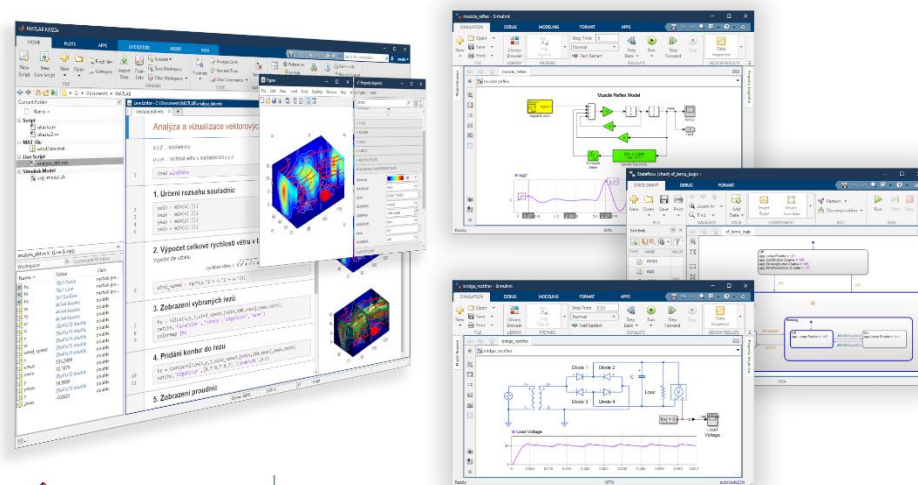


MATLAB a Simulink Master Class: Vývoj a analýza elektrických systémů s využitím modelů



Jaroslav Jirkovský
jirkovsky@humusoft.cz

www.humusoft.cz

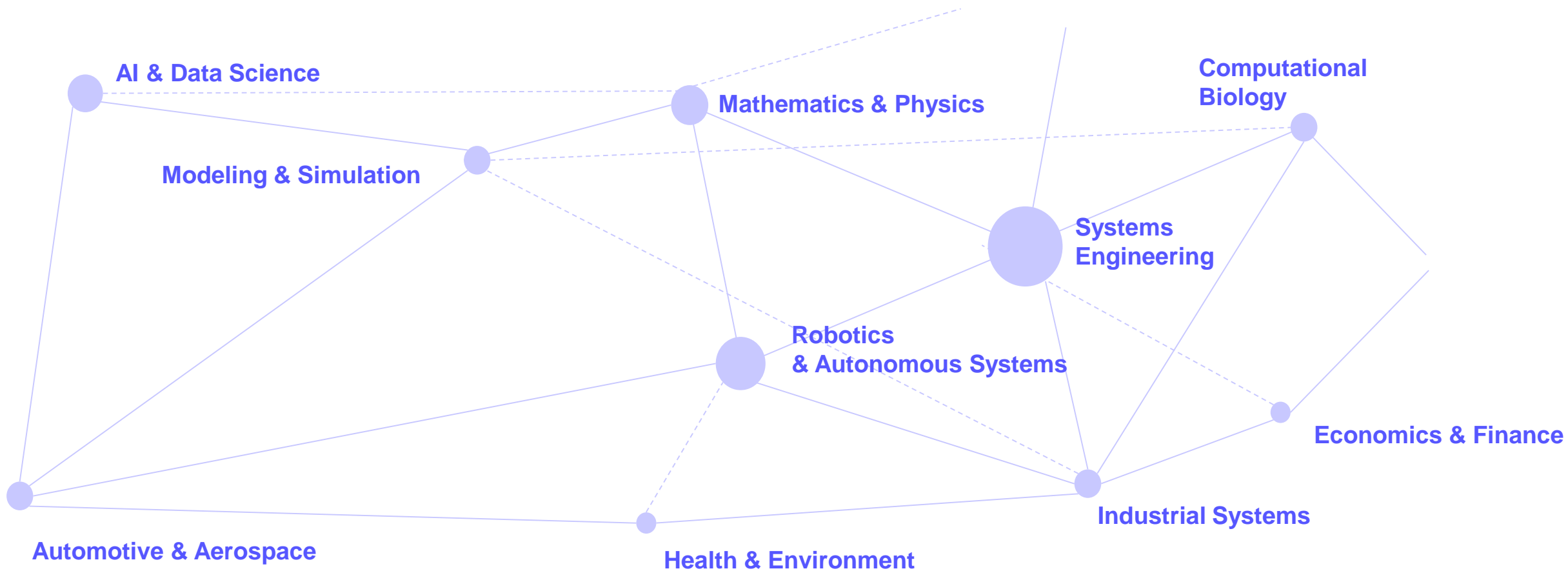
info@humusoft.cz

www.mathworks.com

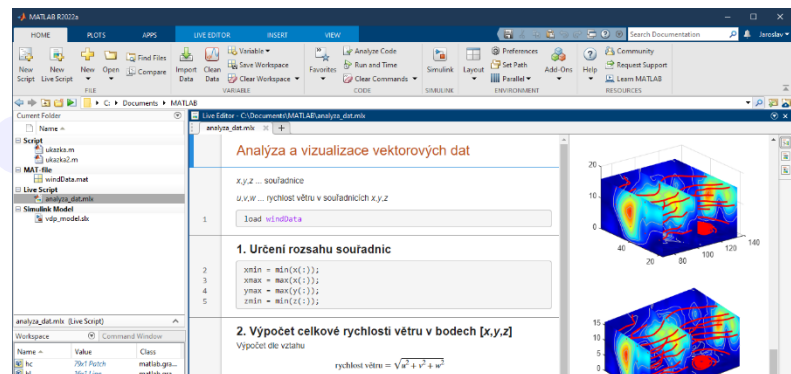
Obsah

- Přístupy k modelování a simulaci
 - modelování rovnic vs. fyzikální modelování
 - identifikace neznámých parametrů
- Modelování elektrických a energetických systémů
 - 1f a 3f systémy
- Návrh řídicích systémů
 - propojení modelů soustav s řídicími algoritmy
 - např. MPPT, Droop Control

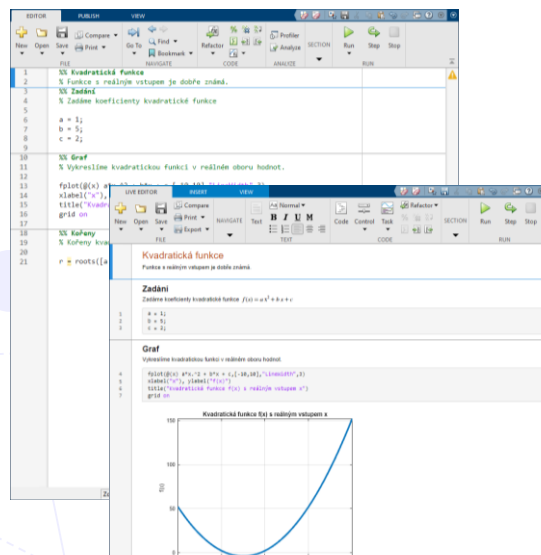
Co je MATLAB



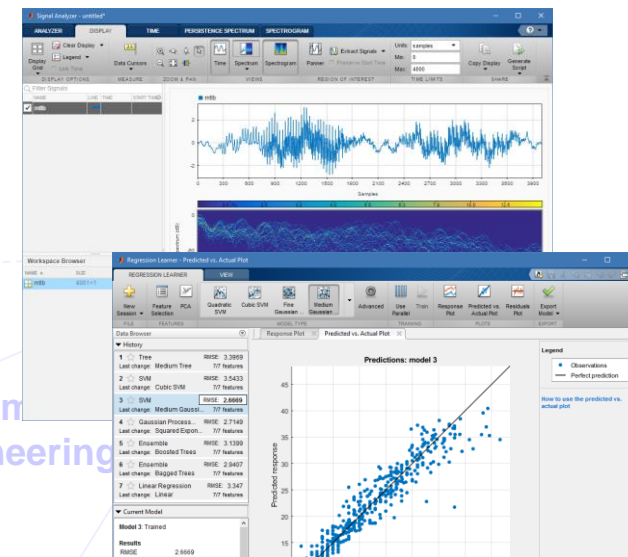
Co je MATLAB



- inženýrský nástroj
- interaktivní prostředí
- vědecké a technické výpočty



- výpočetní nástroje
- otevřený systém



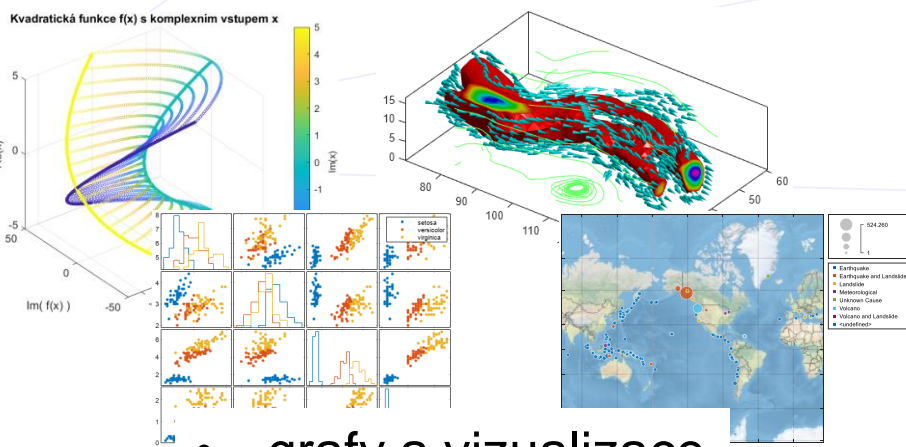
System Engineering

- grafické aplikace (Apps)

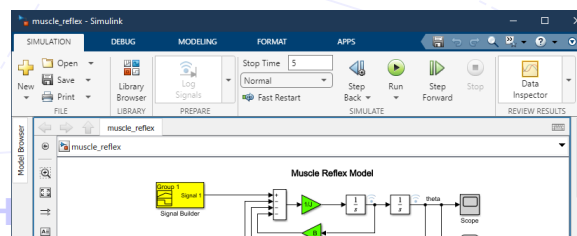
Economics & Finance

Industrial Systems

- 10 000+ výpočetních funkcí
- jednotná dokumentace
- propojení s externím hw / sw
- vývoj samostatných aplikací



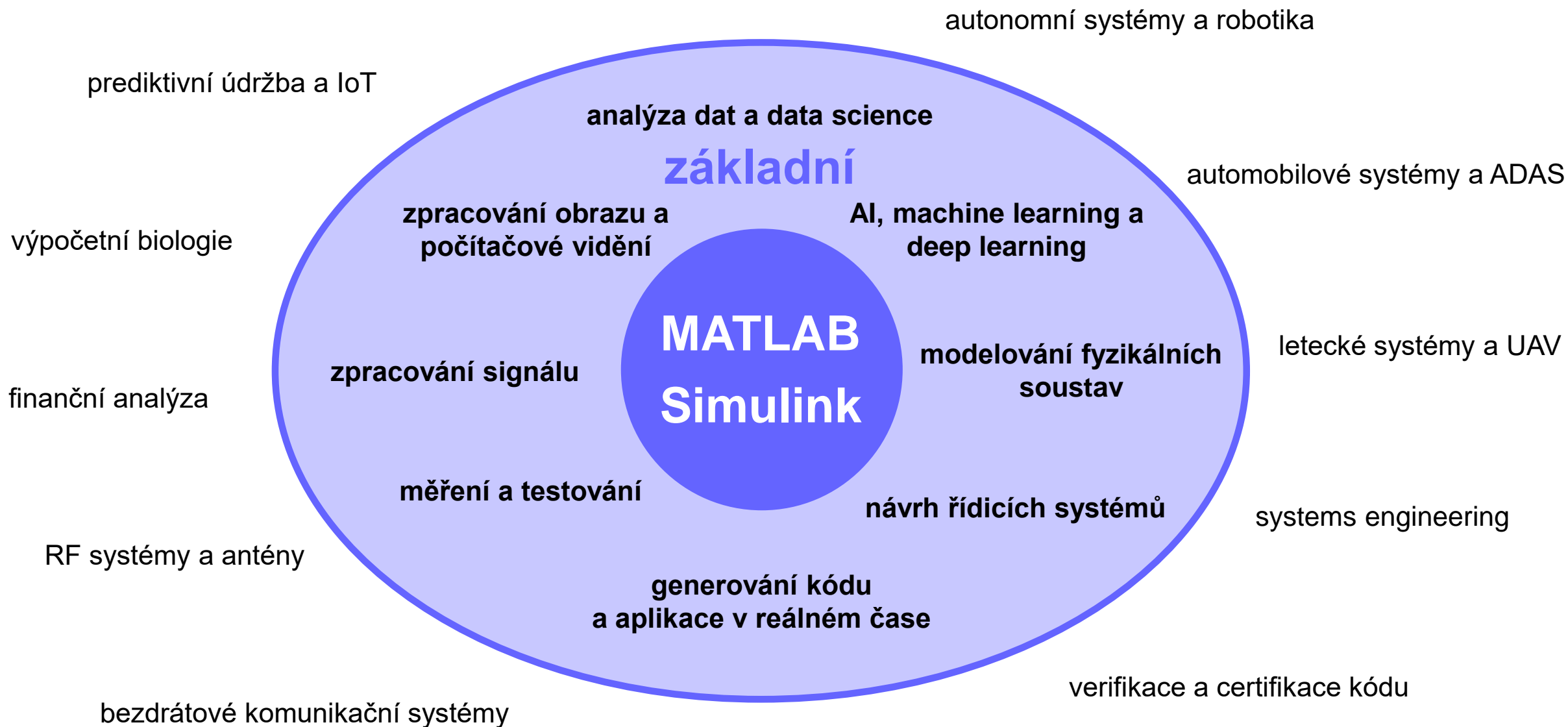
- grafy a vizualizace



- modelování systémů
- simulace a analýza
- Model-Based Design

Aplikační oblasti

specializované



Kde se MATLAB používá ...



Letecký průmysl



Automobilový průmysl



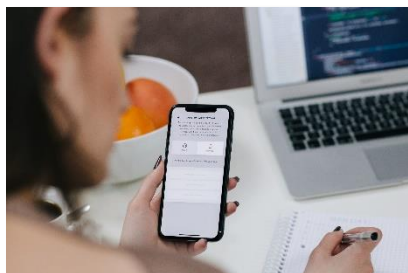
Přírodní vědy



Biotechnologie a farmacie



Komunikace



Elektronika



Energetika



Finanční služby



Výrobní stroje



Medicína



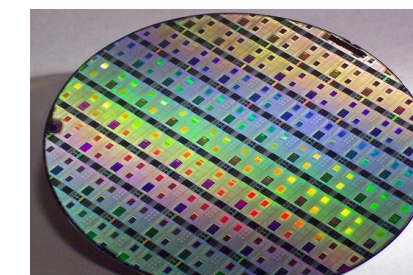
Těžební průmysl



Neurovědy



Železnice a doprava

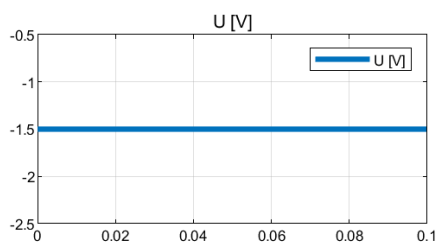


Polovodiče



Software a internet

Modelování soustav



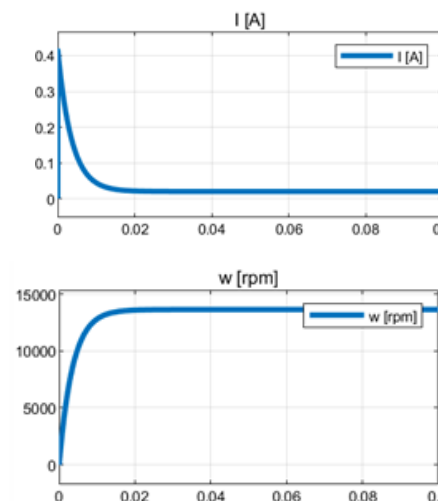
vstup
napětí U

SYSTEM

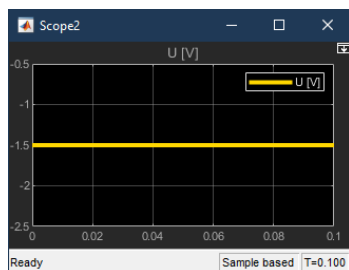


výstup

proud I
otáčky ω



MODEL



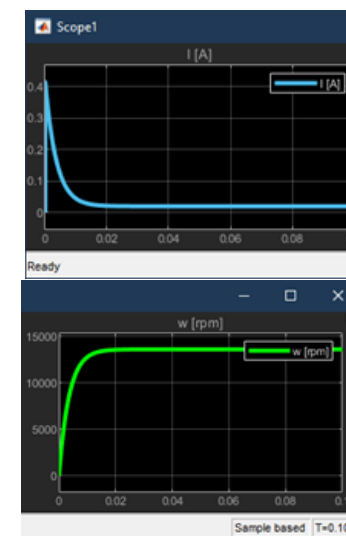
vstup
napětí U

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

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

výstup

proud I
otáčky ω

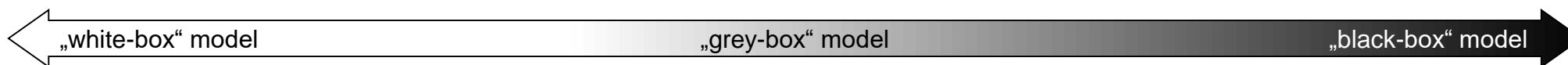


Modelování soustav : Přístupy k modelování

- Pro různé situace jsou vhodné různé přístupy

Fyzikální vztahy

Naměřená data



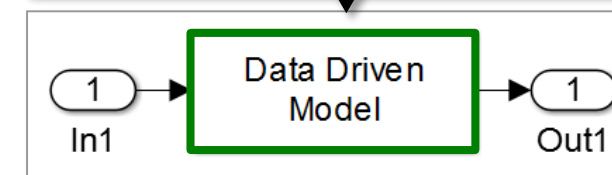
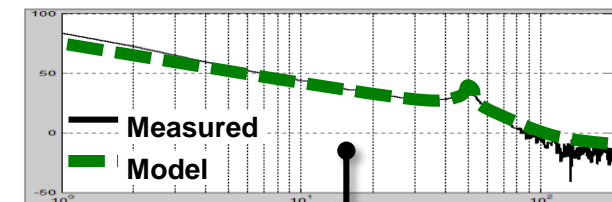
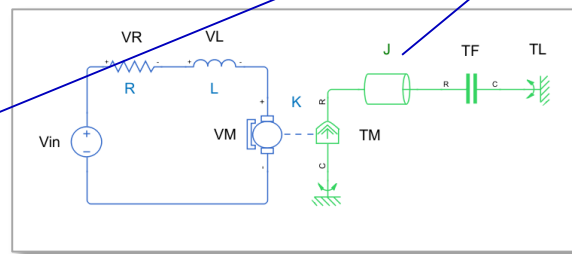
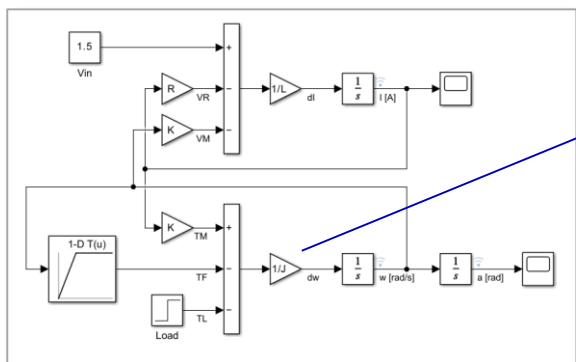
Modelování rovnic

Ladění neznámých parametrů

Identifikace soustav

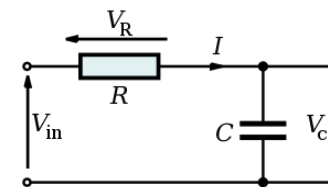
Fyzikální síť

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

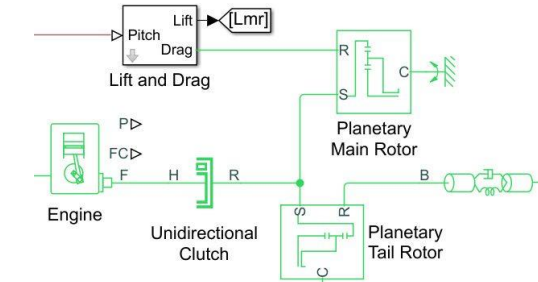
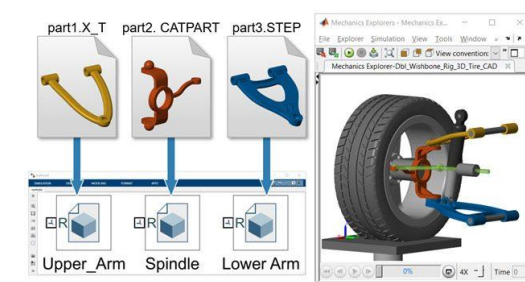
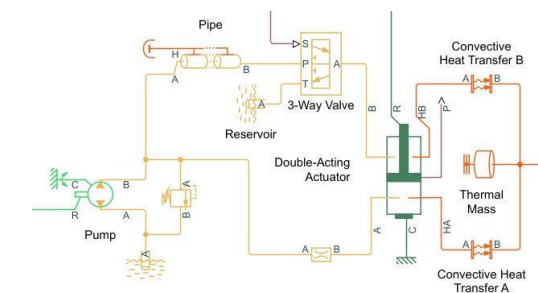
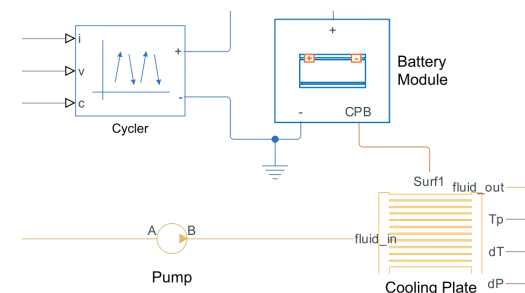
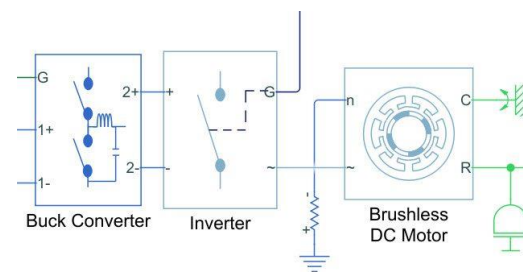
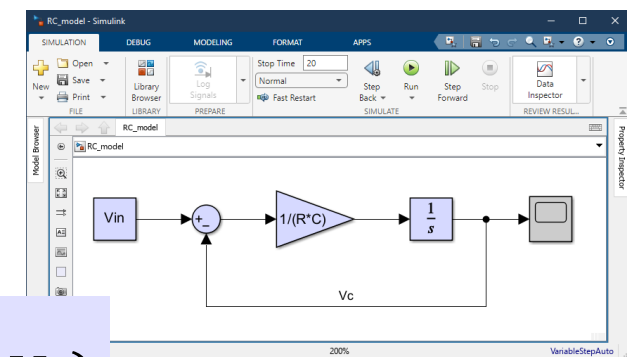


Modelování soustav : Prostředky

- Popis matematickými rovnicemi (Simulink)
 - matematicko-fyzikální analýza
 - identifikace soustavy z naměřených dat
- Fyzikální modelování (Simscape)
 - elektrické a elektromechanické systémy
 - baterie
 - tekutinové systémy
 - 3-D mechanika
 - převodové systémy
- Aplicačně zaměřené
 - automobily, letadla, drony, roboty

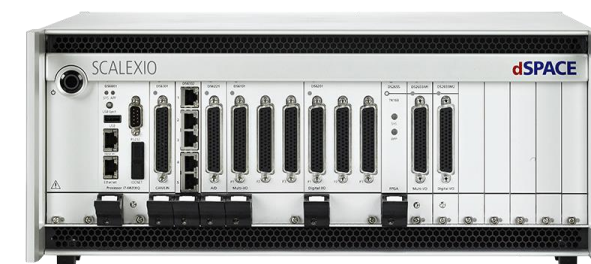
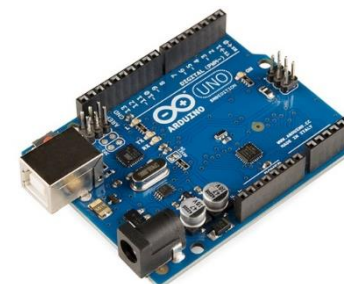
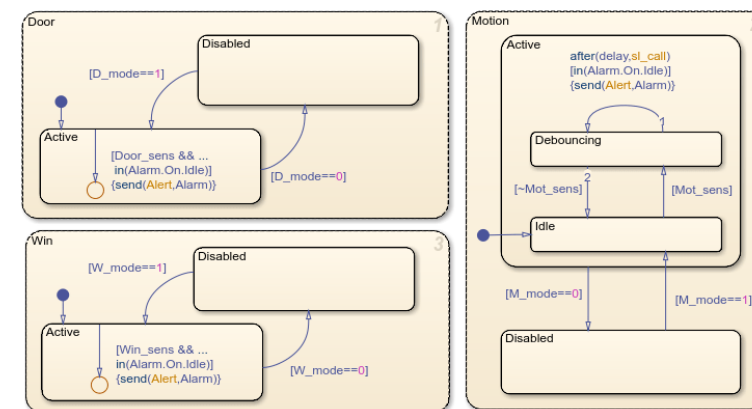
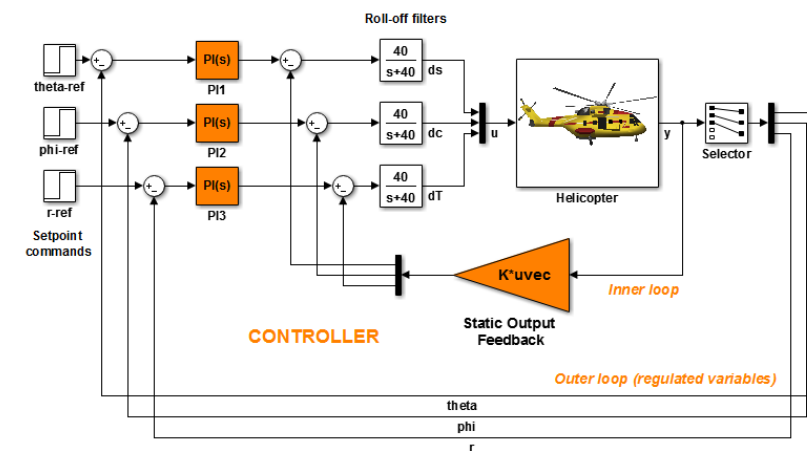


$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{RC} (V_{in} - V_C)$$

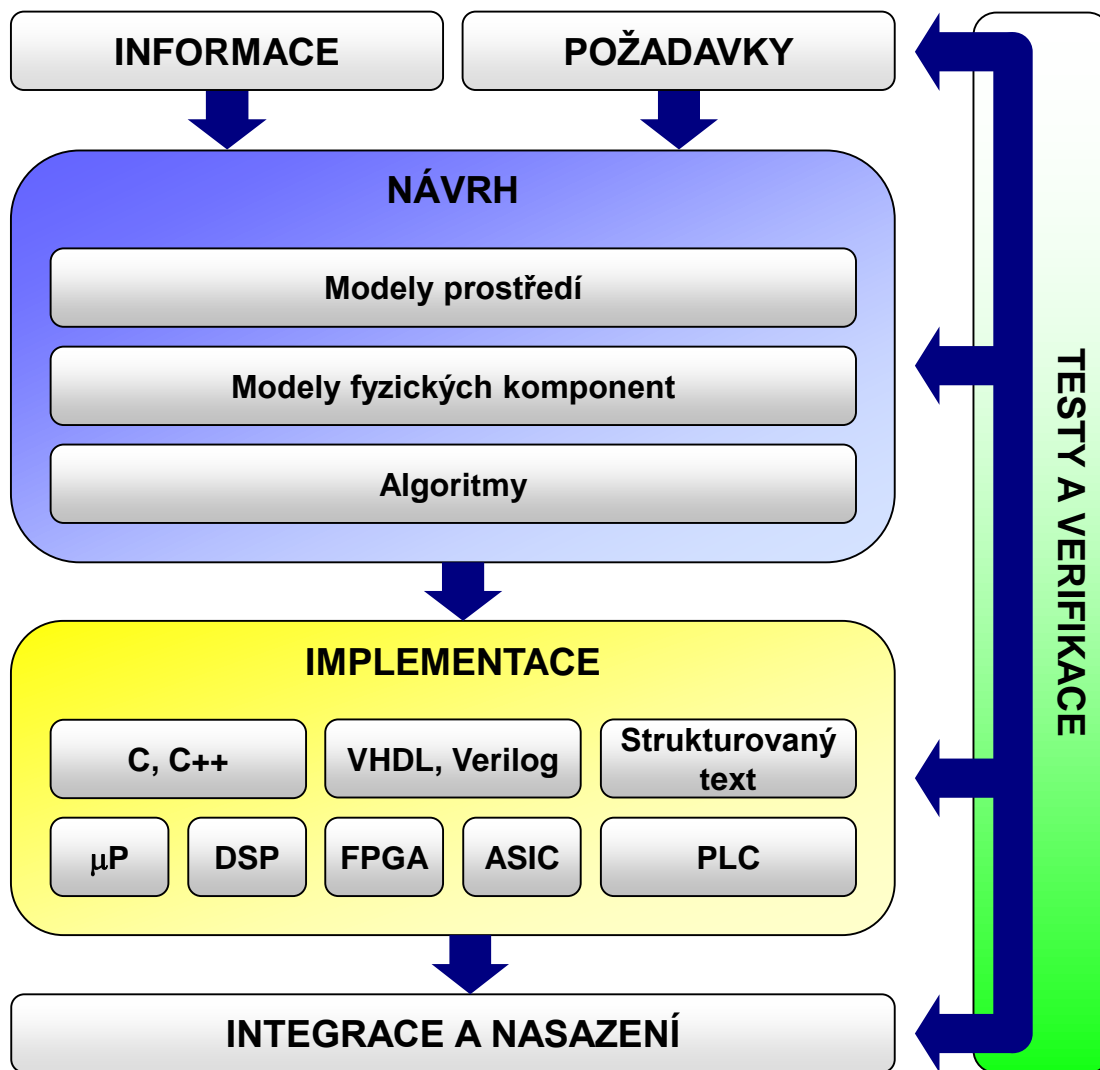


Modelování algoritmů

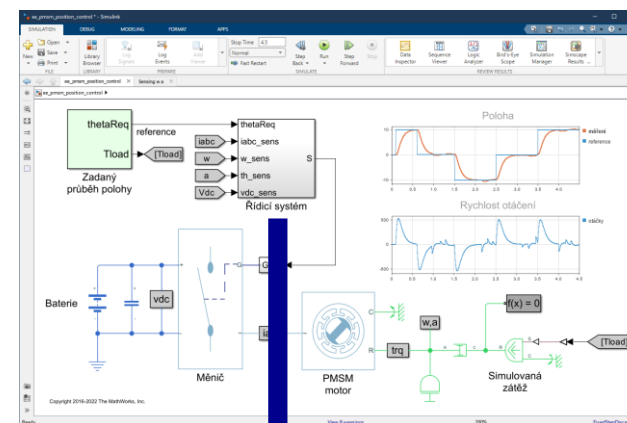
- Řídicí systémy
- Logické a rozhodovací systémy
- Zpracování signálu a komunikace
- Zpracování obrazu a počítačové vidění
- a další ...
- Společná simulace soustav a algoritmů
- Generování kódu pro cílové platformy
 - C/C++, HDL, PLC (strukturovaný text), CUDA
 - simulace a testování v reálném čase,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



Vývoj metodou Model-Based Design



Modelování, simulace a testování



Automatické generování kódu

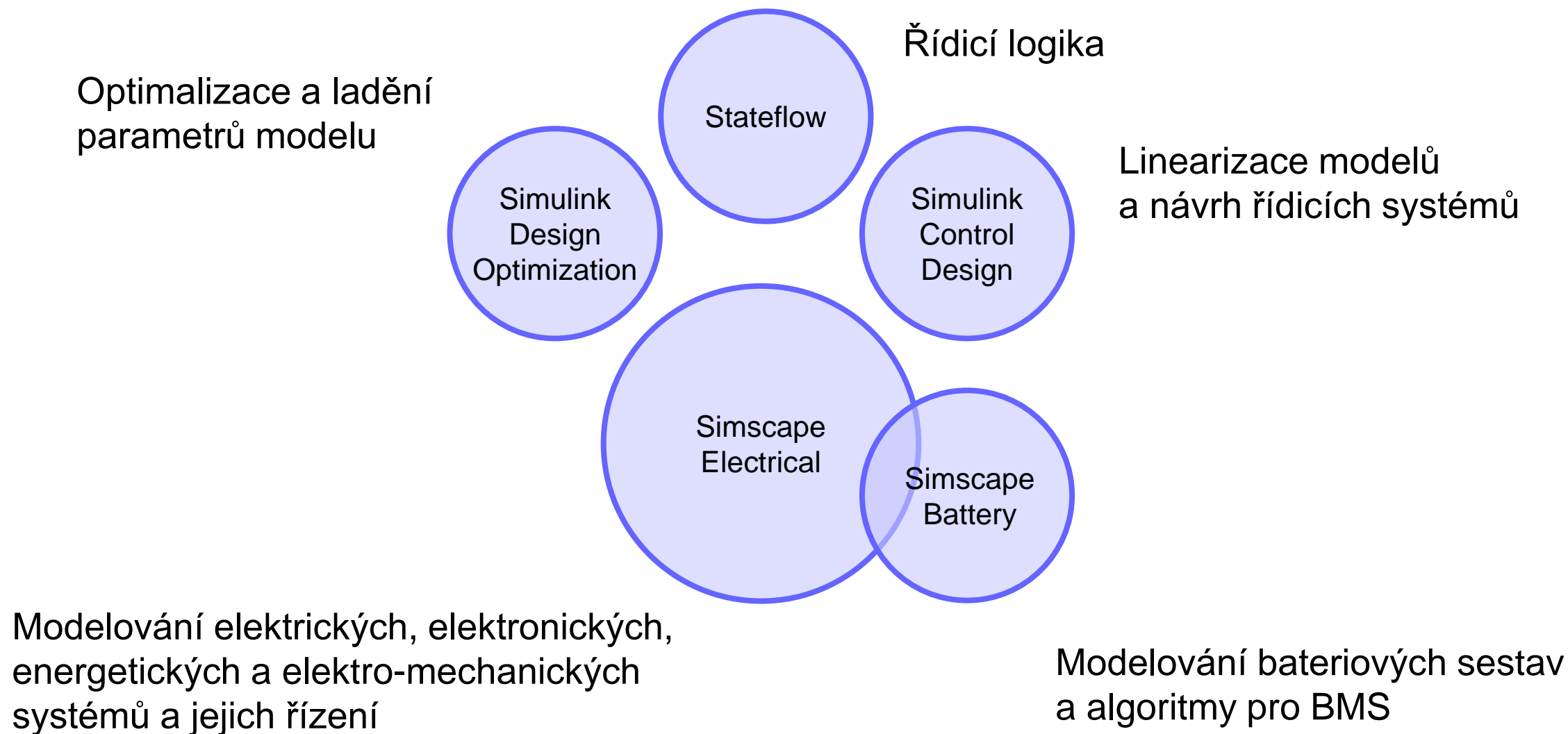
```

Code
Control_System.c
6 * Model version : 6.4
7 * Simulink Coder version : 9.9 (R2023a) 19-Nov-2022
8 * C/C++ source code generated on : Tue Apr 25 11:26:44 2023
9
10 * Target selection: ert-tlc
11 * Embedded hardware selection: Texas Instruments->C2000
12 * Code generation objectives: unspecified
13 * Validation result: not run
14
15
16 #include "Control_System.h"
17 #include <math.h>
18 #include "rt_modeldef.h"
19 #include "rtwtypes.h"
20 #include <string.h>
21
22 /* Block signals (default storage) */
23 #blockio_control_system Control_System_B;
24
25 /* Block states (default storage) */
26 #blockstates_control_system Control_System_S;
27
28 /* External inputs (root import signals with default storage) */
29 ExternalInputs_Control_System Control_System_U;
30
31 /* External outputs (root outputs fed by signals with default storage) */
32 ExternalOutputs_Control_System Control_System_Y;
33
34 /* Real-time model */
35 static #if_HOML_control_system Control_System_H;
36 #if_HOML_control_system *const control_system_H = &Control_System_H;
37
38 /* Model step function */
39 void control_system_step(void)
40 {
41     real32_T B1AS;
42     real32_T uB;
43 }
44
45 _ATAPL282194_#801Podklady/control_system_ert_rtw/control_system.c Ln 6 Col 13
  
```

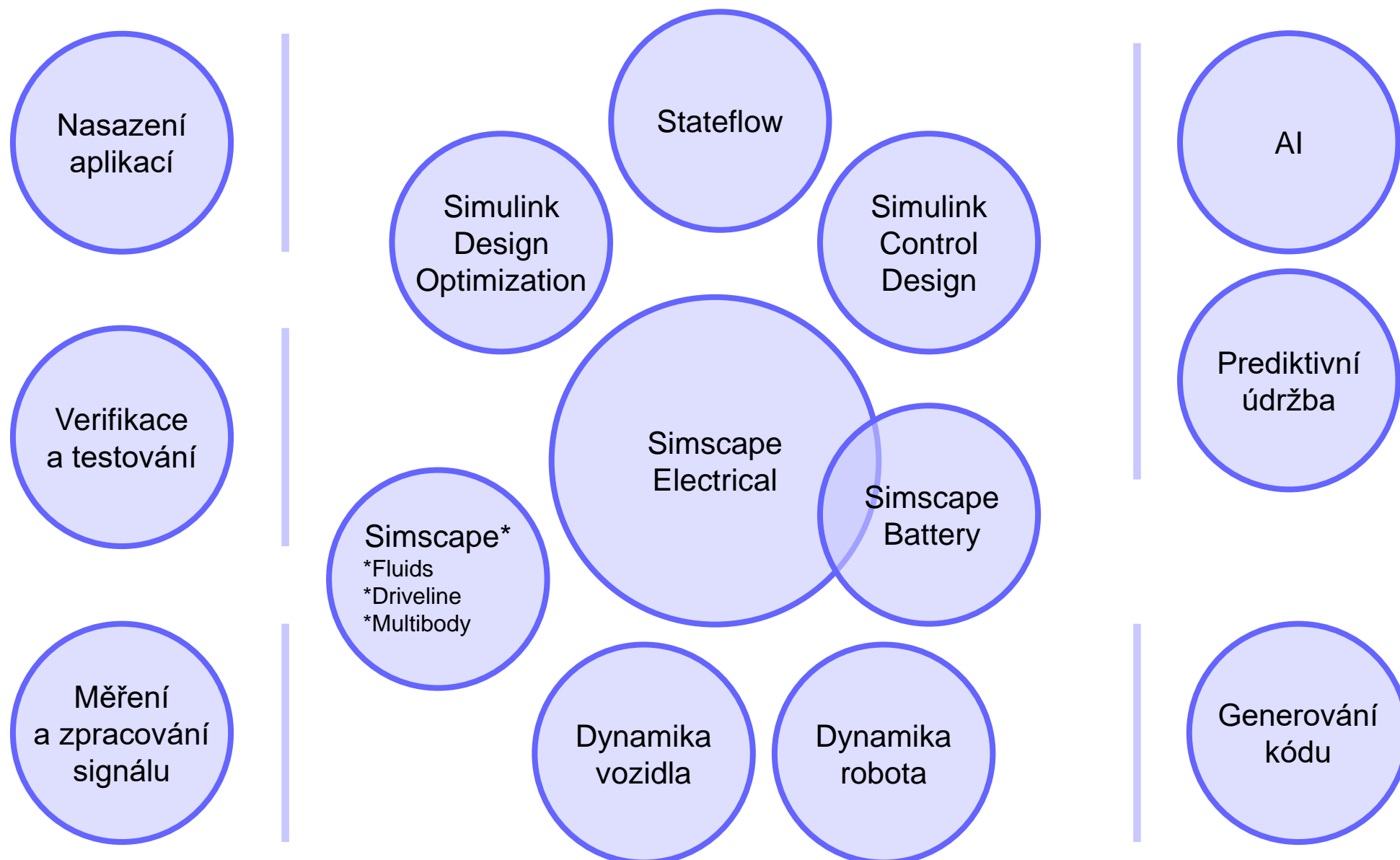
Nasazení



MATLAB a Simulink pro modelování elektrických systémů

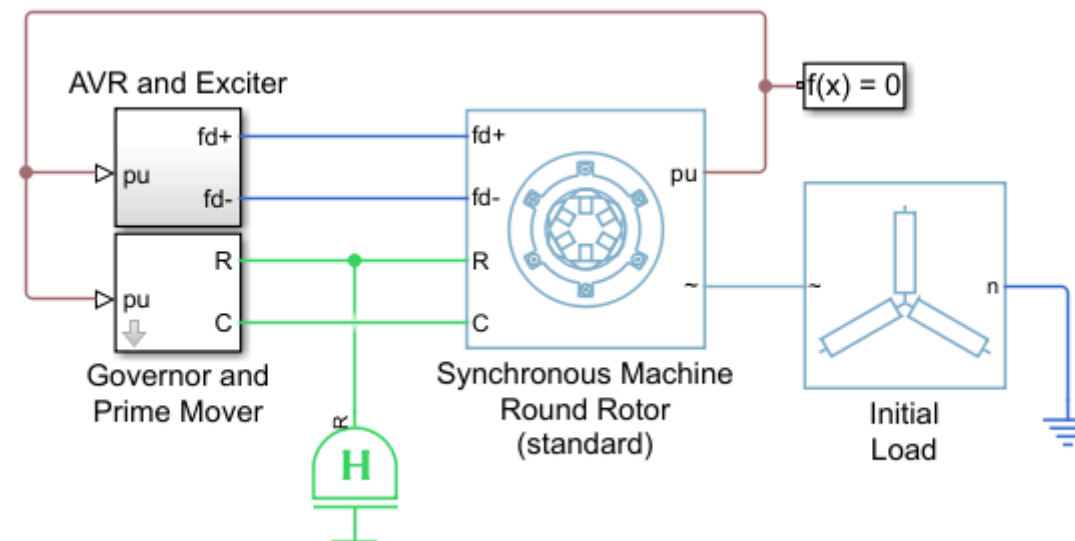
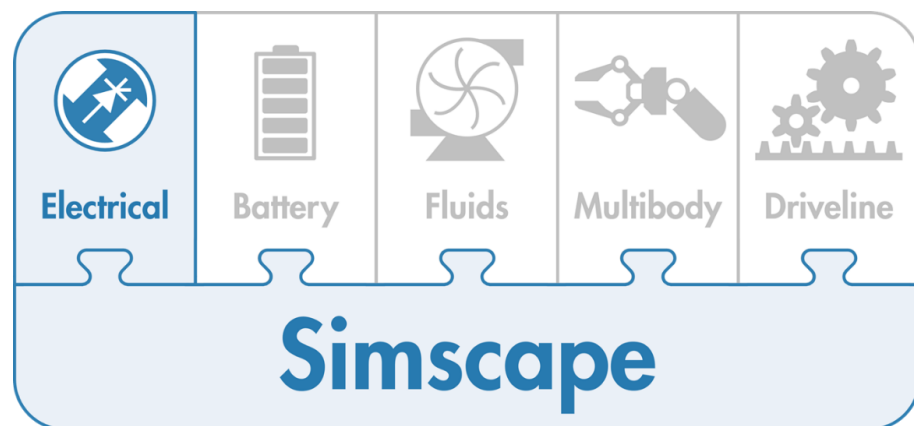
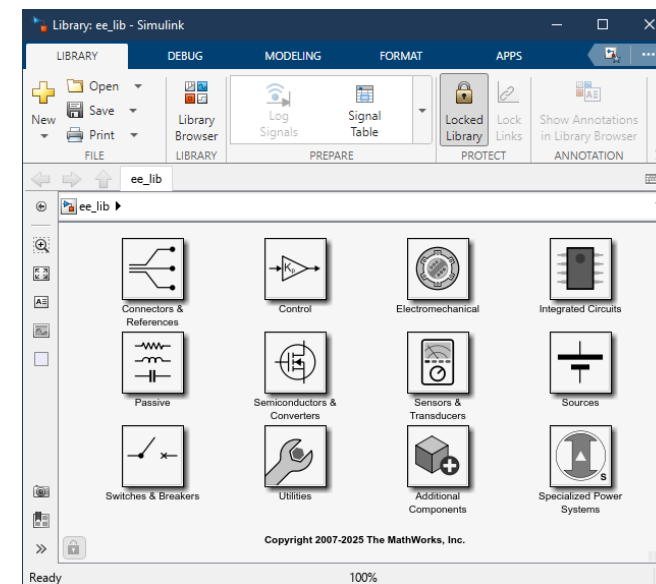


MATLAB a Simulink pro modelování elektrických systémů



Simscape Electrical

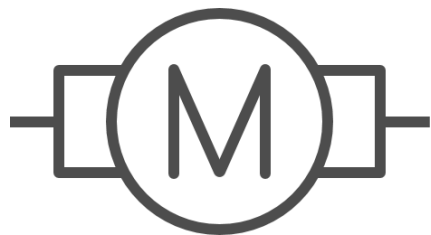
- Fyzikální modelování
 - topologie elektrického systému reprezentována schématickým zapojením
- Elektrické a elektro-mechanické systémy
 - výkonová elektronika, energetika, elektrické pohony, ...
 - prvky s různou úrovní detailu (volíme dle požadavků úlohy)



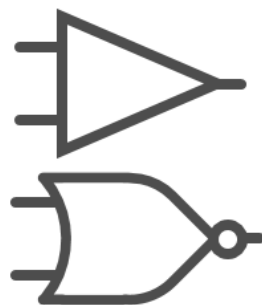
Modely 1f prvků v Simscape Electrical



polovodičové prvky



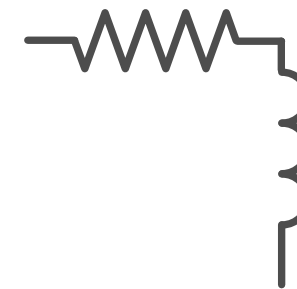
motory, akční prvky



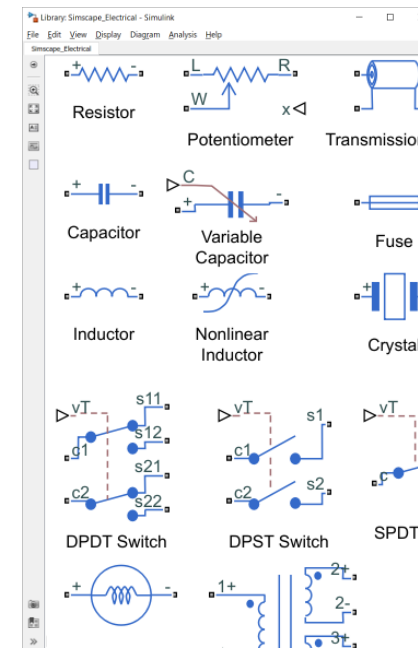
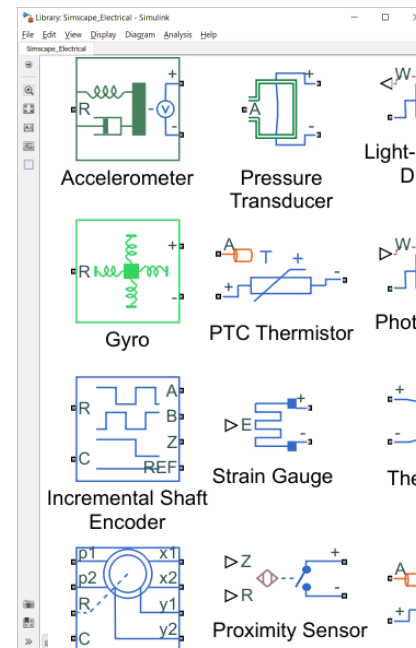
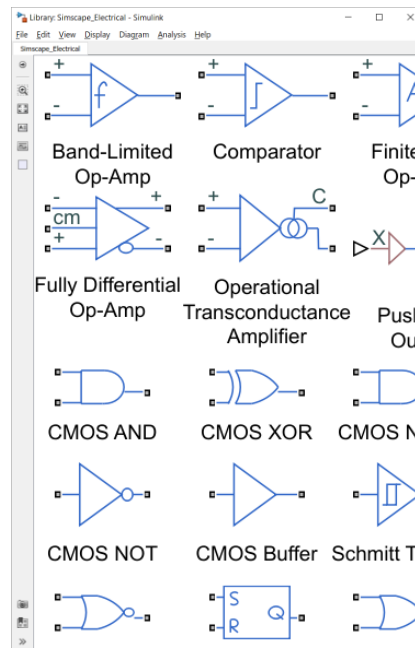
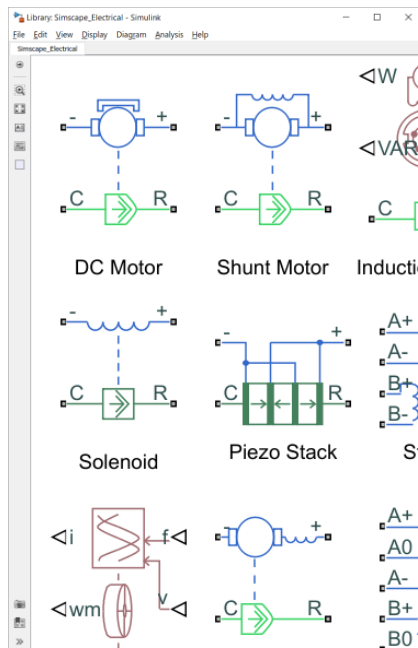
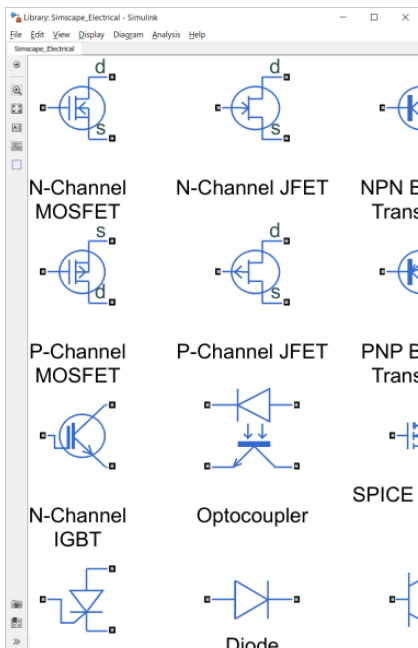
op. zesilovače, logická hradla



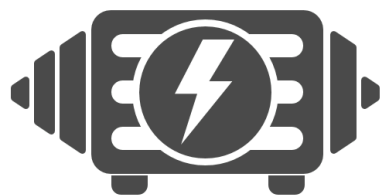
senzory



pasivní součástky



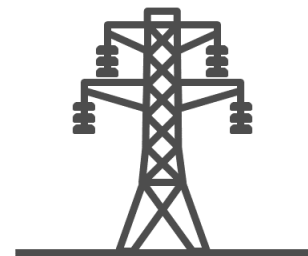
Modely 3f prvků v Simscape Electrical



třífázové
motory



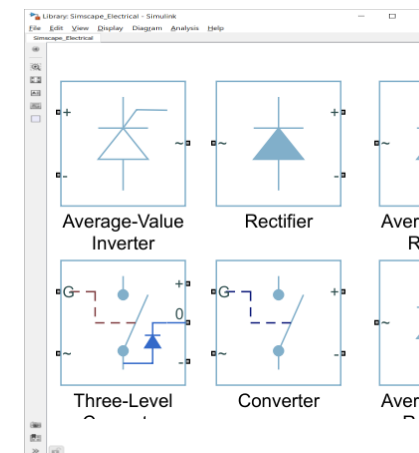
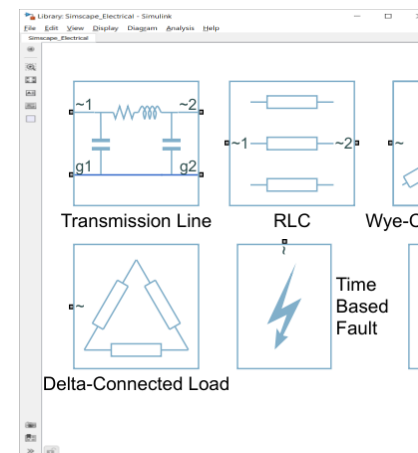
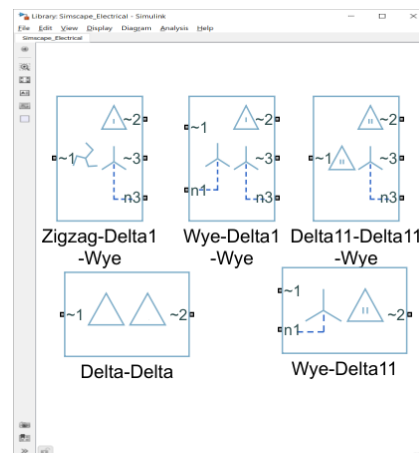
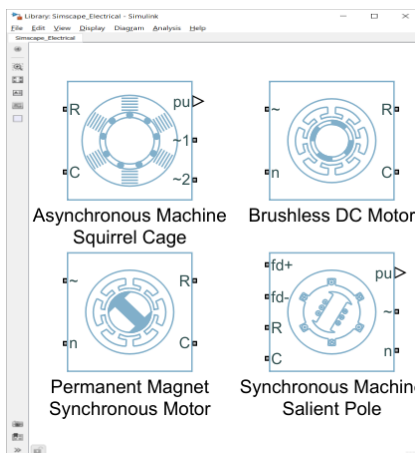
transformátory



vedení,
FACTS

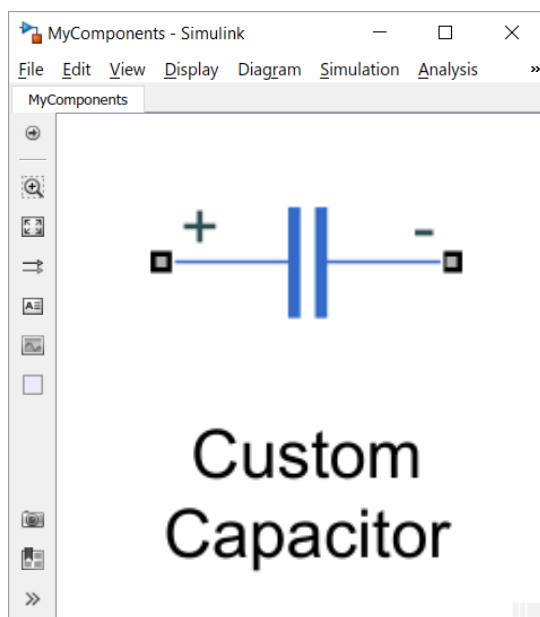
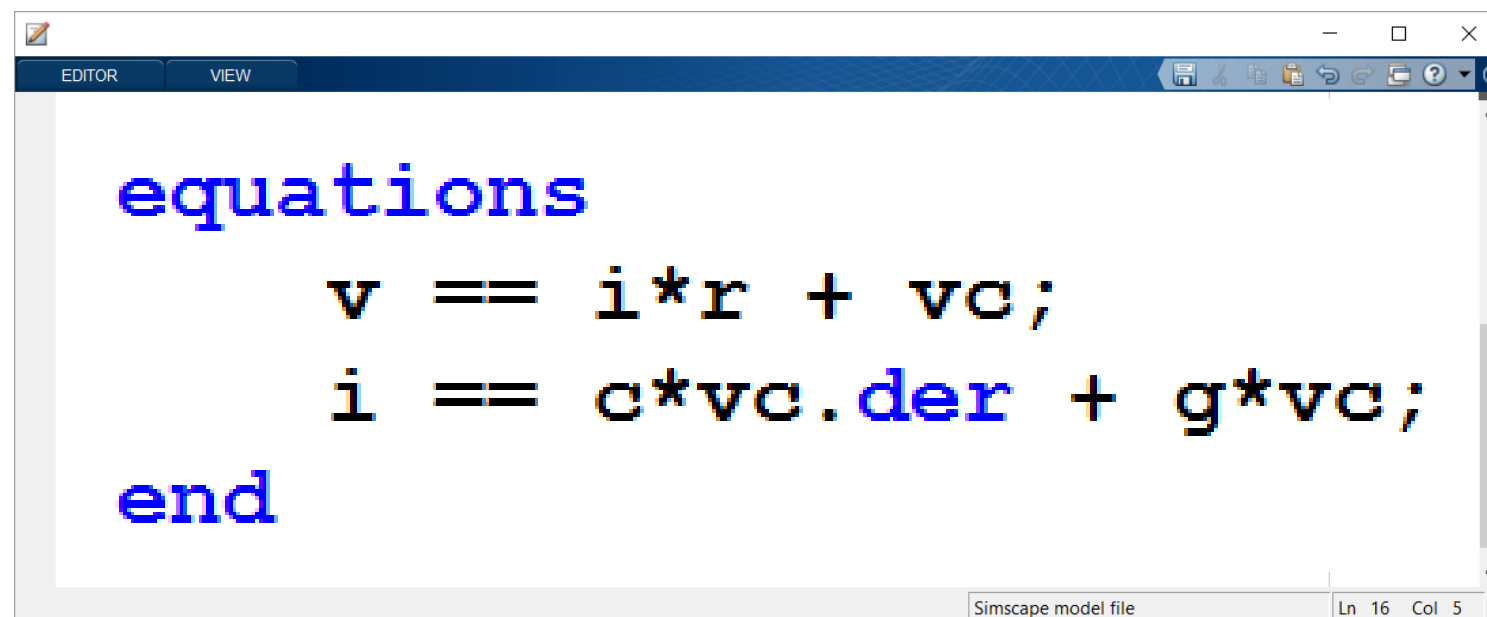


měníče,
střídače



Modely prvků v Simscape Electrical

+ možnost vytvoření vlastních prvků pomocí jazyka Simscape Language

EDITOR VIEW

```

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

```

Simscape model file Ln 16 Col 5

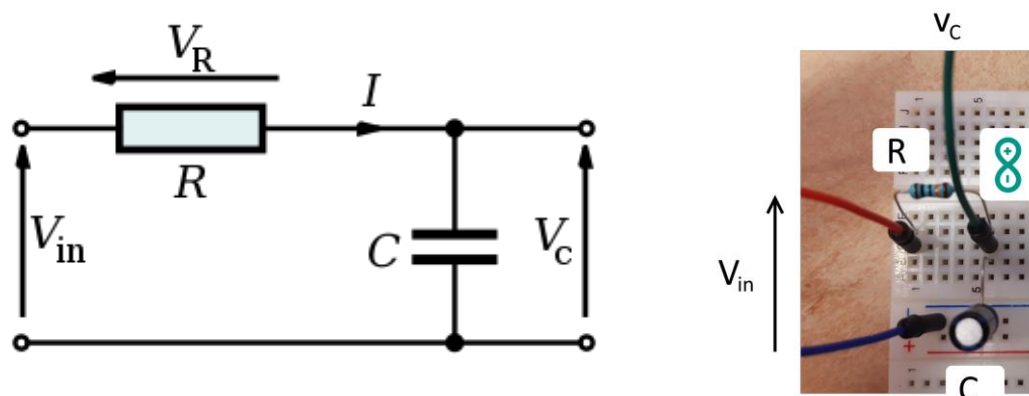
Příklad: Základní principy Simscape: RC článek

- RC článek = obvod rezistor–kondenzátor

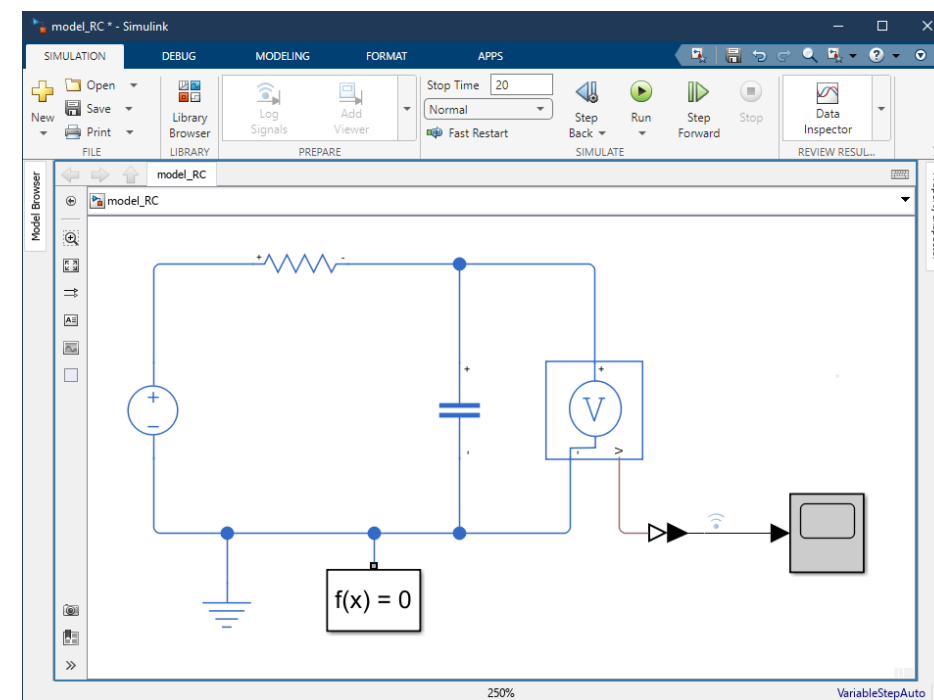
$$V_{in} = 5\text{ V}$$

$$R = 100.5\text{ k}\Omega$$

$$C = 10\text{ }\mu\text{F}$$



- Vstup: stejnosměrný zdroj napětí
- Výstup: měřené napětí na kondenzátoru



Příklad: Ladění neznámých parametrů: RC článek

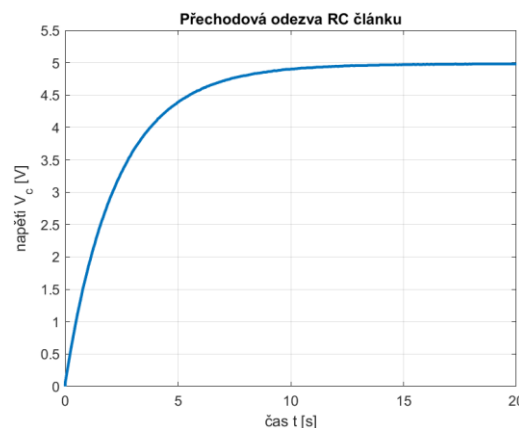
- Nalezení hodnoty neznámé kapacity kondenzátoru
- Experiment

– odezva výstupního napětí na skokovou změnu vstupu

$$V_{in} = 0\text{ V} \rightarrow 5\text{ V}$$

$$R = 100.5\text{ k}\Omega$$

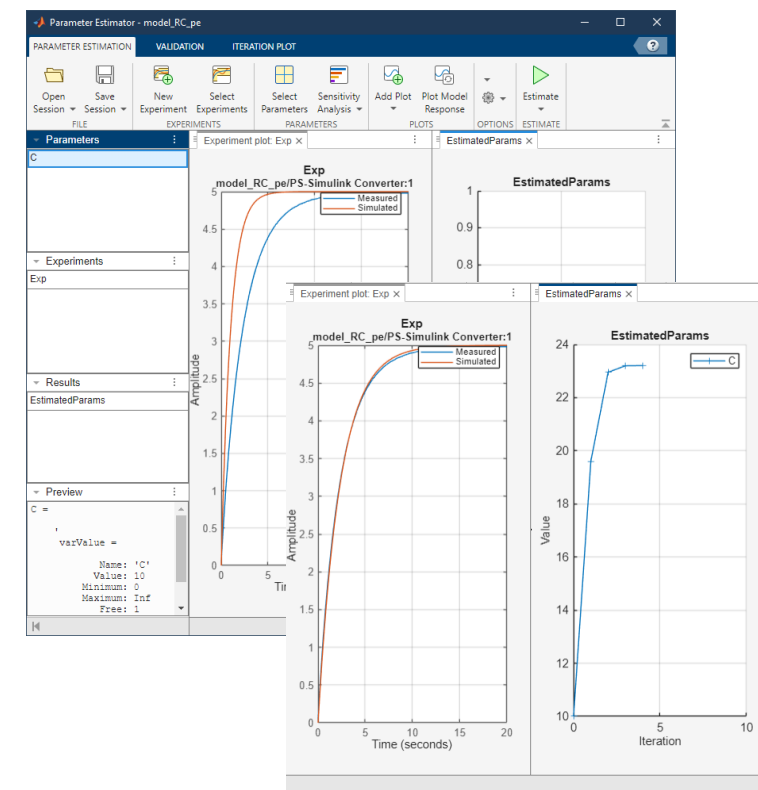
$$C = ?\ \mu\text{F}$$



- Optimalizační úloha

– porovnání výstupu ze simulace s naměřenou hodnotou

– úprava hodnoty neznámého parametru pro minimalizaci odchylky


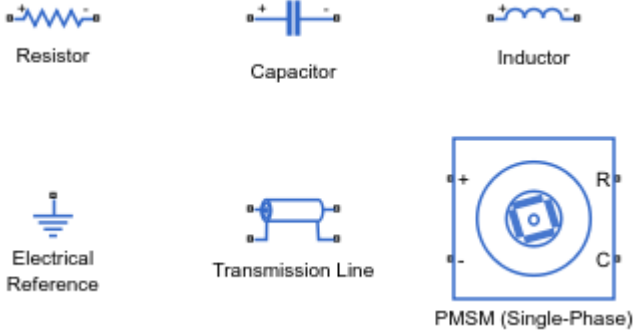

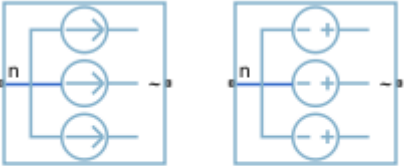
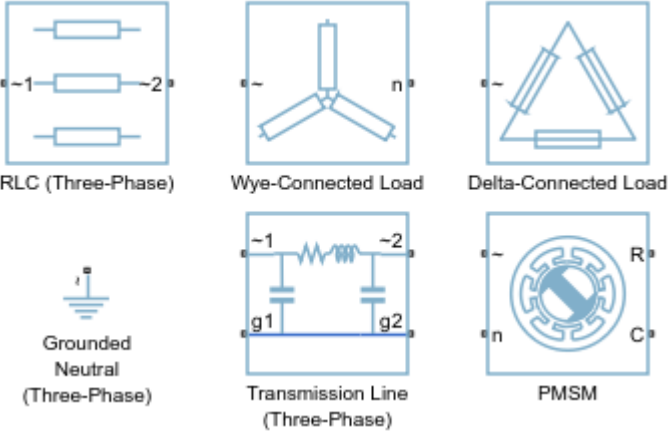
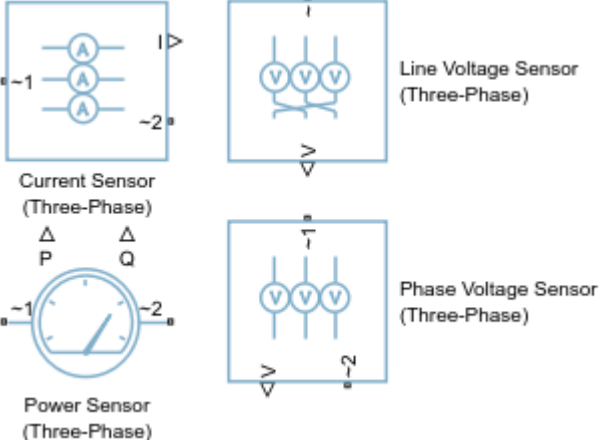


Modelování „power“ systémů

- Může to být:
 - elektrická síť s desítkami zdrojů
 - lokální mikrosíť
 - ale také elektrické vozidlo
- Obecně se jedná o elektrický systém, který obsahuje zdroj, distribuci a zátěže

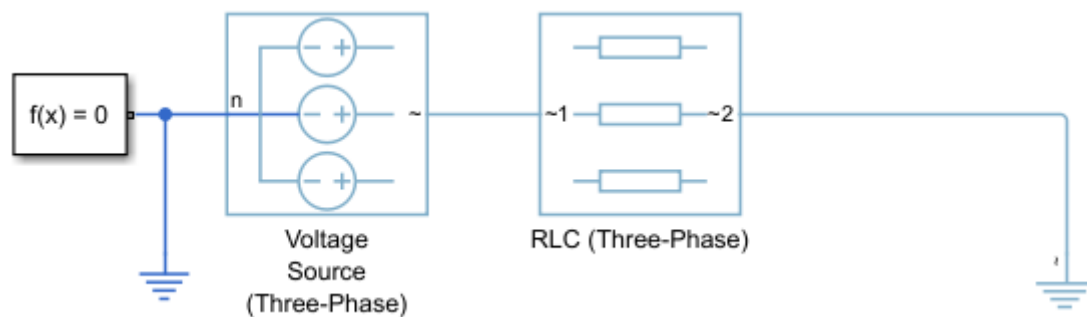


1f vs. 3f systémy v Simscape: Jak je poznat?

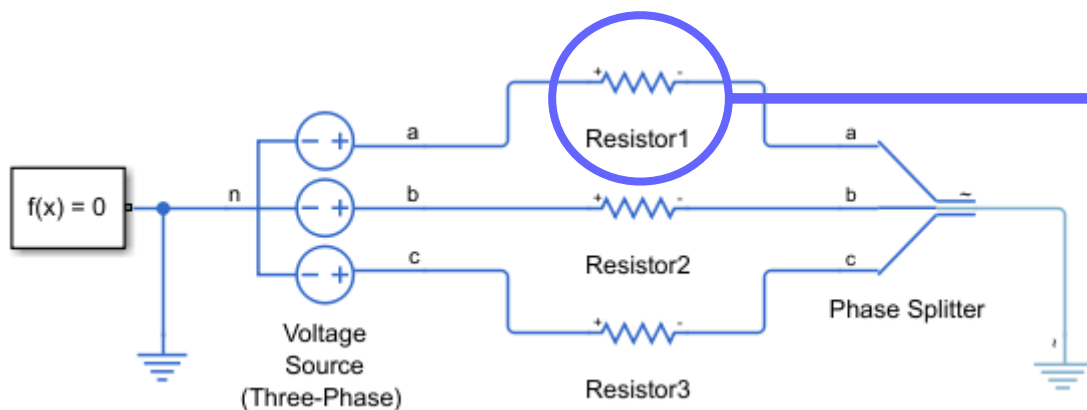
Ukázky	Zdroje	Prvky	Měření
1f	 <p>AC Current Source AC Voltage Source</p>	 <p>Resistor Capacitor Inductor</p> <p>Electrical Reference Transmission Line PMSM (Single-Phase)</p>	 <p>Current Sensor Voltage Sensor</p>
3f	 <p>Current Source (Three-Phase) Voltage Source (Three-Phase)</p>	 <p>RLC (Three-Phase)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

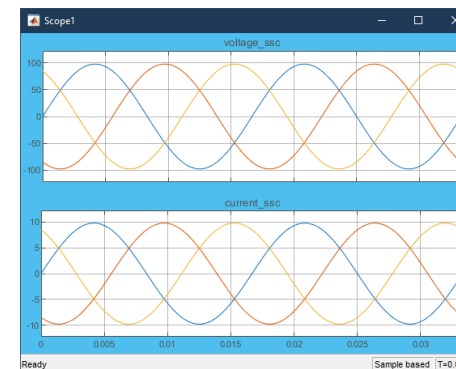
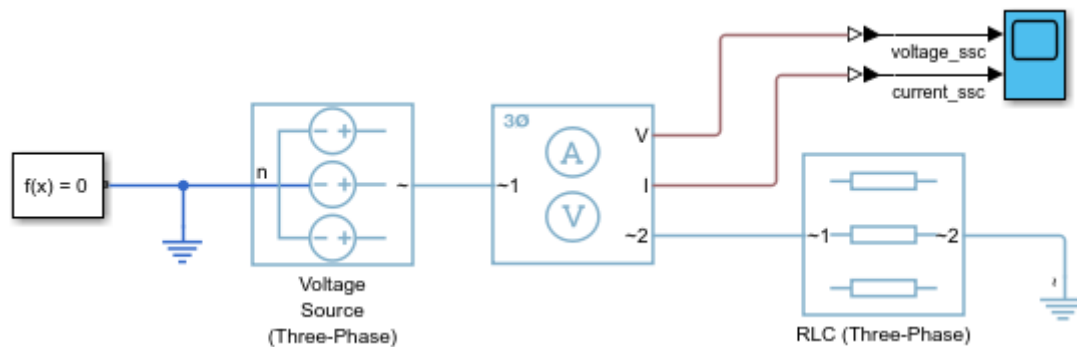


— samostatný 1f prvek

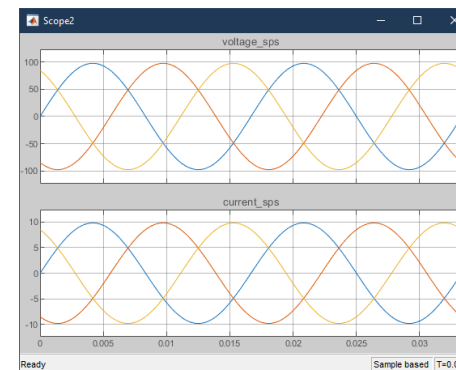
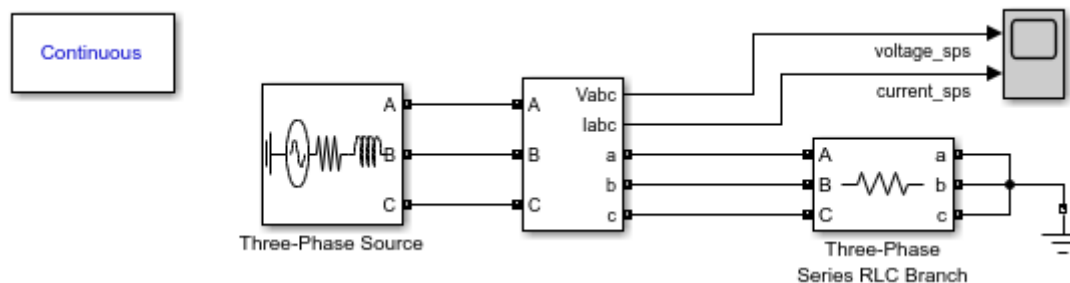
⇒ umožní modelovat nesymetrickou zátěž, apod.

Simscape Electrical: Simscape vs. SPS

- Bloky založené na technologii Simscape

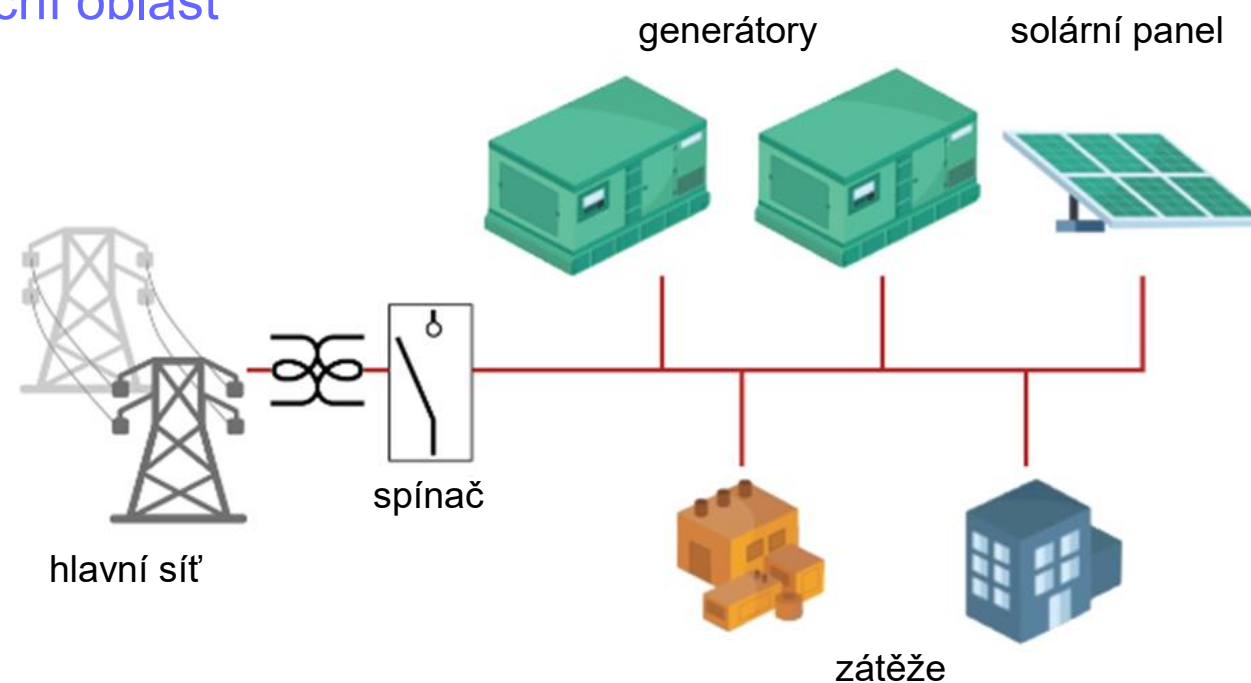


- Bloky založené na starší technologii: knihovna Specialized Power Systems



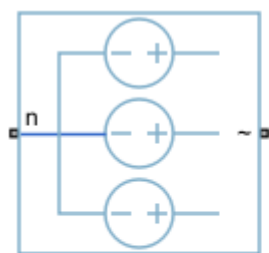
Ukázkový příklad: Mikrosíť

- 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

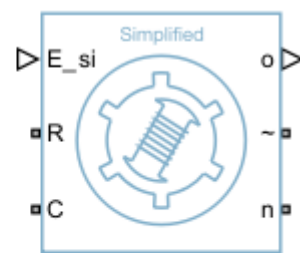


Úroveň detailu

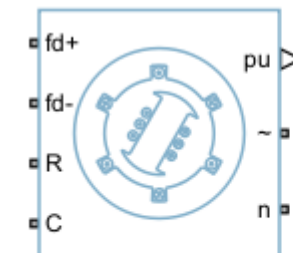
- Prvky můžeme modelovat na různé úrovni detailu
 - například jako model generátoru můžeme využít:



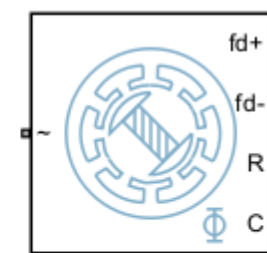
Voltage Source
(Three-Phase)



Simplified Synchronous Machine



Synchronous Machine Salient Pole

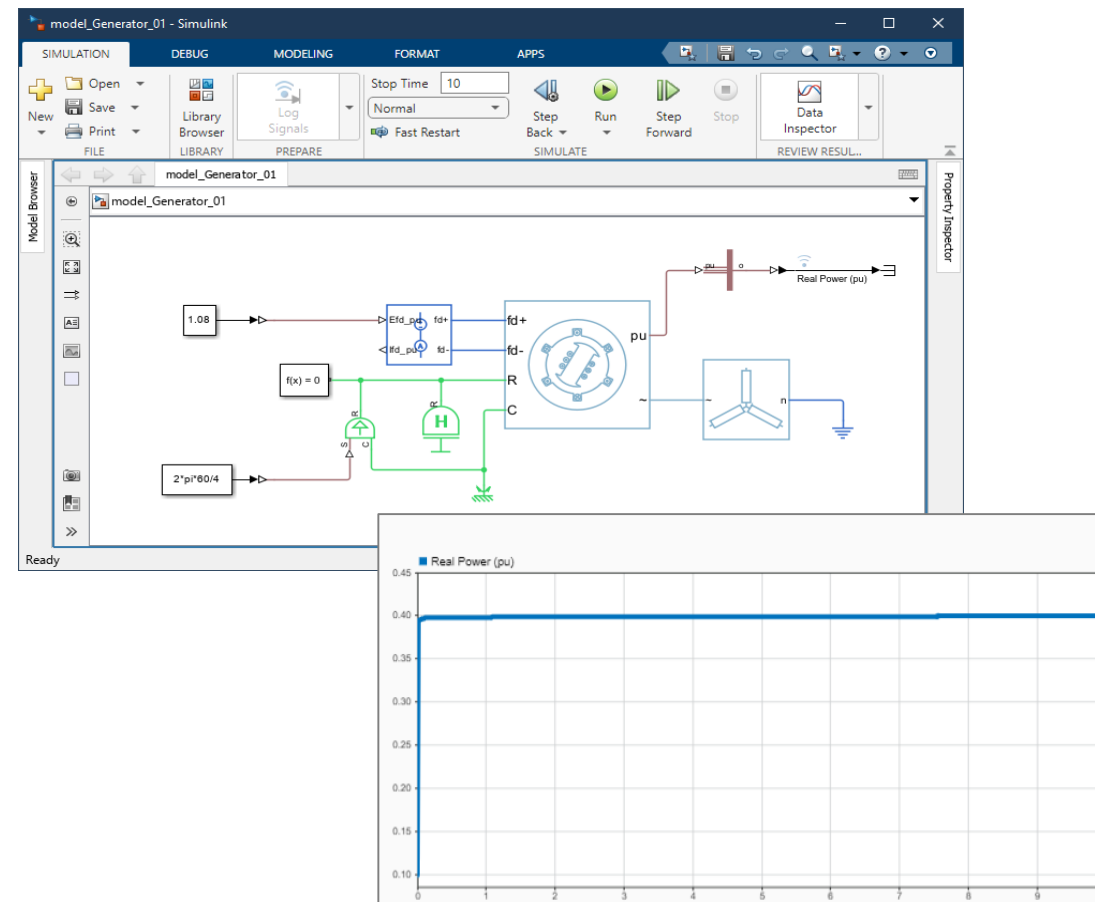


FEM-Parameterized Synchronous Machine

- 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

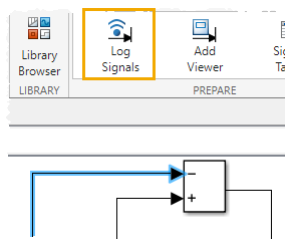


Odporová zátěž 2 MW ~ výkon generátoru 0.4 pu

Simulation Data Inspector

- Grafický nástroj pro prohlížení výsledků simulace

- zobrazení logovaných signálů



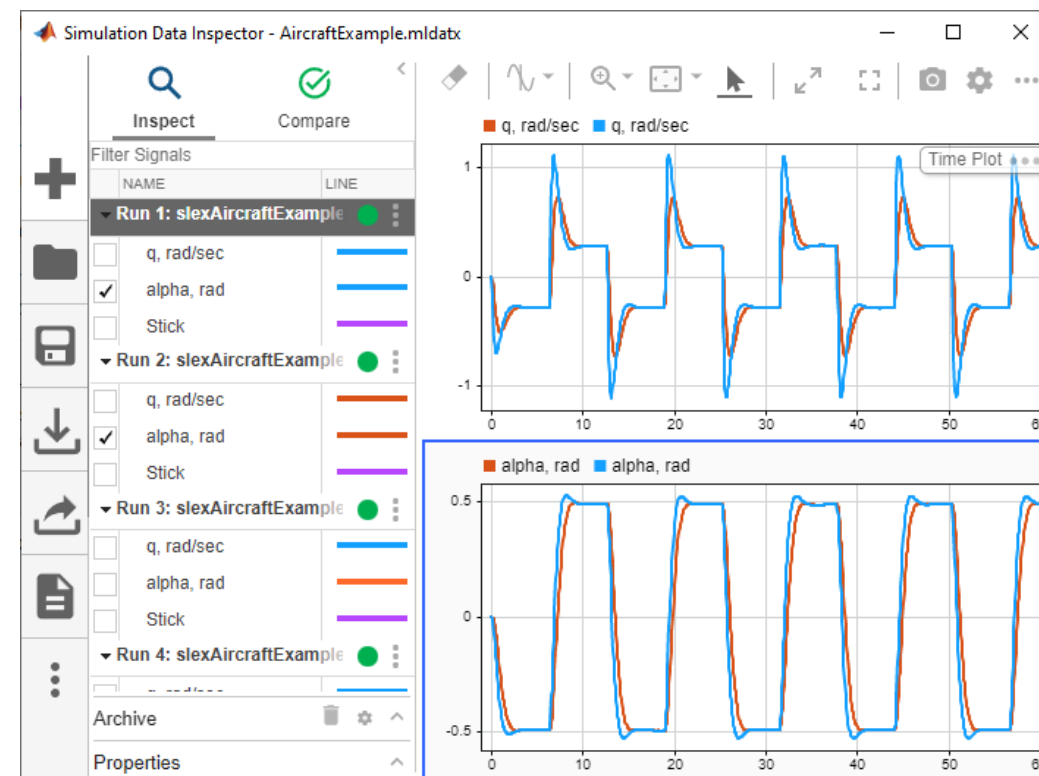
- přizpůsobení vzhledu a rozložení oken

- různé typy grafů

- zobrazení hodnot v čase

- export průběhů do workspace/souborů

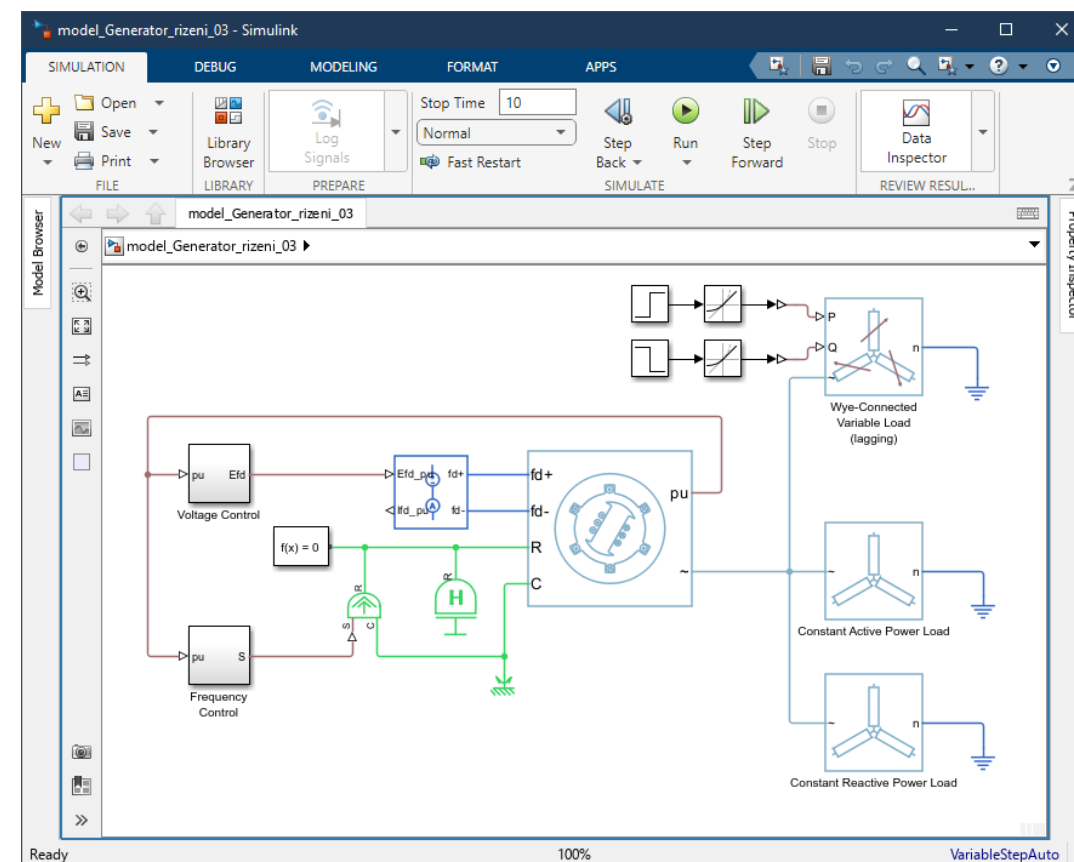
- automatické porovnání průběhů



- Umožní porovnání průběhů z více po sobě jdoucích simulací

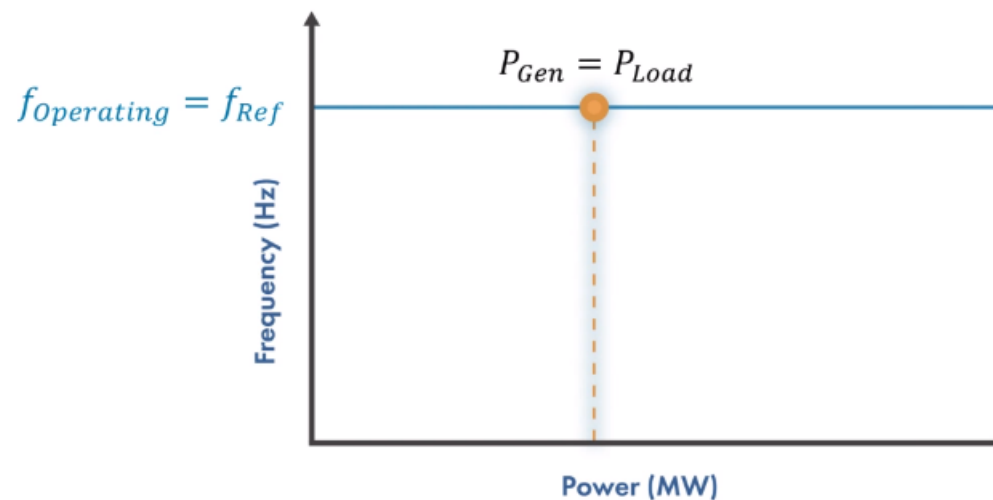
Model synchronního generátoru s řízením

- 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

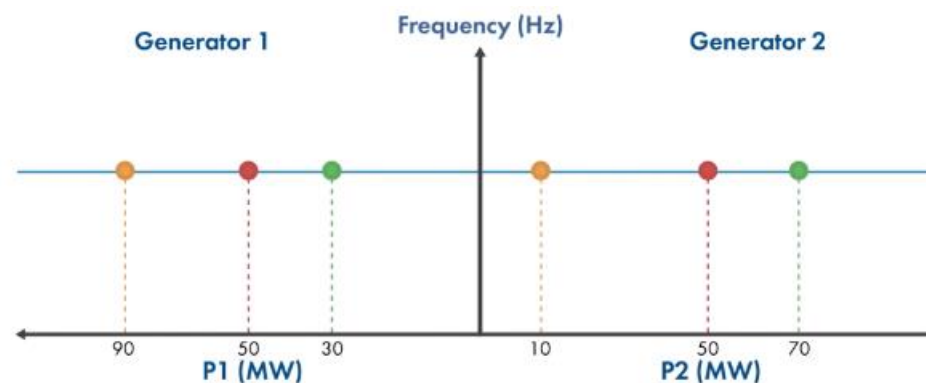
Řízení generátoru: Isochronní řízení

- 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

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

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

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



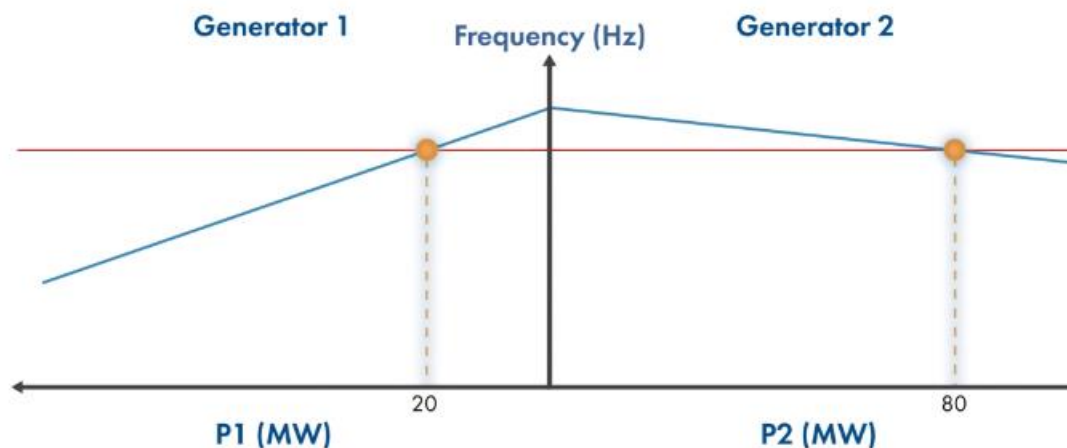
- Včetně nechtěných kombinací : 120 MW a -20 MW = 100 MW

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

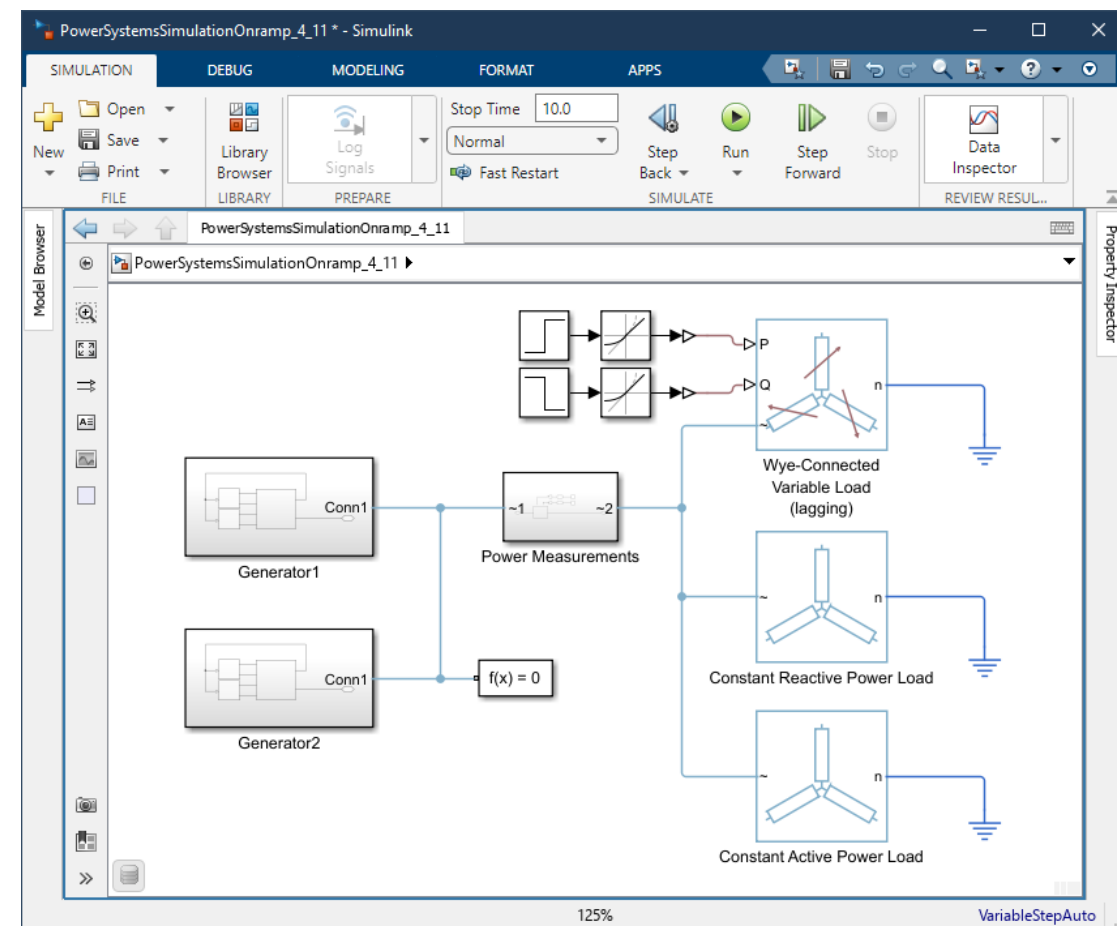
$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{D_1}{D_2}$$



- Obdobně definuje pokles výstupního napětí pro rostoucí hodnotu výkonu Q

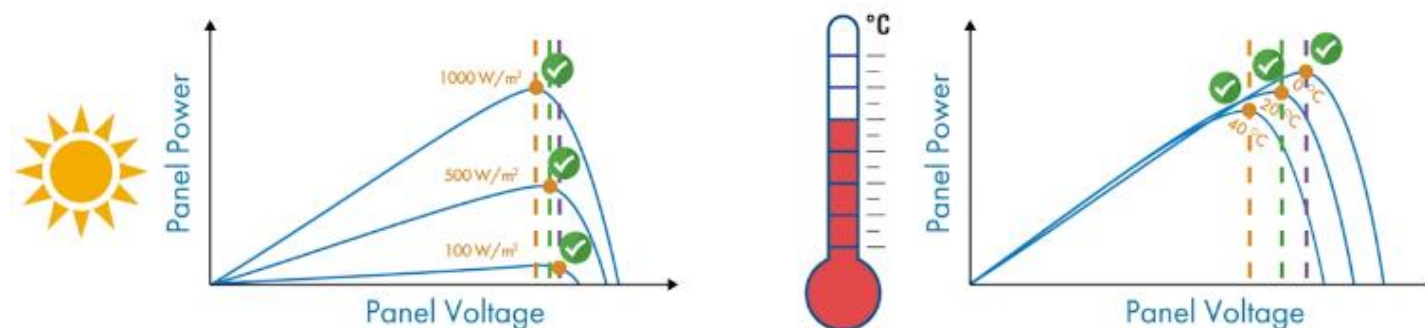
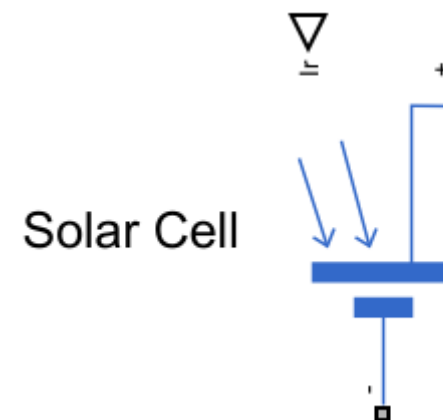
Model se dvěma generátory

- 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

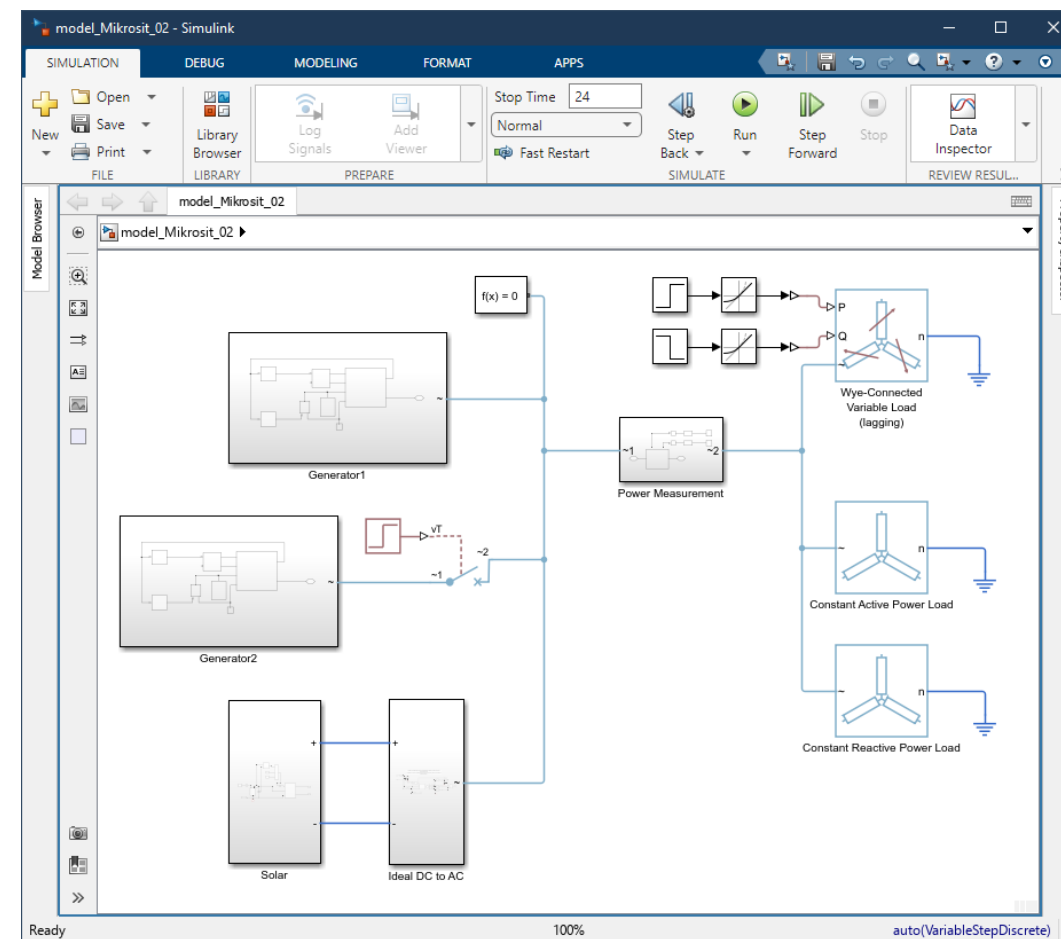
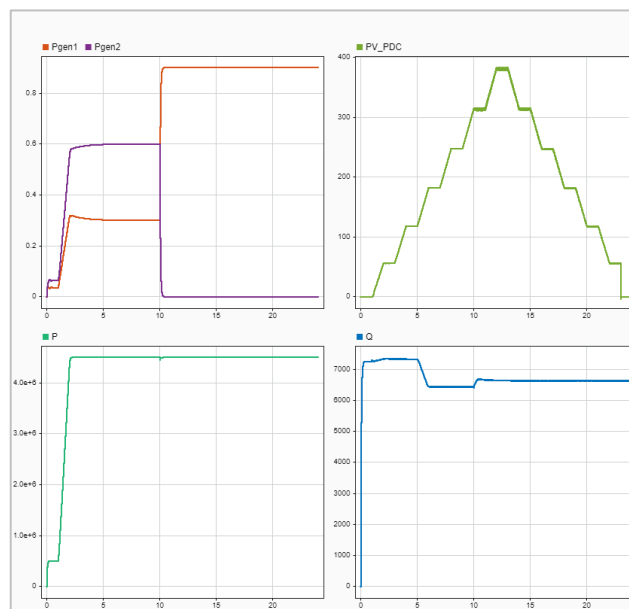
- Blok *Solar Cell*
 - zdroj stejnosměrného proudu
 - velikost osvitů dána vstupním signálem
- Řízení výkonu pomocí DC-DC měniče
 - využívá algoritmus MPPT



- K síti připojen přes DC-AC měnič

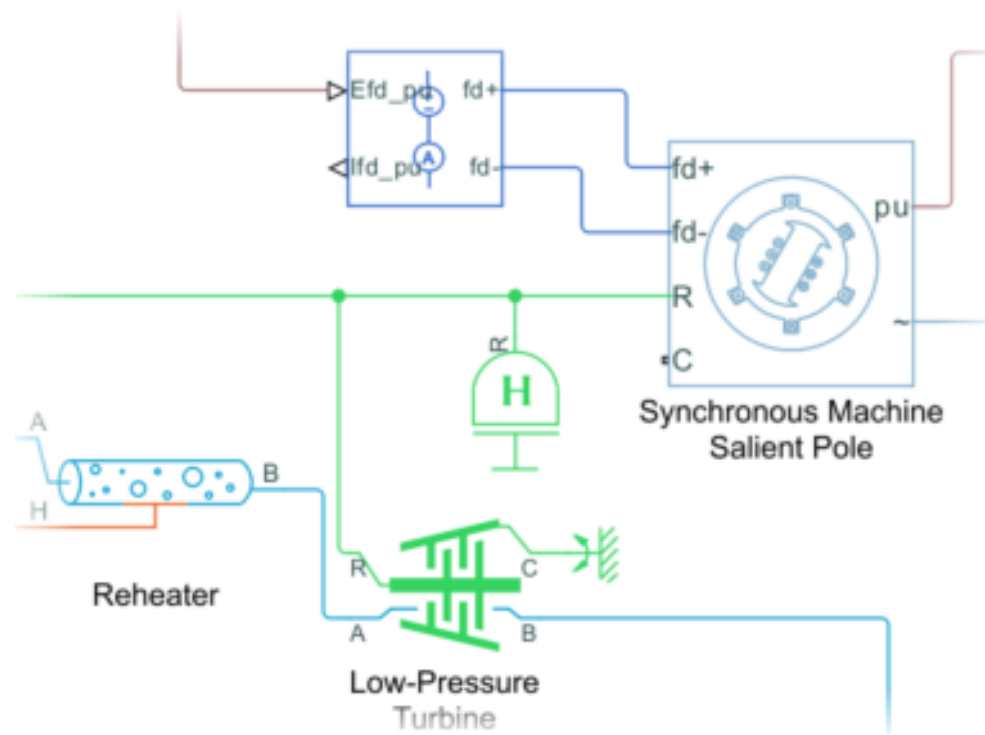
Zapojení do mikrosítě

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

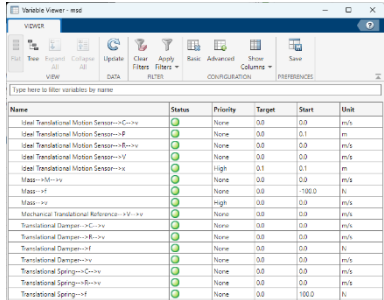
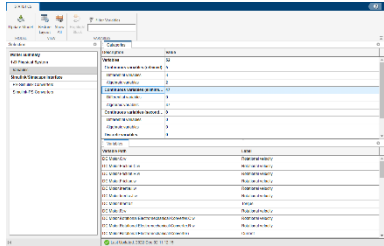
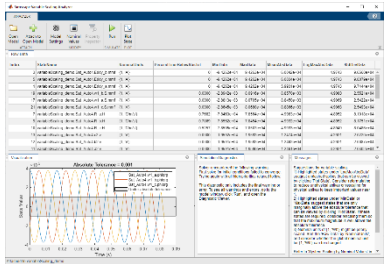
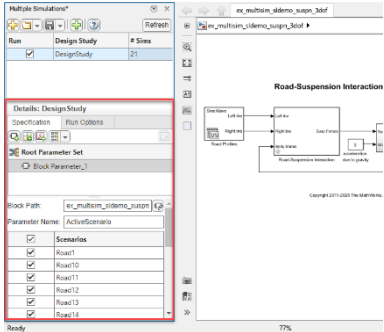
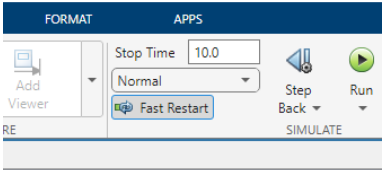
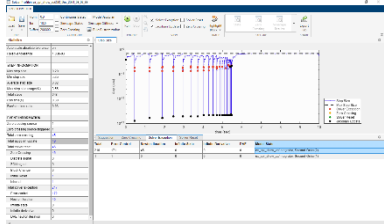
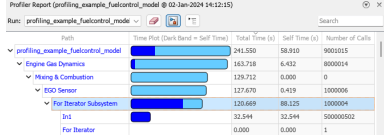
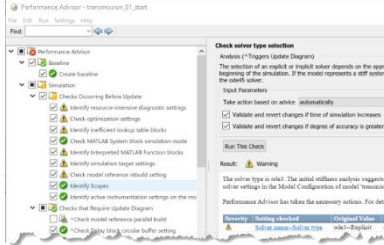
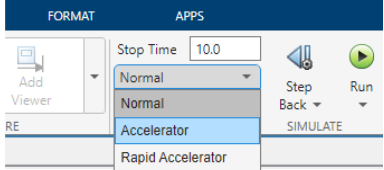
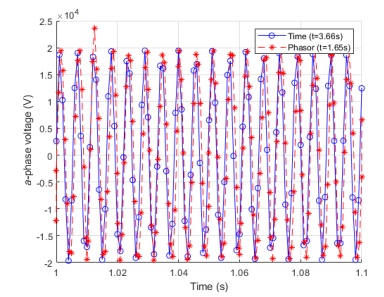


Další možnosti modelování

- 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](#)

Děkuji za pozornost.

Otázky?