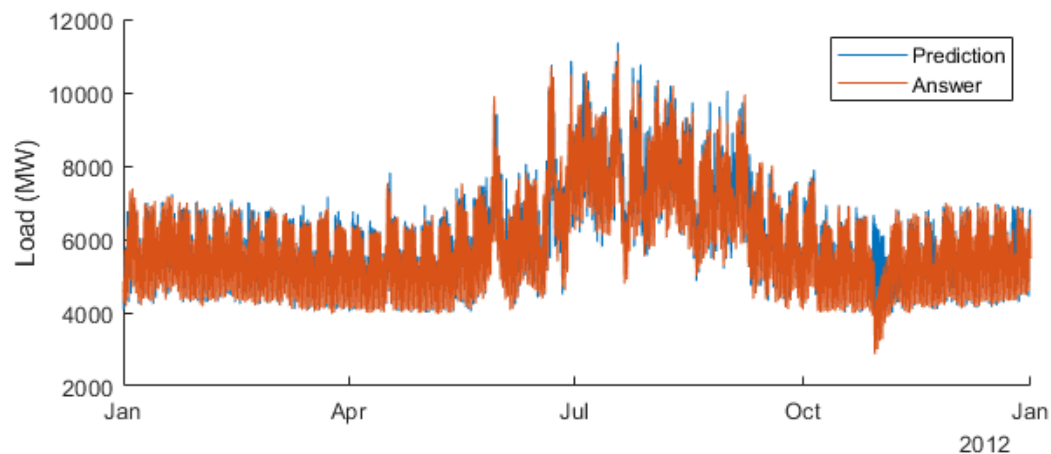
Deep learning



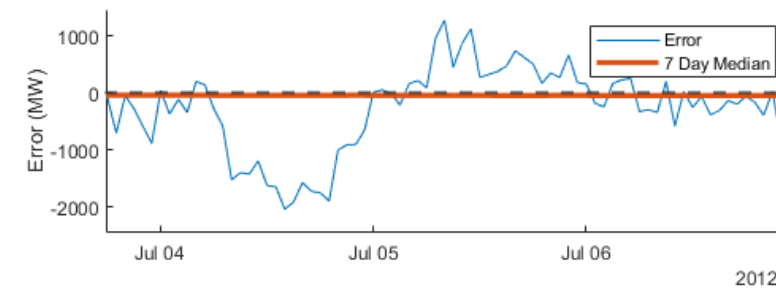
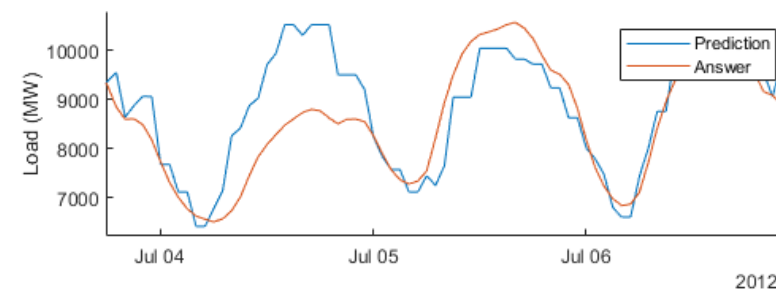


# Krok 3: Vývoj prediktivních modelů

- Odhad budoucího zatížení



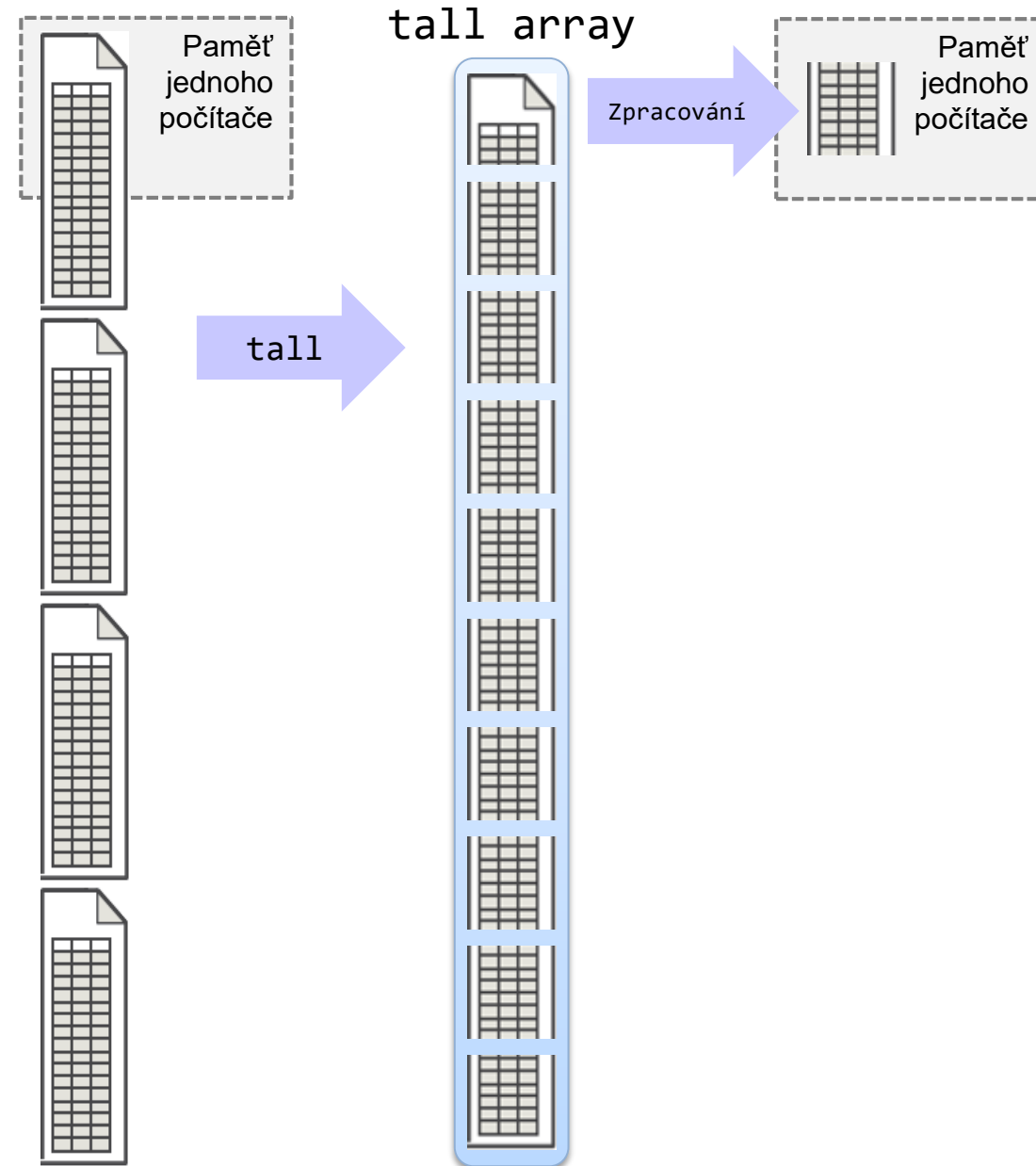
Hurikán



Dan nezávislosti

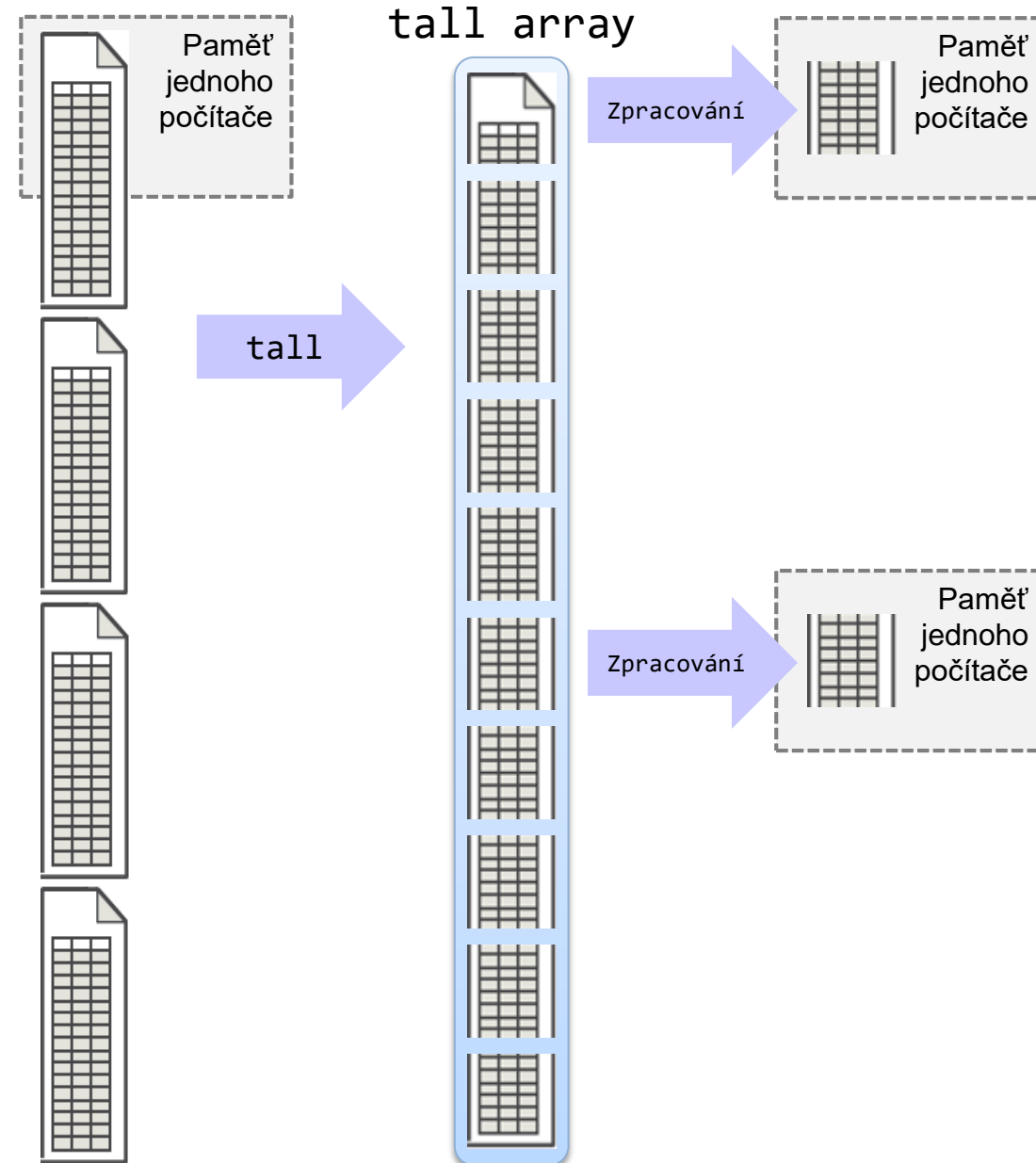
## Krok 4: Škálování

- Datový typ tall array
  - speciální typ
  - určen pro manipulaci z rozsáhlými daty
- Dělení dat
  - automaticky rozděljuje data na malé „bloky“, které se vejdou do paměti
- Výpočet s tall array
  - prochází datovou sadu „blok po bloku“
  - výpočetní kód je stejný jako u běžných polí



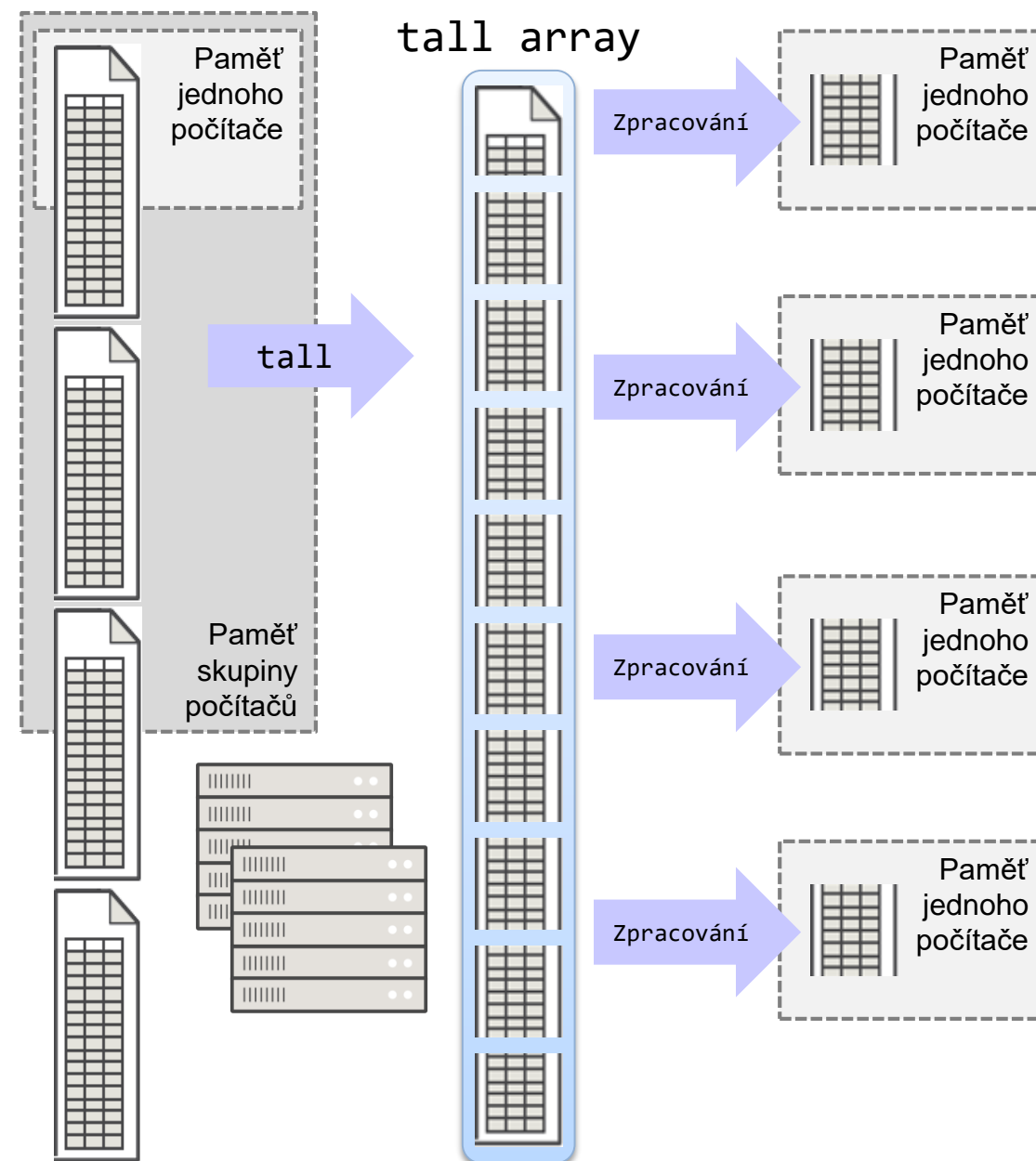
# Krok 4: Škálování

- Paralelní výpočty a tall array
  - Parallel Computing Toolbox
- Zpracuje několik „bloků“ najednou



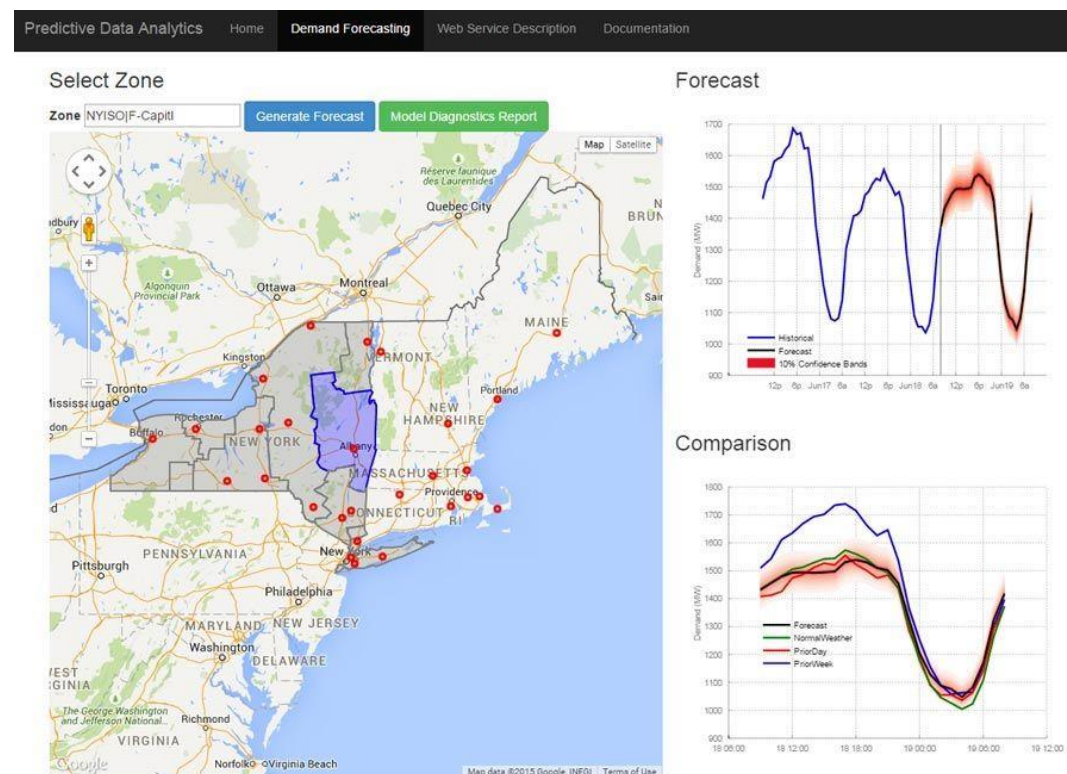
## Krok 4: Škálování

- Paralelní výpočty a tall array
  - Parallel Computing Toolbox
- Zpracuje několik „bloků“ najednou
- Možnost škálování do clusterů
  - MATLAB Parallel Server



# Krok 5: Integrace a nasazení modelu

- Nasazení ve formě interaktivní webové aplikace



- Celý postup příkladu viz.:

## Uživatelská reference

- EDP Renewables Develops Revenue Forecasting and Risk Analysis Tools for Wind Farms



# Uživatelská reference

- Eaton India Innovation Center Accelerates Solar Energy Predictions with MATLAB

Eaton DERMS Offerings



The new power landscape  
EVERYTHING AS A GRID

Enabling customers to safely add more renewables, storage and electrical vehicle infrastructure to their energy mix.

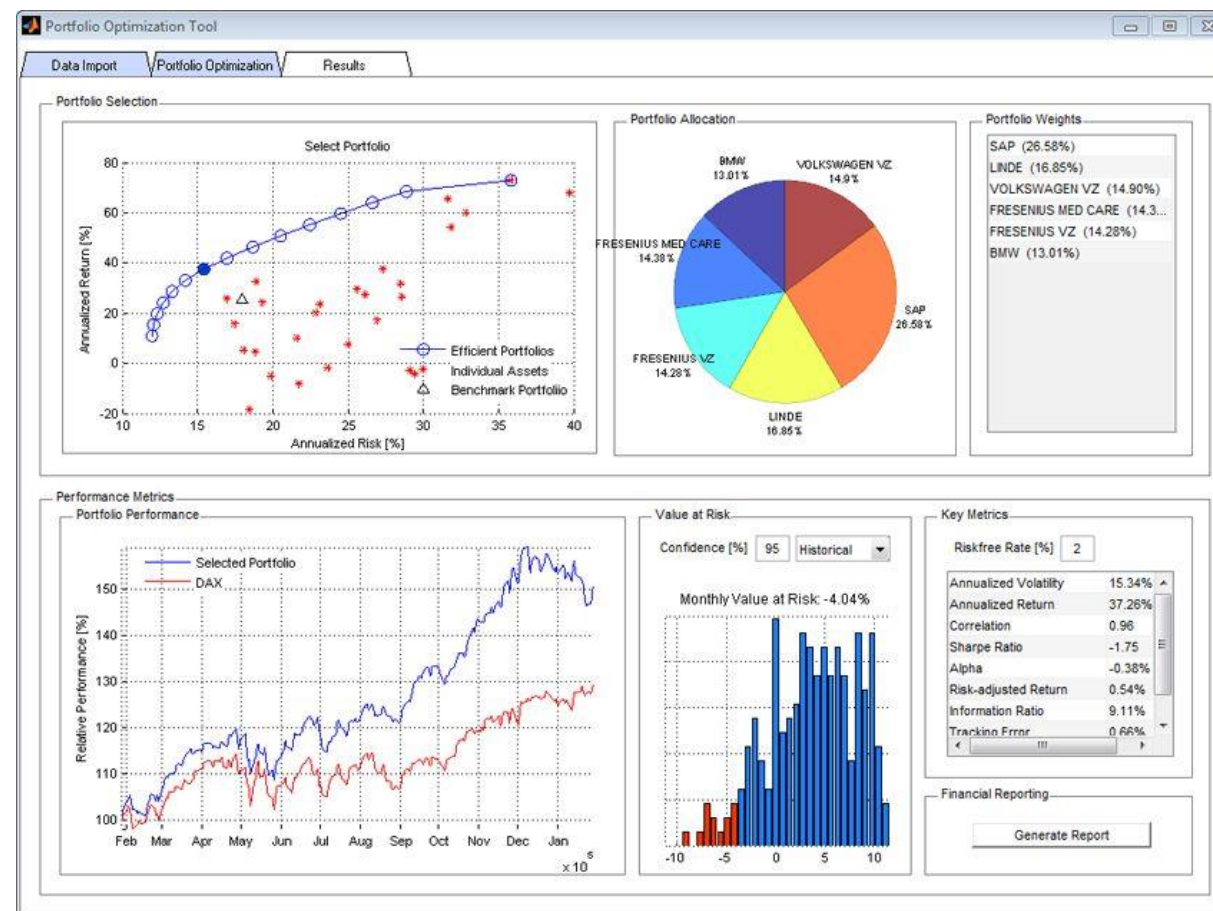
MATLAB EXPO





# Obchodování s energií a řízení rizik

- Import a vizualizace dat
- Vývoj prediktivních modelů
  - poptávka, ceny, tržby
- Monte Carlo simulace
  - hodnocení a posouzení rizik
- Nasazení prognostiky
  - podnikové systémy a cloud
- Propojení s živými daty
  - regionální trhy s elektřinou
  - meteorologická data
  - další poskytovatelé dat





# Techno-ekonomické analýzy

- Propojení technických a ekonomických aspektů
- Data
  - historická data, informace o cenách
- Podmínky
  - dostupnost zdrojů, technologická omezení
- Typické úlohy
  - optimalizační úlohy k zajištění efektivního provozu
  - řízení zdrojů



Děkuji za pozornost