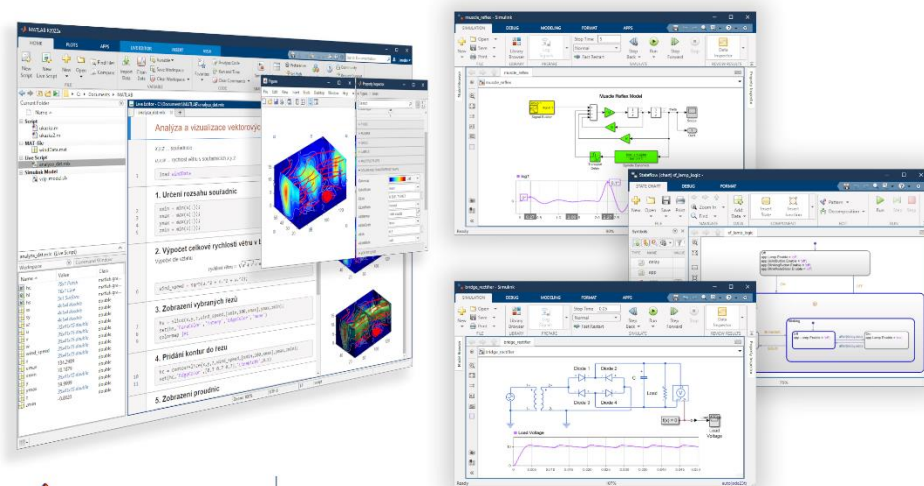


19.4.2023 Technical Computing Prague 2023

Model-Based Design ve vývoji elektrických pohonných systémů



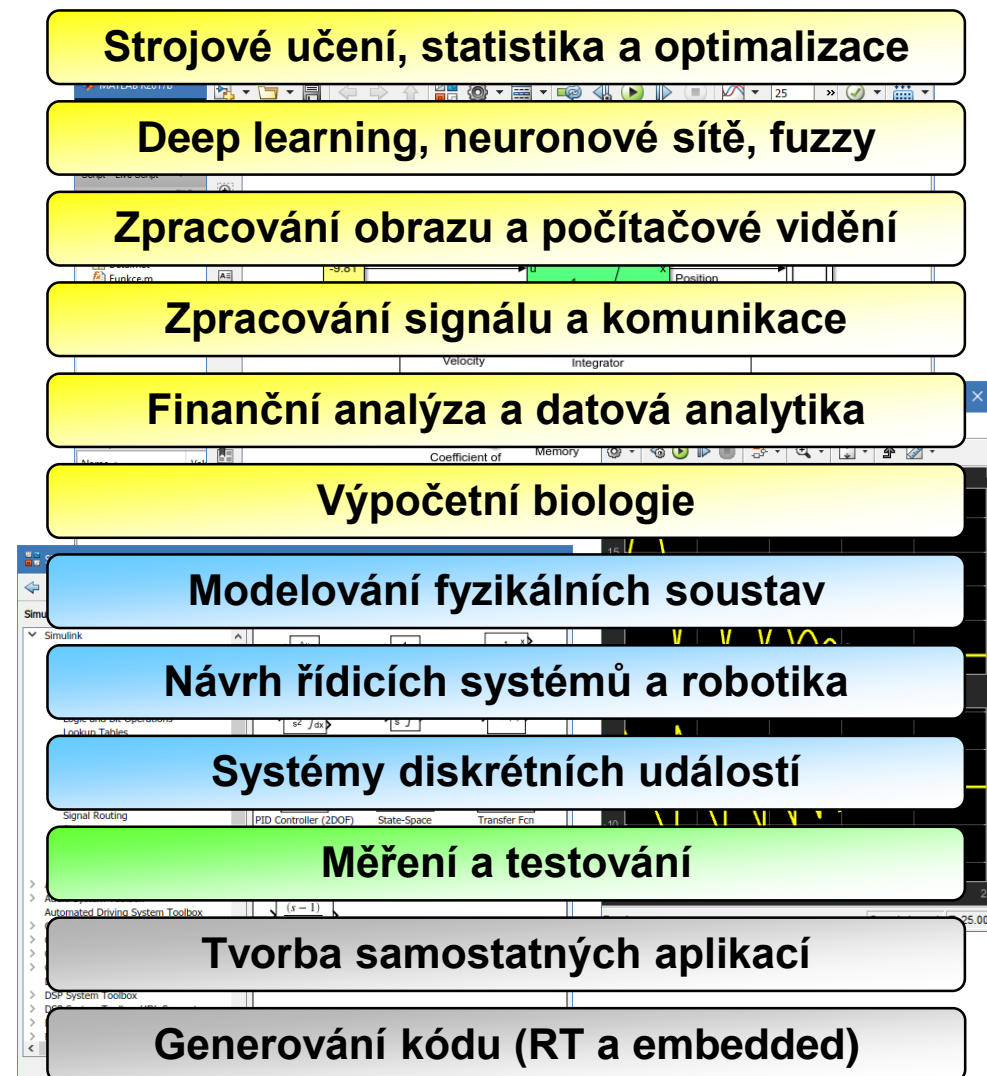
Jaroslav Jirkovský
jirkovsky@humusoft.cz

www.humusoft.cz
info@humusoft.cz

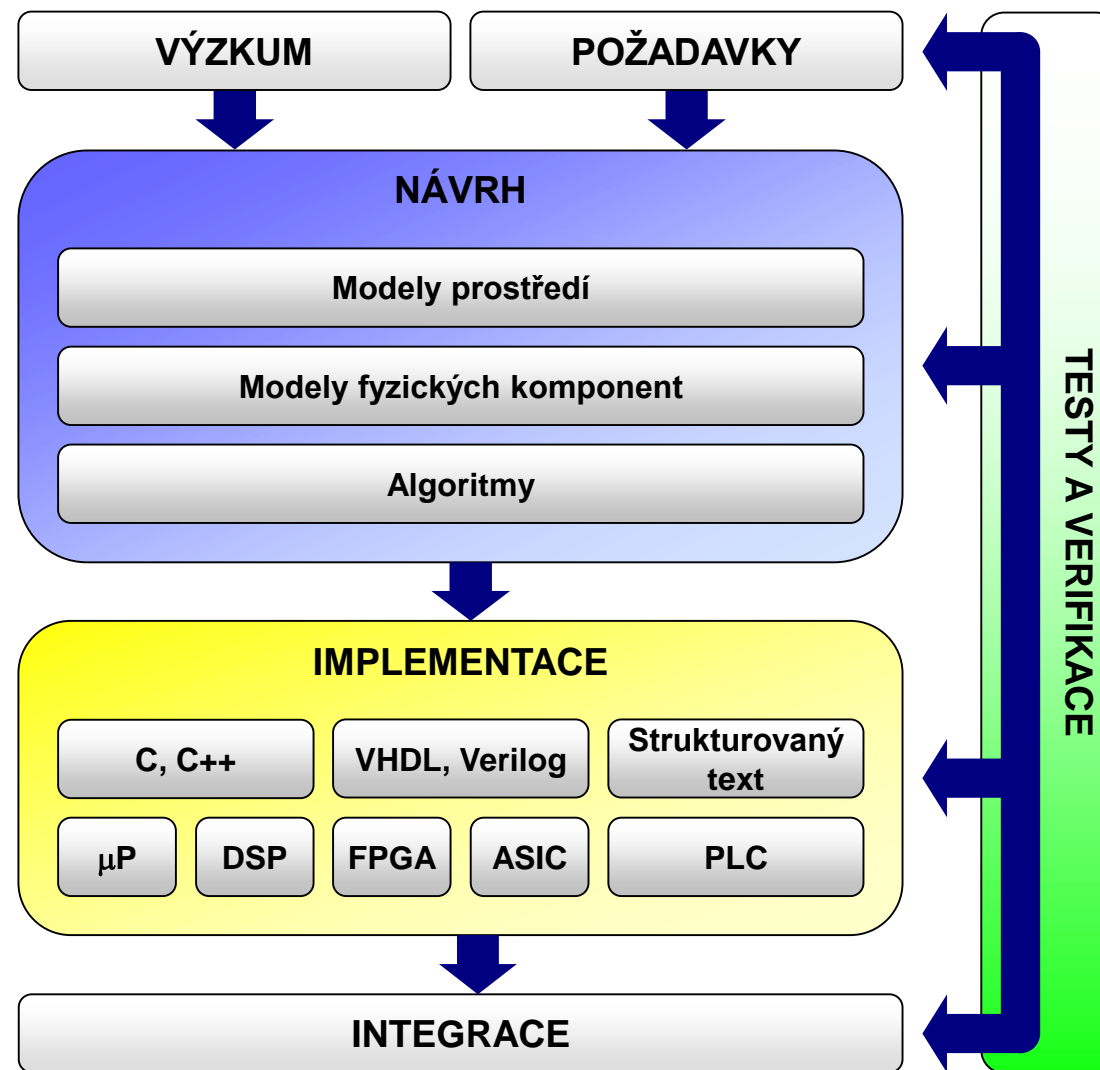
www.mathworks.com

Co je MATLAB a Simulink

- MATLAB
 - inženýrský nástroj a interaktivní prostředí pro vědecké a technické výpočty
 - grafické a výpočetní nástroje
 - grafické aplikace (APPS)
 - otevřený systém
- Simulink
 - nadstavba MATLABu
 - modelování, simulace a analýza dynamických systémů
 - prostředí blokových schémat
 - platforma pro Model-Based Design
- Aplikační knihovny



Vývoj metodou Model-Based Design

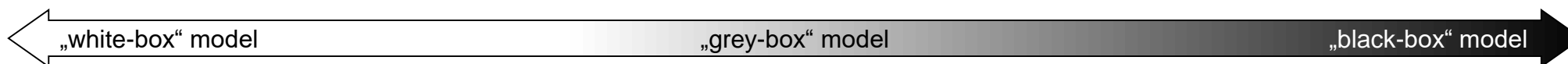


Přístupy k modelování

- Pro různé situace jsou vhodné různé přístupy

Fyzikální vztahy

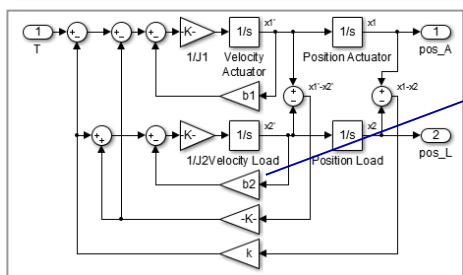
Naměřená data



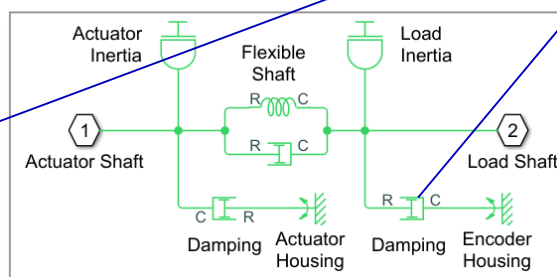
Modelování rovnic

$$J_1 x_1'' = -b_1 x_1' - k(x_1 - x_2) - b_{12}(x_1' - x_2') + T$$

$$J_2 x_2'' = -b_2 x_2' + k(x_1 - x_2) - b_{12}(x_1' - x_2')$$

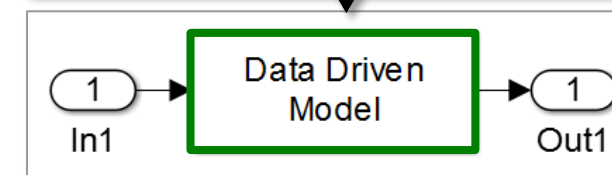
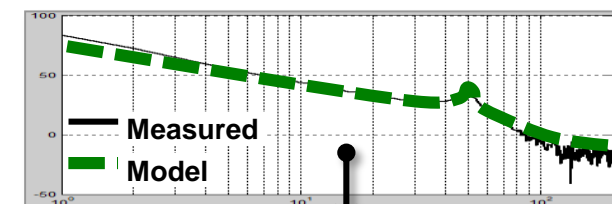


Fyzikální síť

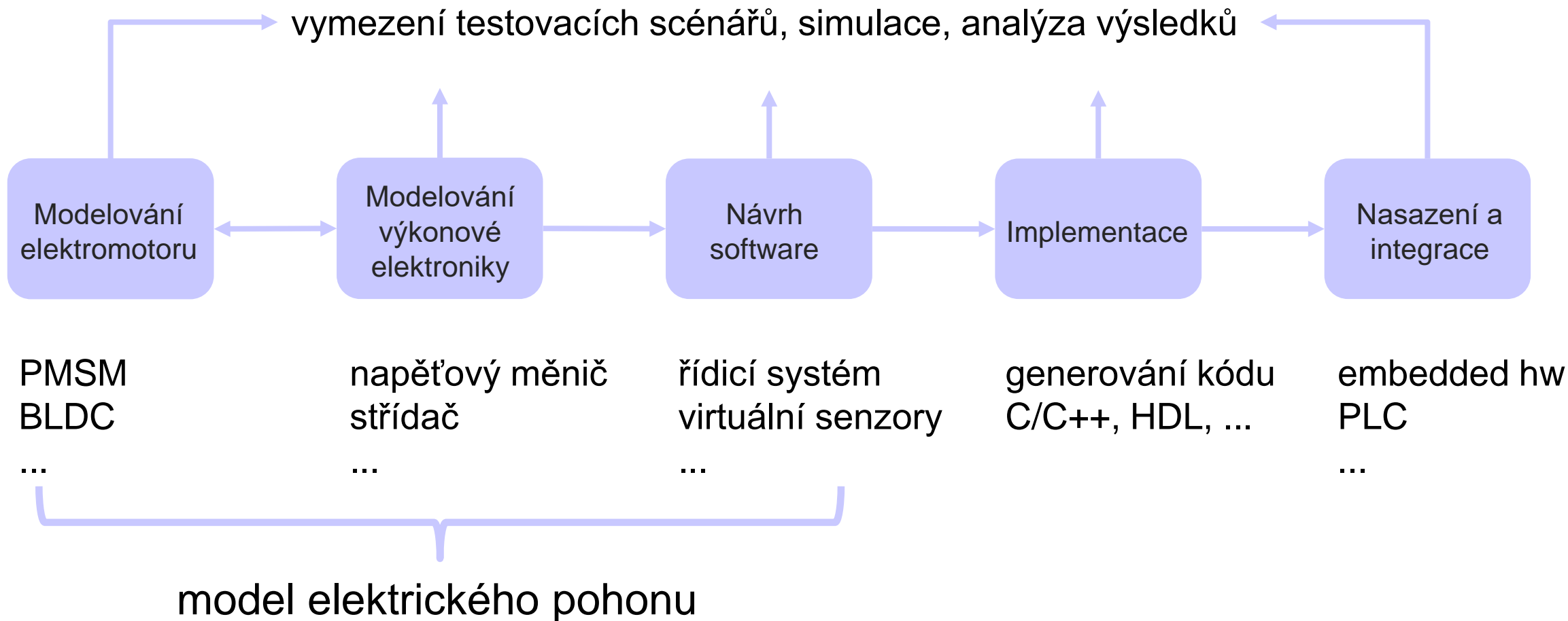


Ladění neznámých parametrů

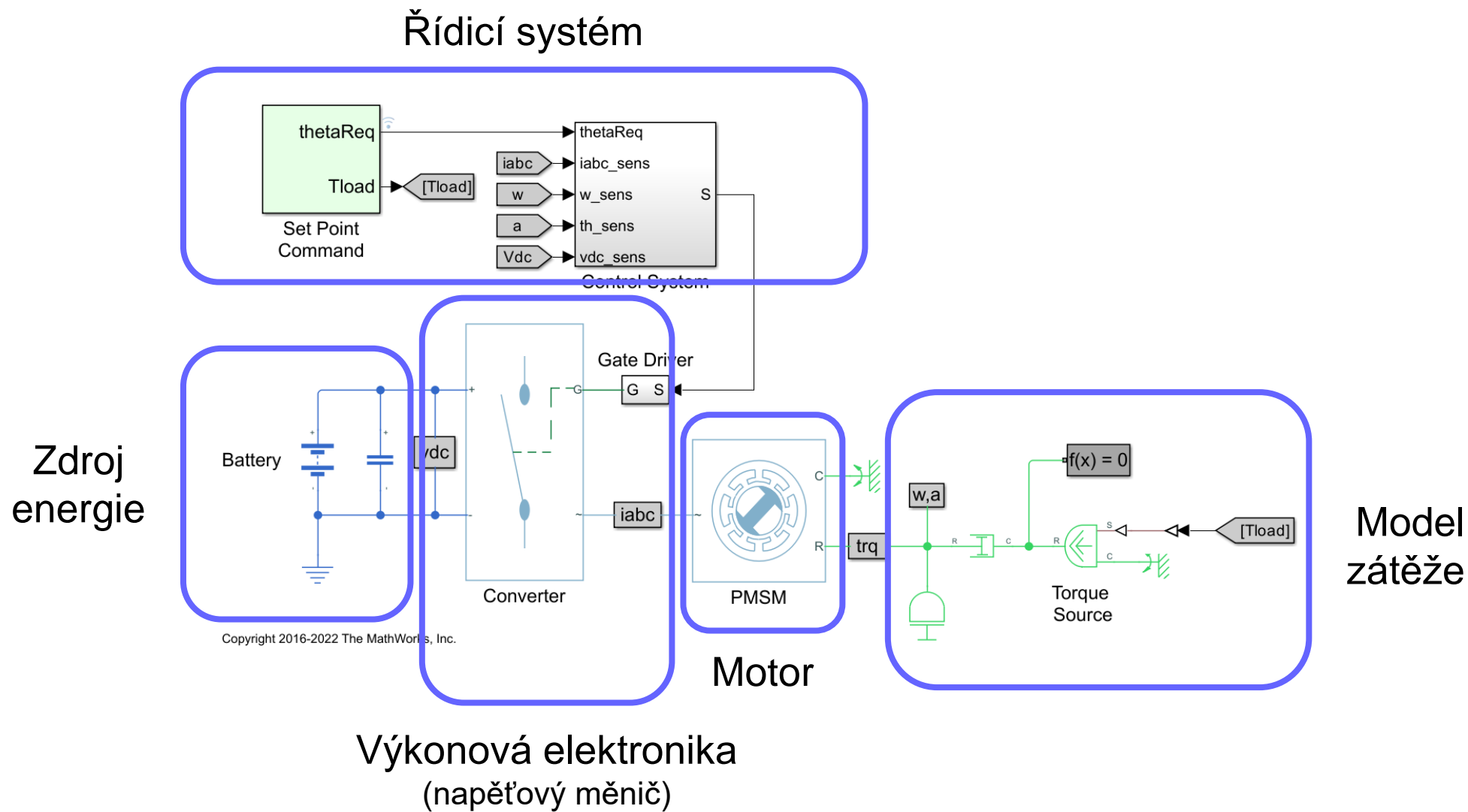
Identifikace soustav



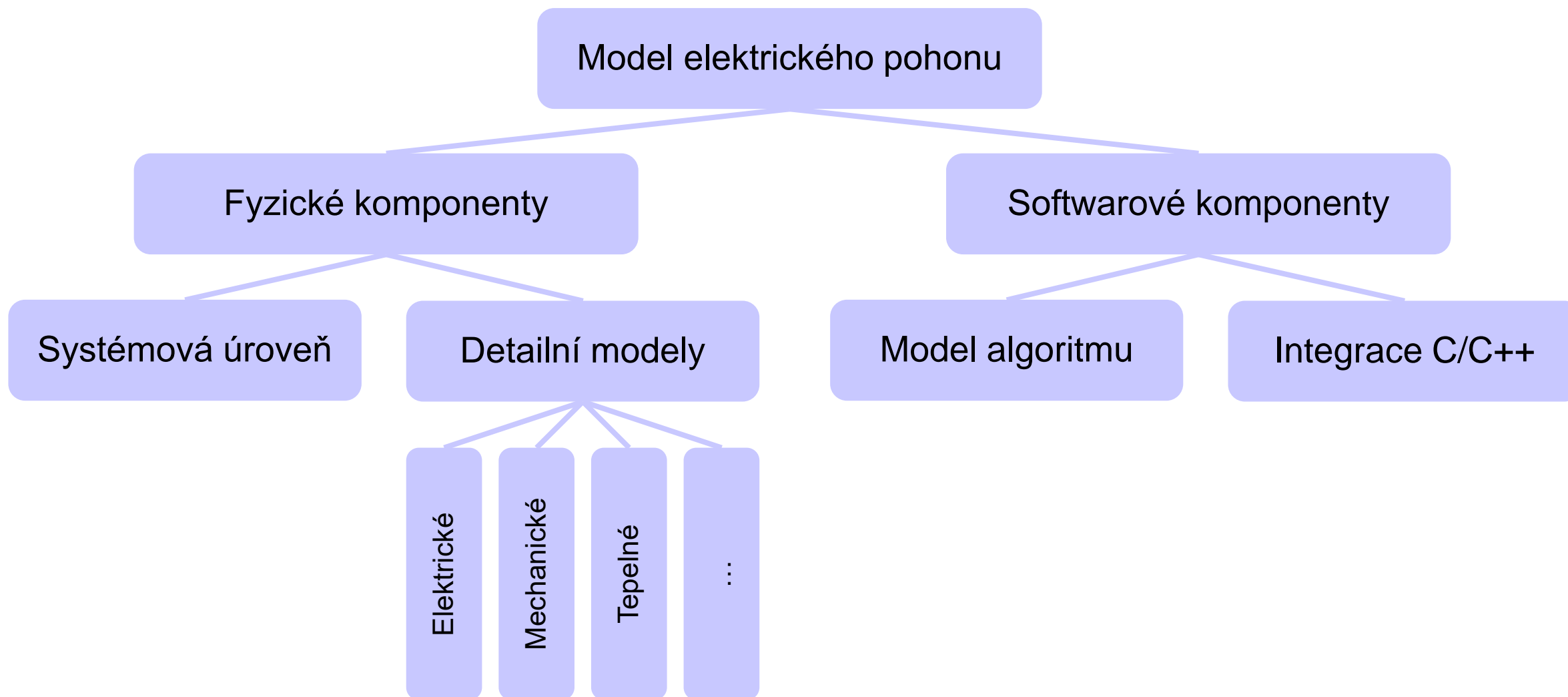
Typické kroky při vývoji elektrického pohonného systému



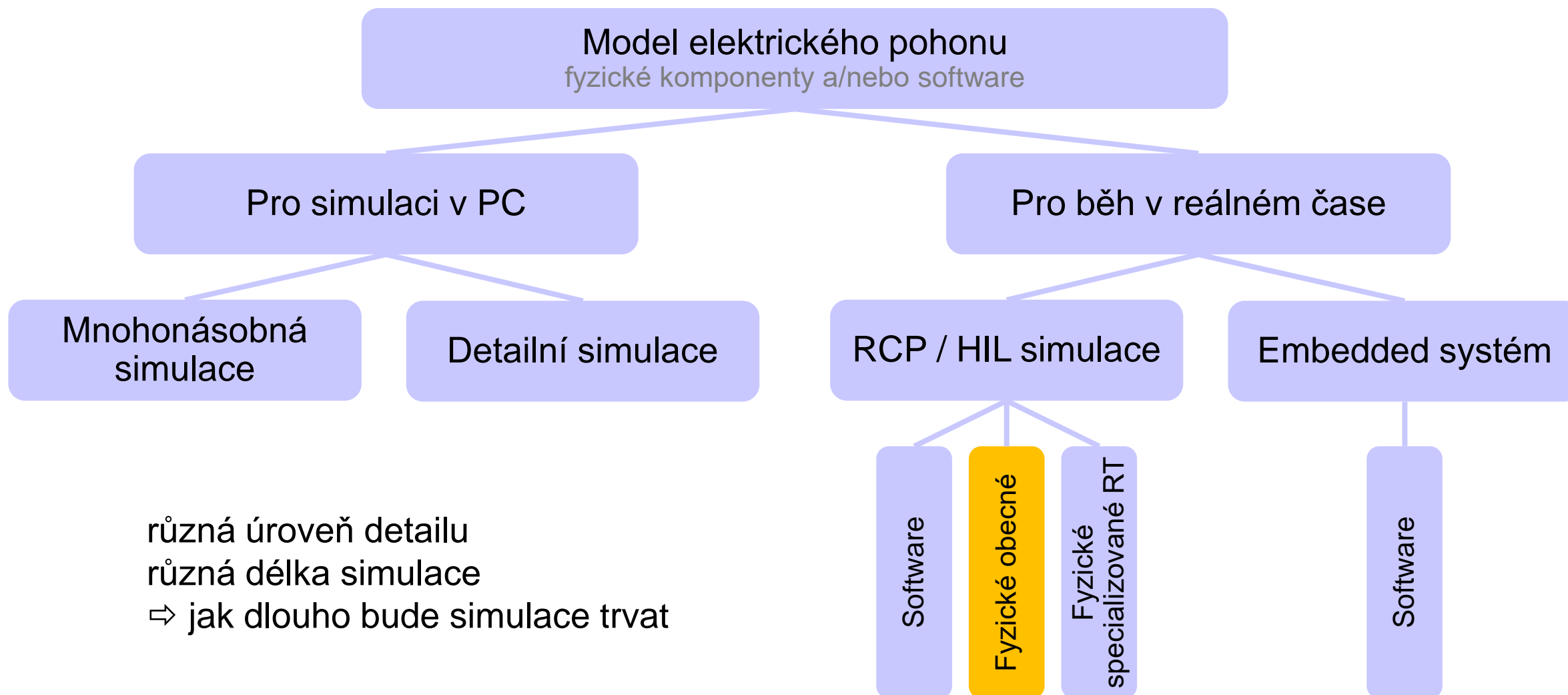
Příklad modelu elektrického pohonu



Modelování elektrického pohonu z hlediska komponent



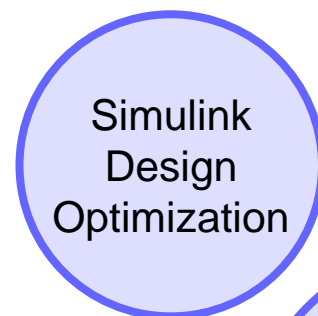
Modelování elektrického pohonu z hlediska simulace/nasazení



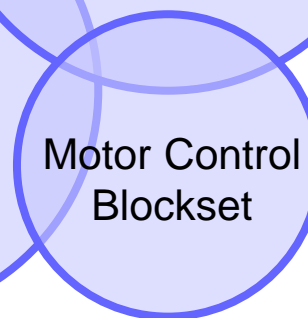
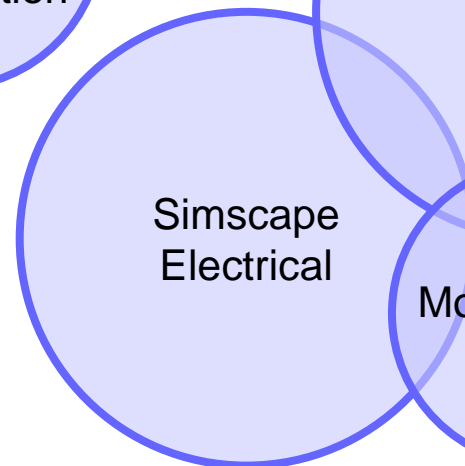
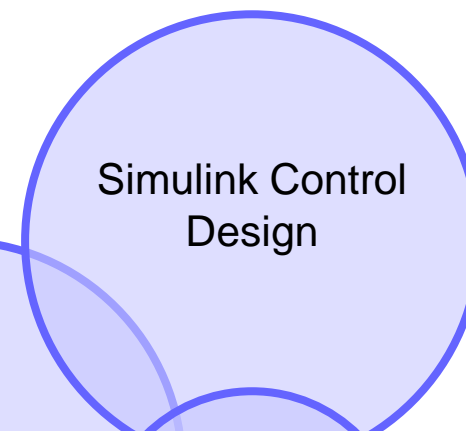
různá úroveň detailu
různá délka simulace
⇒ jak dlouho bude simulace trvat

MATLAB a Simulink pro modelování elektrického pohonu

Optimalizace a ladění parametrů modelu



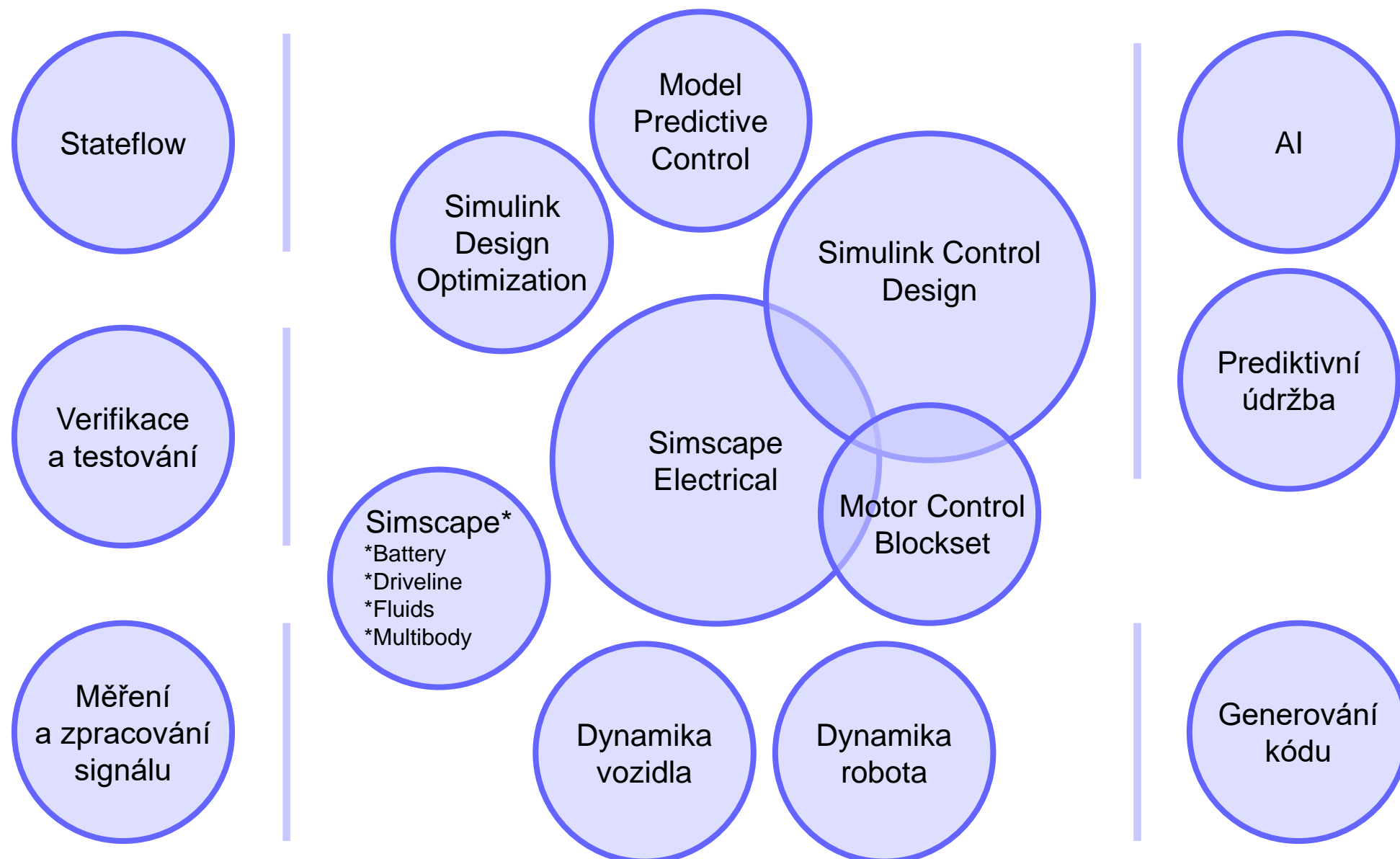
Linearizace modelů a návrh řídicích systémů



Modelování mechatronických systémů, výkonové elektroniky a jejich řízení*

Návrh a implementace algoritmů pro řízení pohonů**

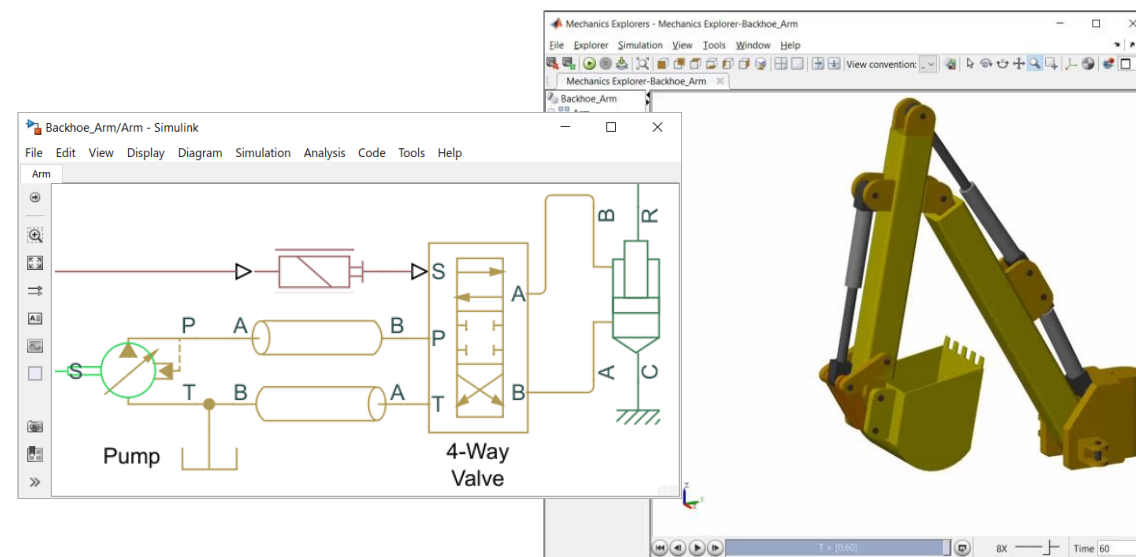
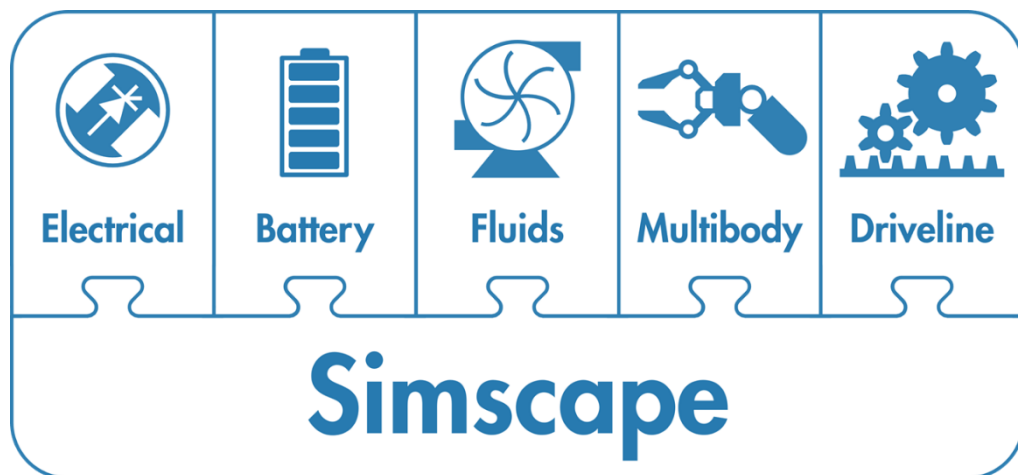
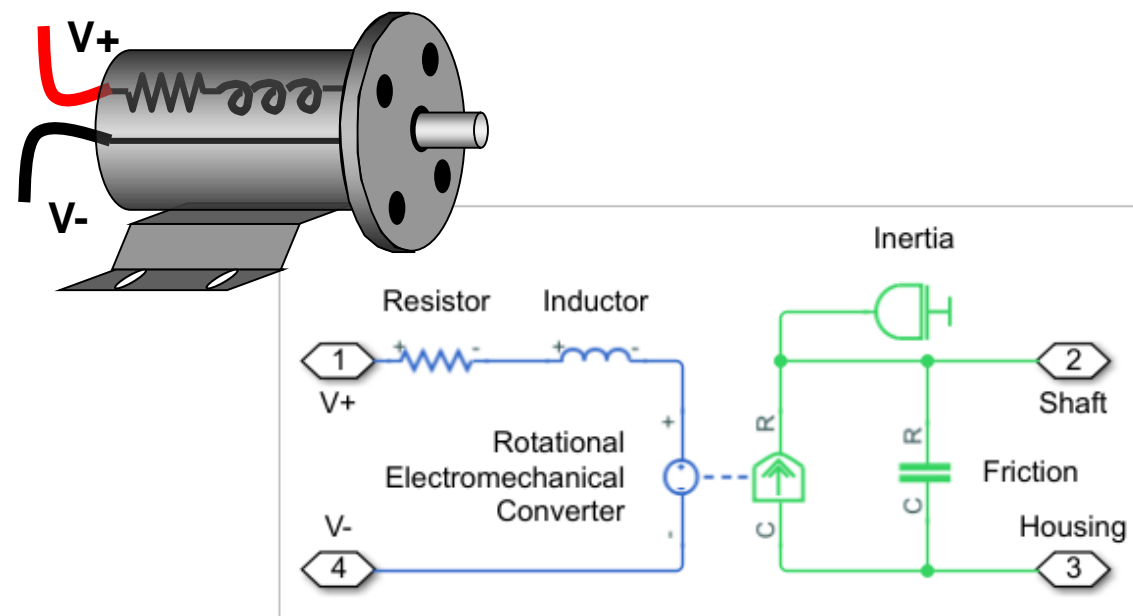
MATLAB a Simulink pro modelování elektrického pohonu



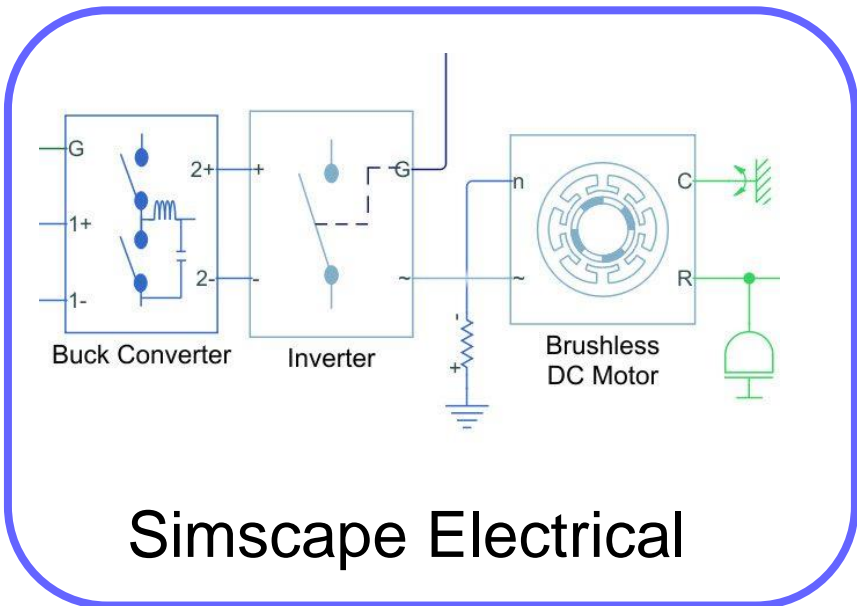
Modelování pohonu a výkonové elektroniky

Fyzikální modelování soustav

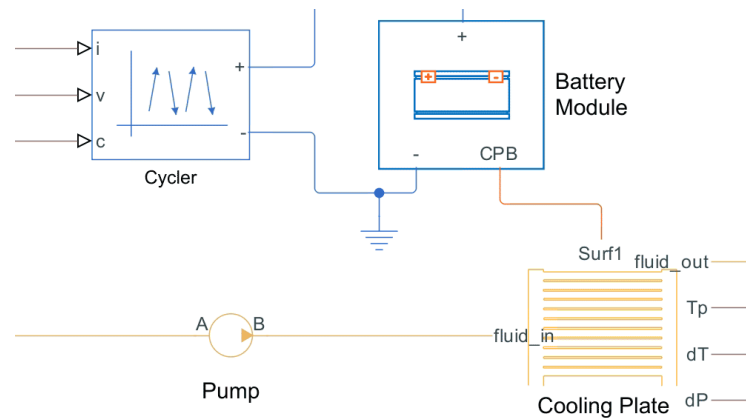
- Knihovny **Simscape**
- Bloky reprezentující reálné prvky
 - skládání na základě fyzické struktury
 - bez zápisu diferenciálních rovnic
- Multi-fyzikální systémy



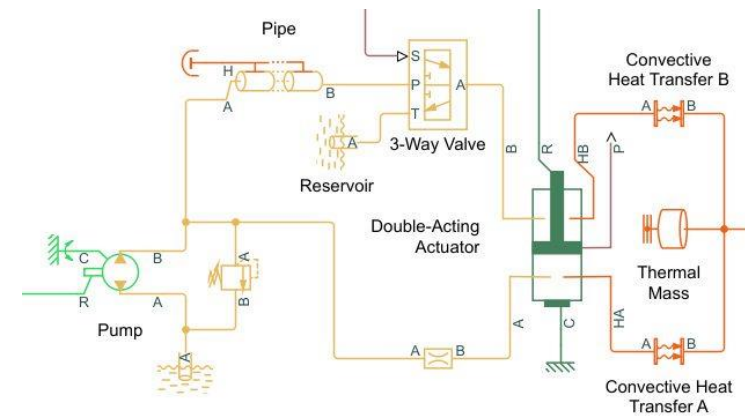
Fyzikální modelování soustav



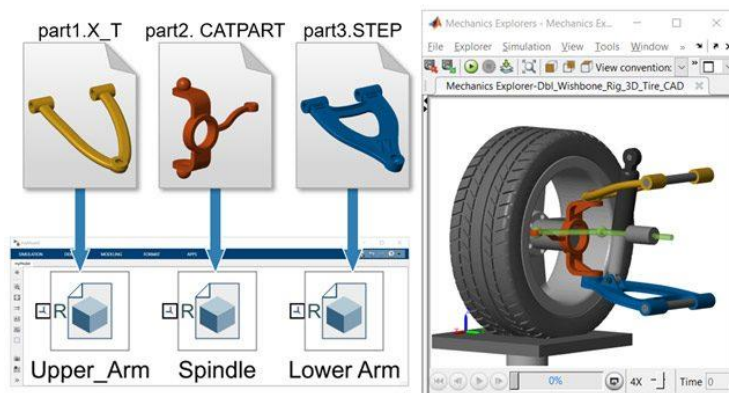
Simscape Electrical



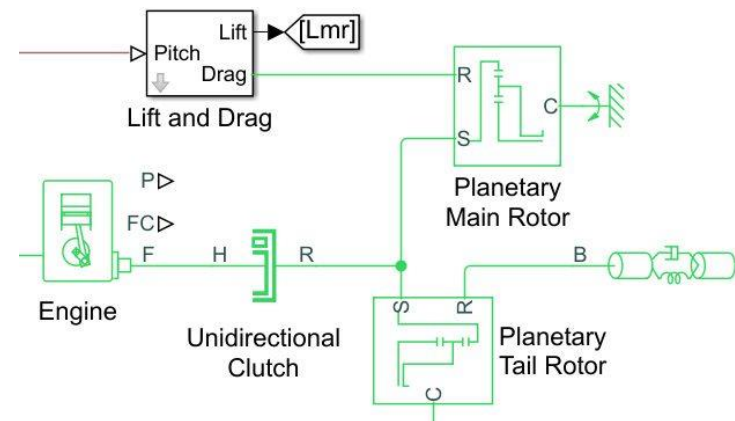
Simscape Battery



Simscape Fluids



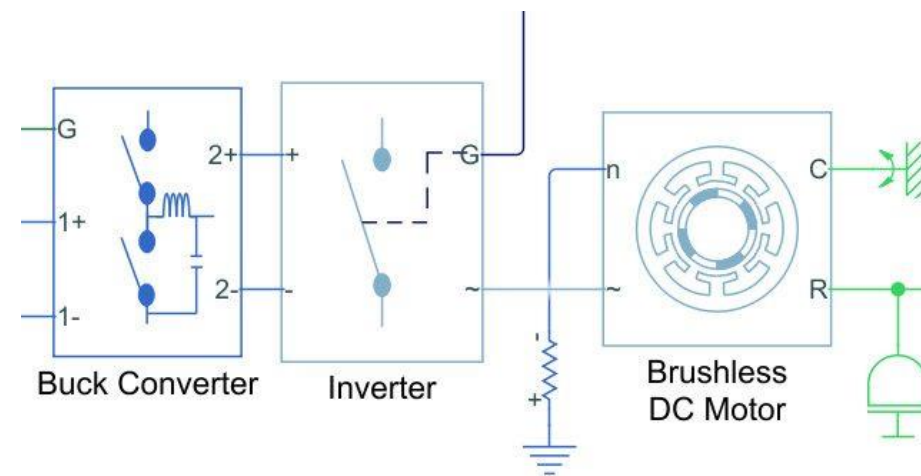
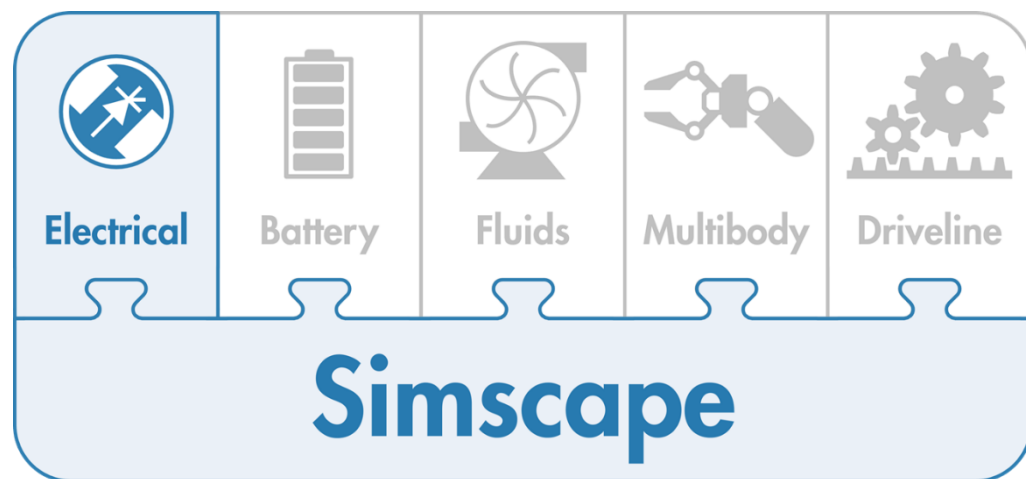
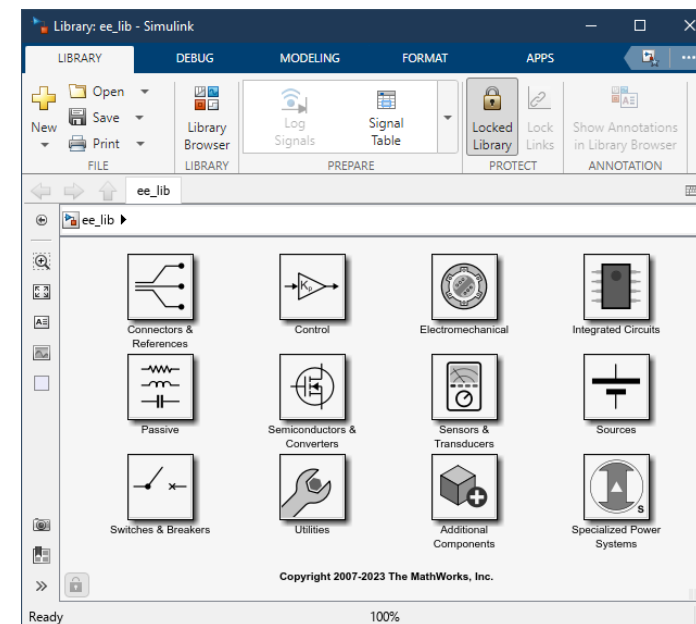
Simscape Multibody



Simscape Driveline

Simscape Electrical

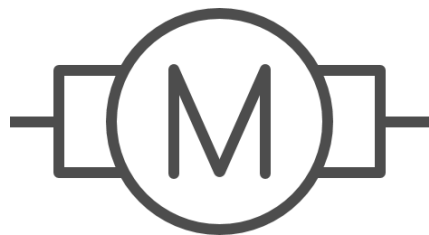
- Fyzikální modelování elektronických a elektro-mechanických systémů
 - výkonová elektronika, elektrické pohony, ...
 - topologie elektrického systému reprezentována schématickým zapojením



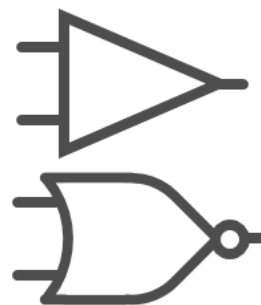
Modely prvků v Simscape Electrical



polovodičové prvky



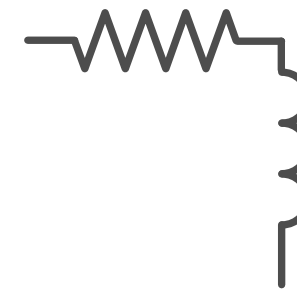
motory, akční prvky



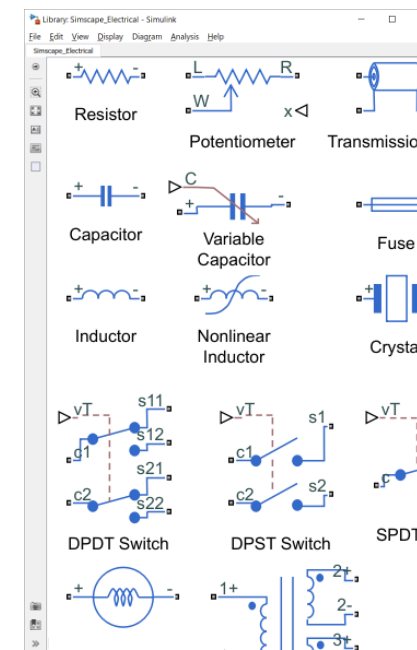
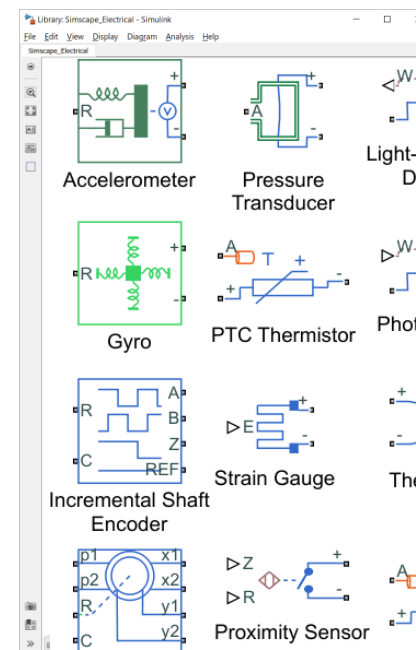
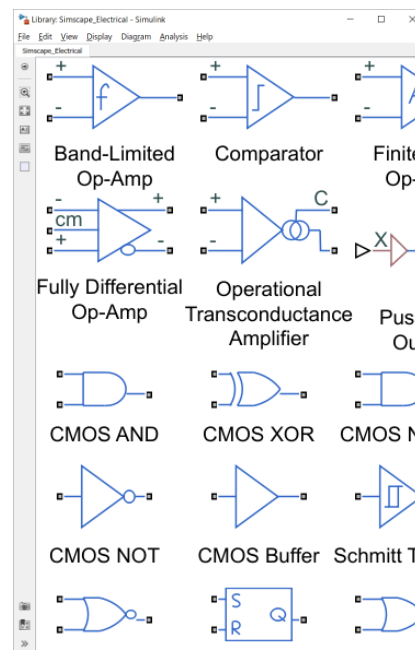
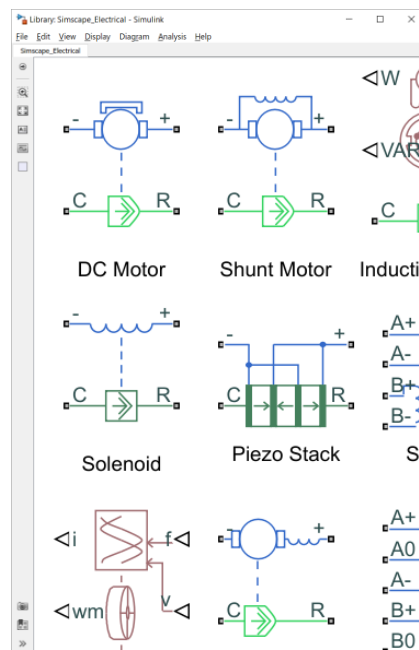
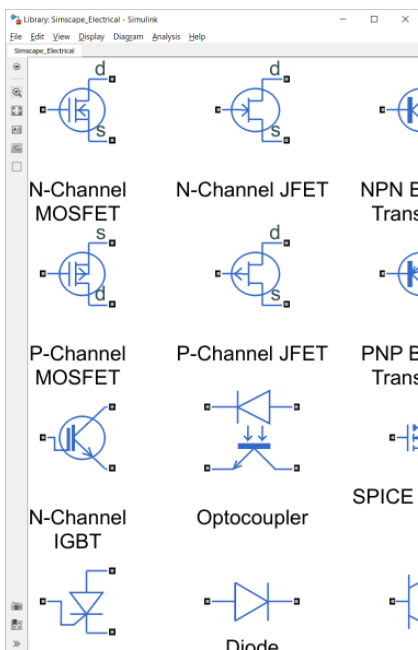
op. zesilovače, logická hradla



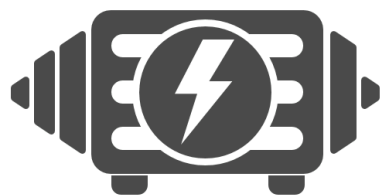
senzory



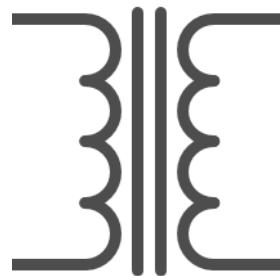
pasivní součástky



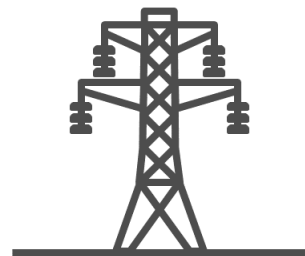
Modely prvků v Simscape Electrical



třífázové
motory



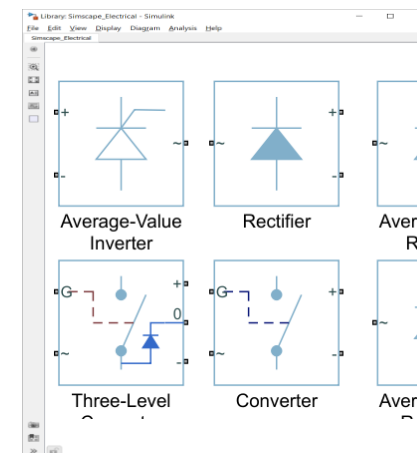
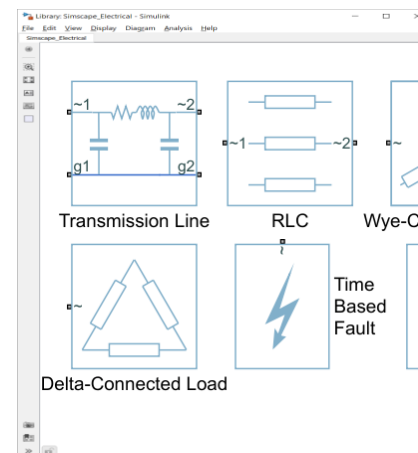
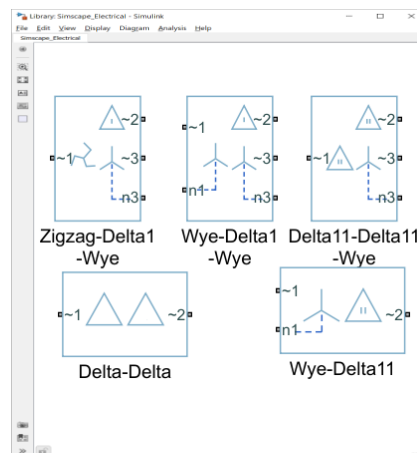
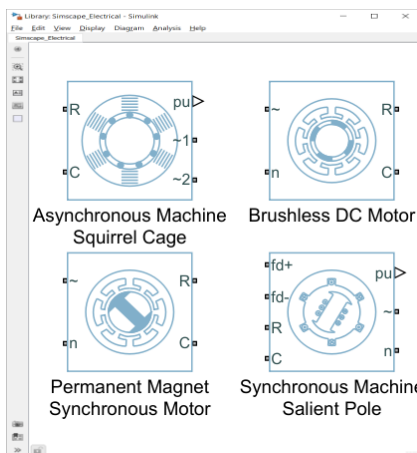
transformátory



vedení,
FACTS



konvertory



Modely prvků v Simscape Electrical



obrazové
motory



transformátory

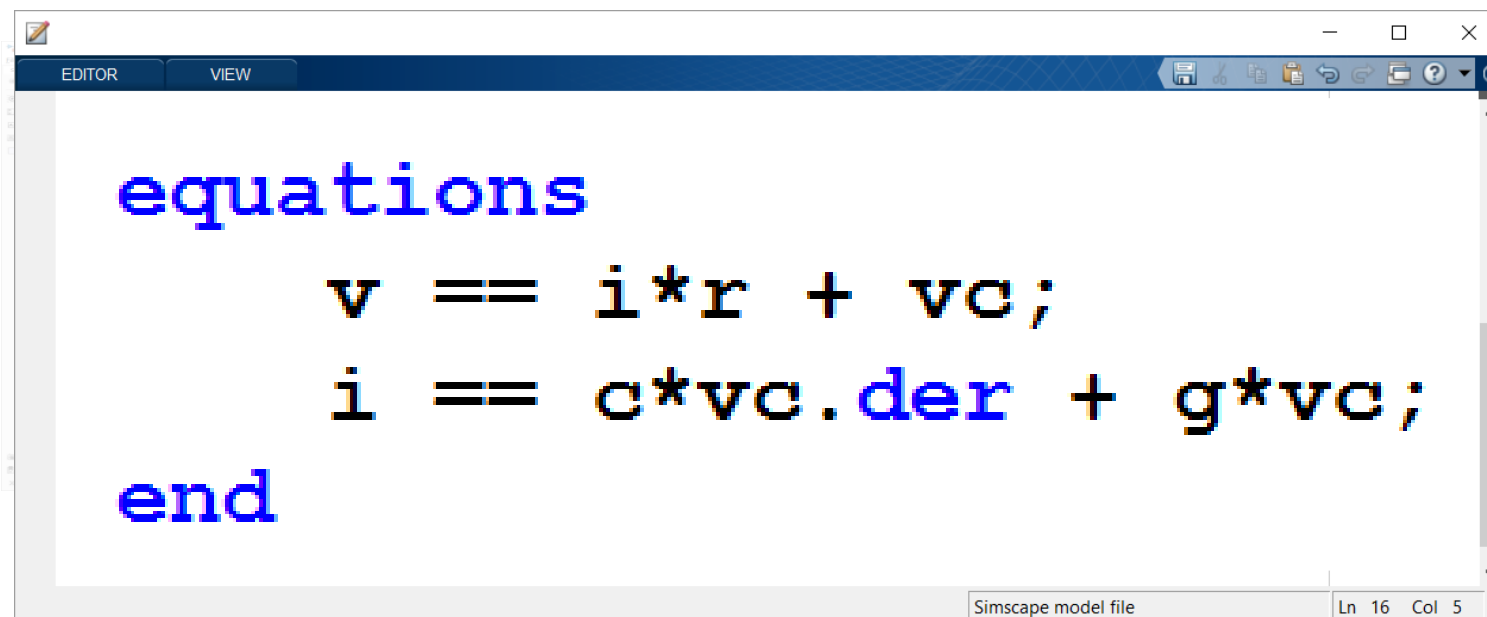
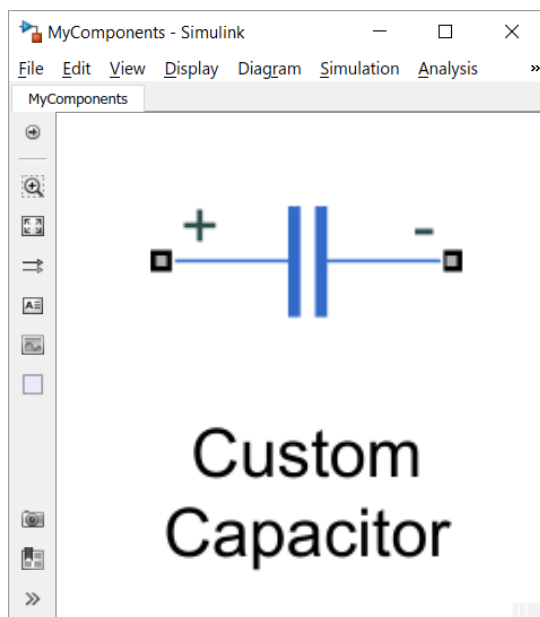


vedení,
FACTS



konvertory

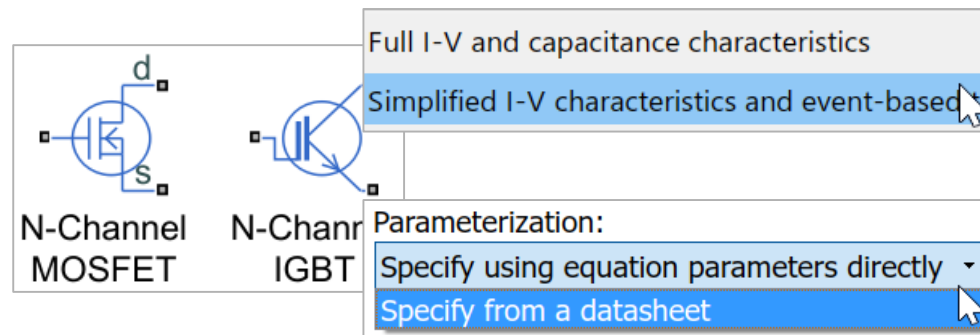
+ možnost vytvoření vlastních prvků pomocí jazyka Simscape Language



Simscape Electrical: Polovodičové prvky

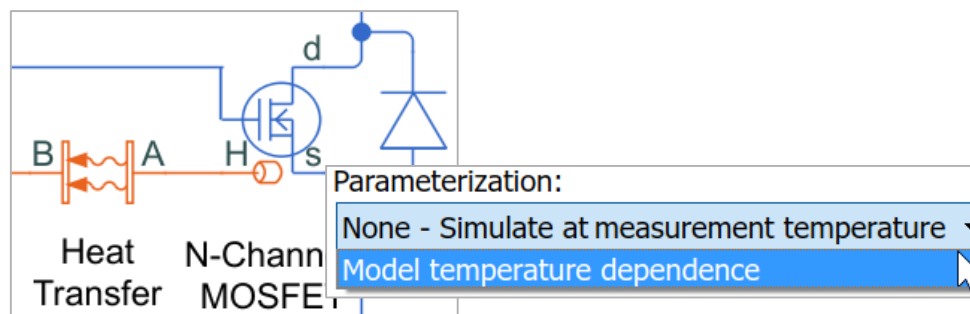
- Spínání a zesílení signálu

- parametrizace dle „data sheets“
- zjednodušené i detailní

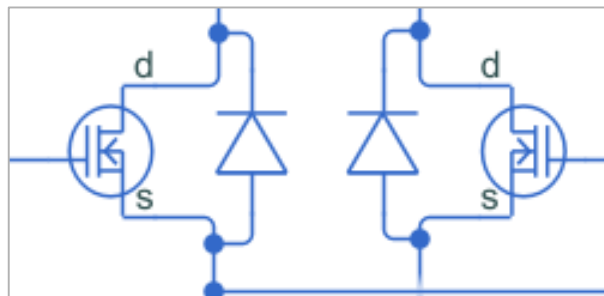


- Tepelné efekty

- vliv na chování prvku
- přenos tepla do okolí



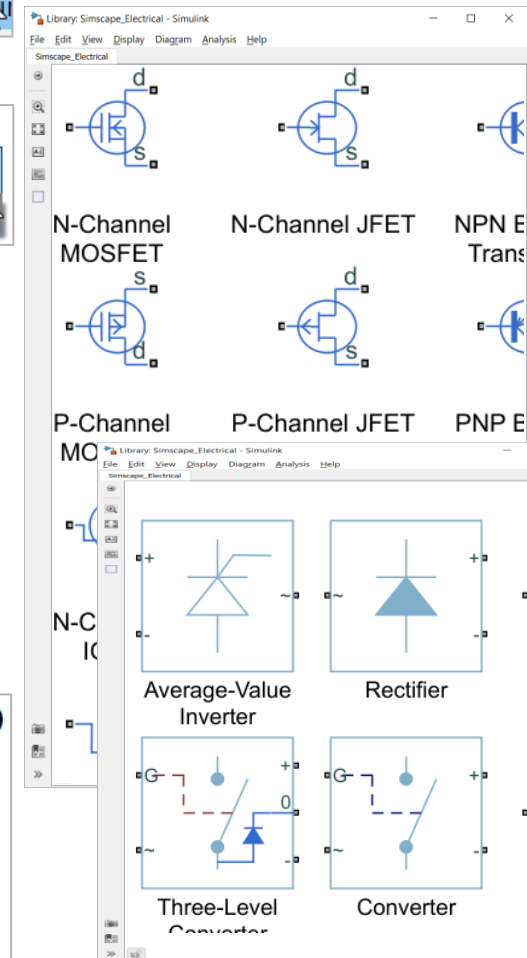
- Měření výkonových ztrát



```
>> elec_getPowerLossSummary(solar_converter_simlog)
```

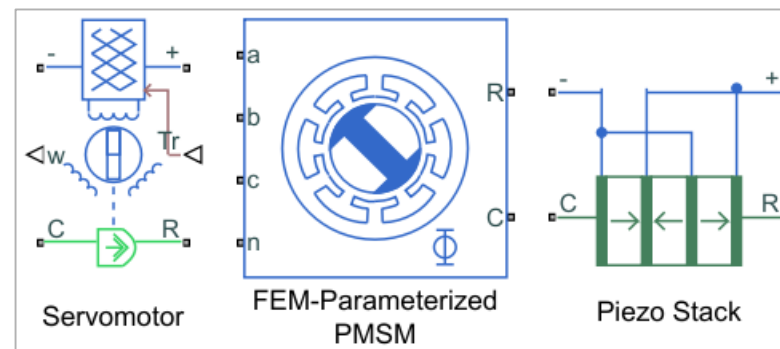
LoggingNode	Power
'elec_solar_converter.D1'	0.96137
'elec_solar_converter.MOS1'	16.173
'elec_solar_converter.MOS2'	21.824

ukázka knihoven



Simscape Electrical: Pohony

- Translační a rotační pohony
 - parametrizace dle „data sheets“ nebo s daty z FEM software
 - specifikace elektrických ztrát



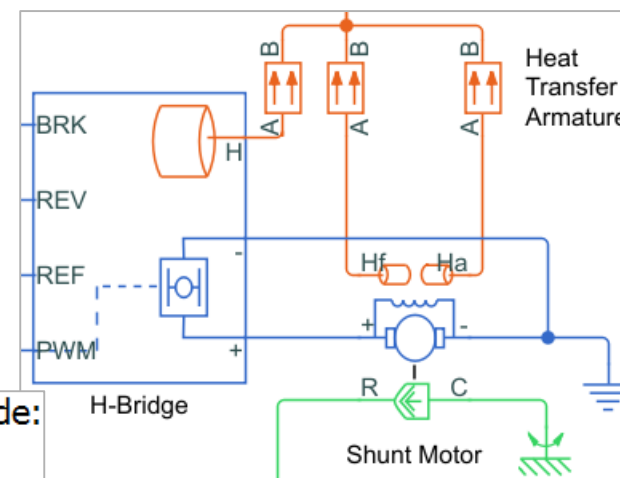
Parameterization:

- By equivalent circuit parameters
- By motor ratings

Parameterize losses by:

- Single efficiency measurement
- Tabulated loss data

- Tepelné efekty
 - chování závislé na teplotě
 - přenos tepla do okolí

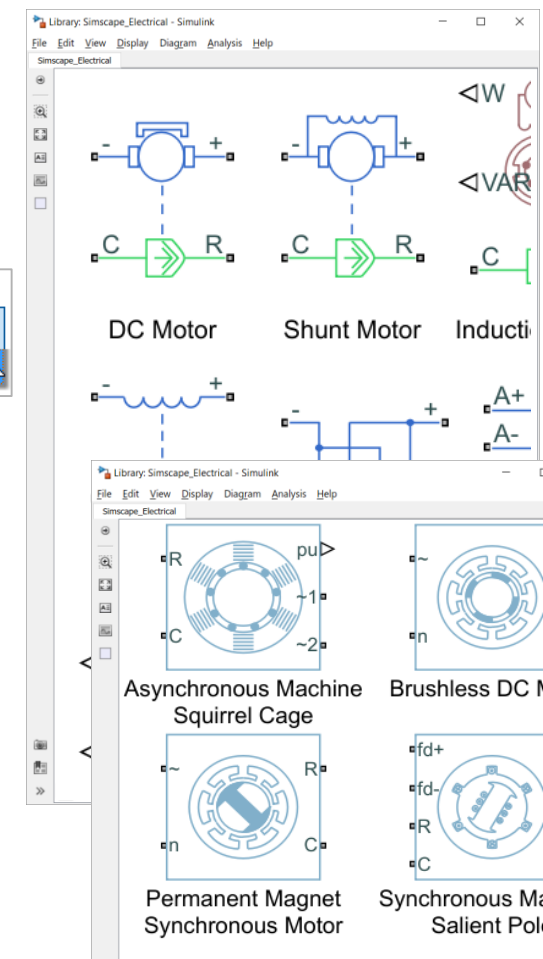


Simulation mode:

- Averaged
- PWM

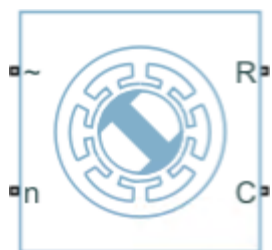
- Zahrnutí / zanedbání účinků spínání

Ukázka knihoven



Simscape Electrical: Pohony

- Databáze s hodnotami parametrů odpovídajících vybraným pohonům různých dodavatelů



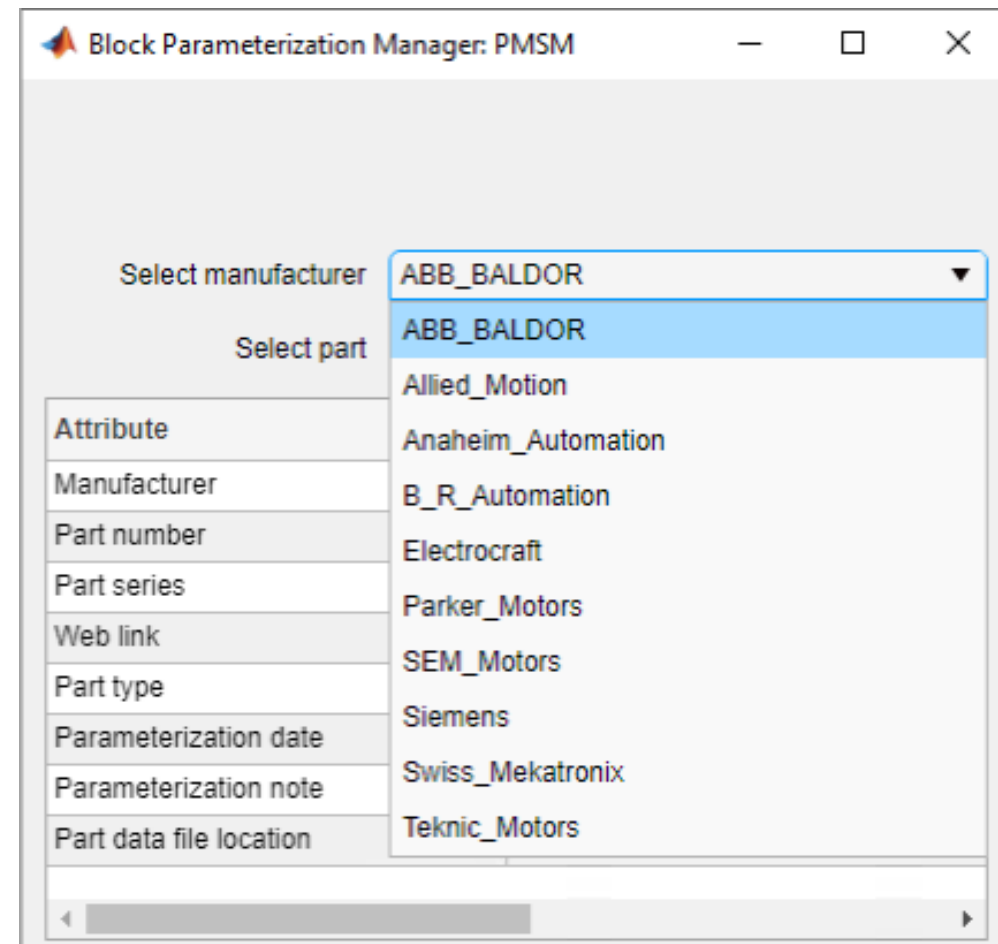
PMSM

PMSM

This block represents a permanent magnet synchr

Right-click on the block and select Simscape block

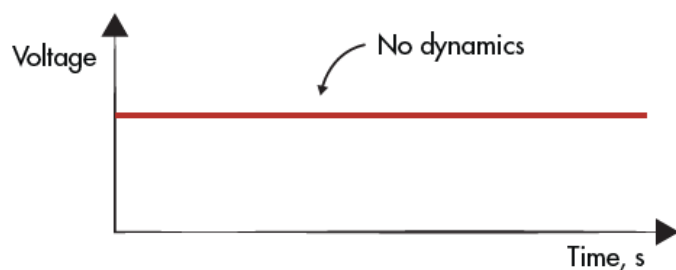
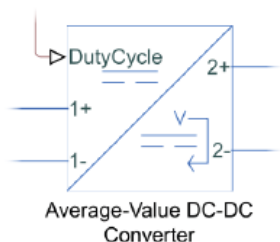
[Select a predefined parameterization](#)



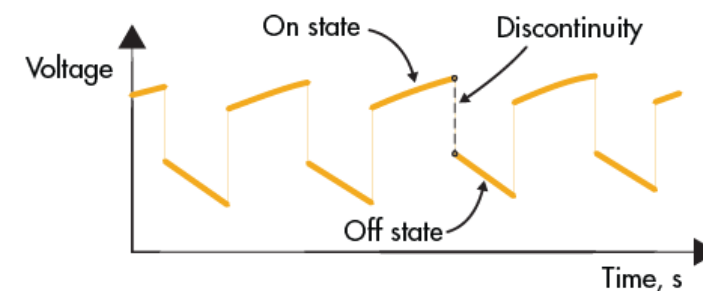
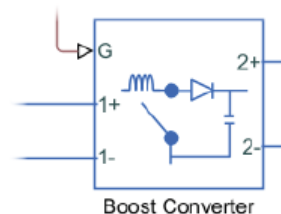
Úroveň detailu

- Pro různé účely je možné využít různou úroveň detailu (např: DC-DC měnič)

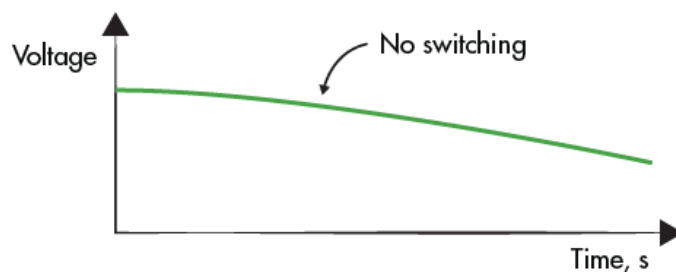
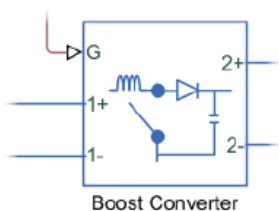
Průměrná hodnota



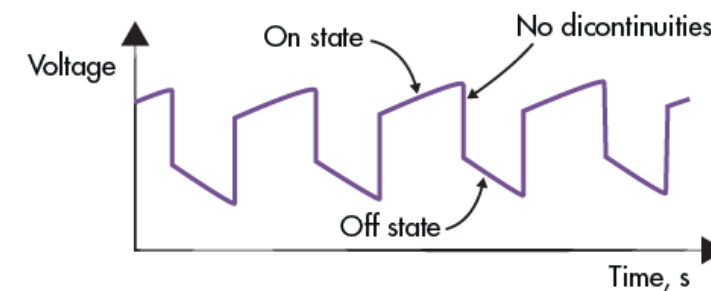
Po částech lineární spínání



Průměrná hodnota spínání



Nelineární spínání



Návrh řídicího systému

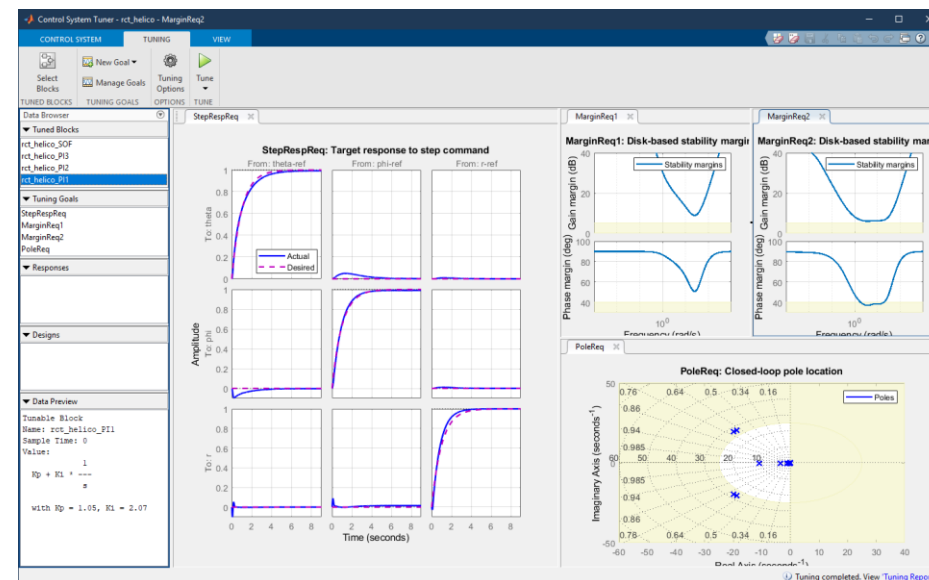
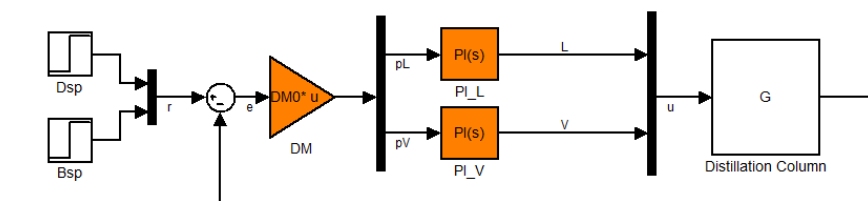
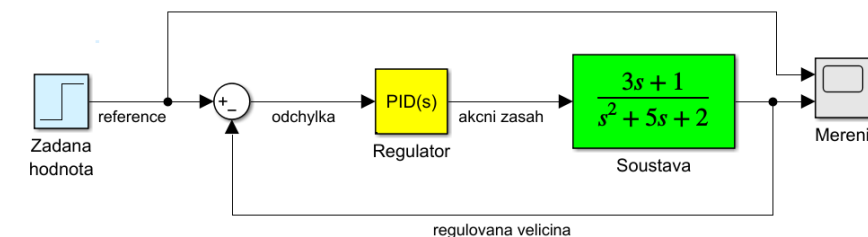
Modelování řídicích systémů

- Klasické řídicí systémy

- PID regulace
- obecný přenos (lead, lag, lead-lag)
- pozorovatel stavu, stavová zpětná vazba
- ...

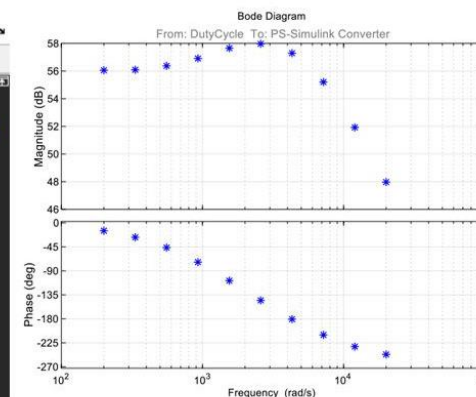
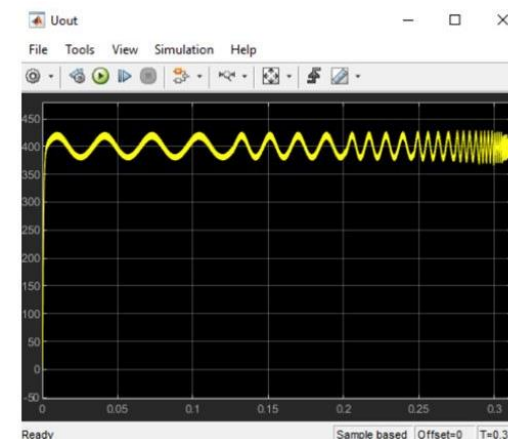
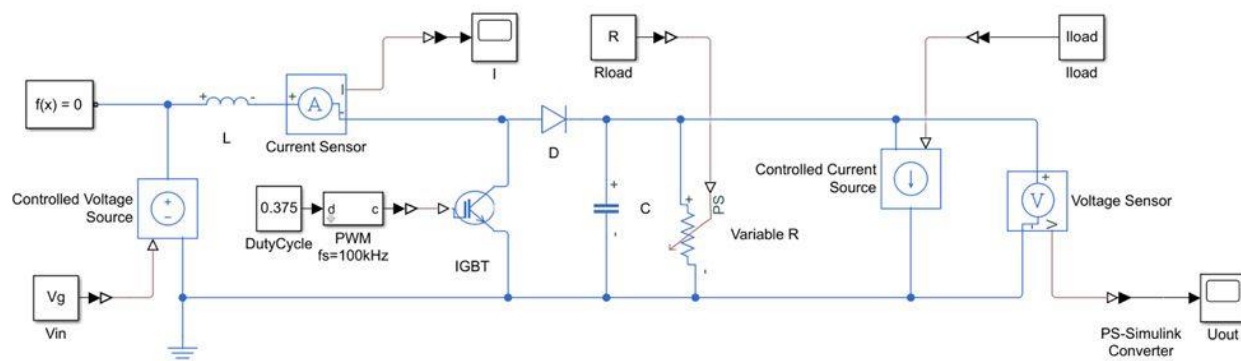
- Ladění klasických řídicích systémů

- založeno na práci s linearizovaným modelem
- PID Tuner – jednosmyčková PID regulace
- Control System Tuner – libovolná MIMO struktura



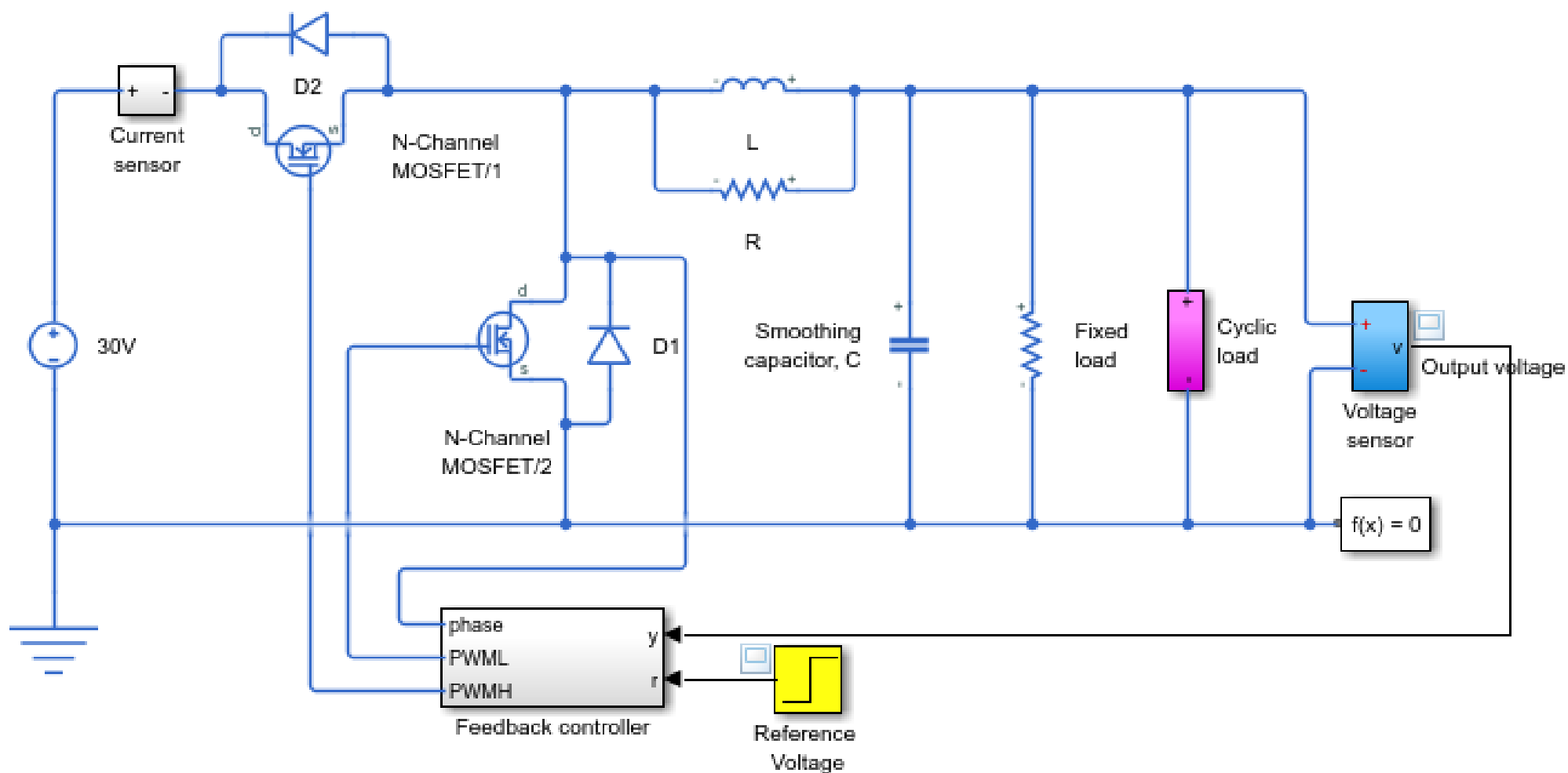
Lineární aproximace modelu výkonové elektroniky

- Problém: spínané zařízení nemá exaktní lineární aproximaci
- Řešení: Small-Signal Analysis
 - aplikace drobného proměnného signálu a sledování odezvy (sin, chirp, rand)
 - odhad přenosové funkce nebo frekvenční charakteristiky



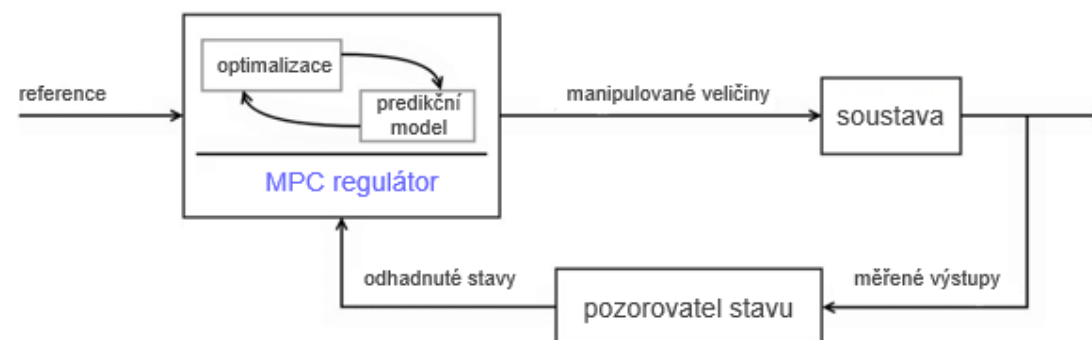
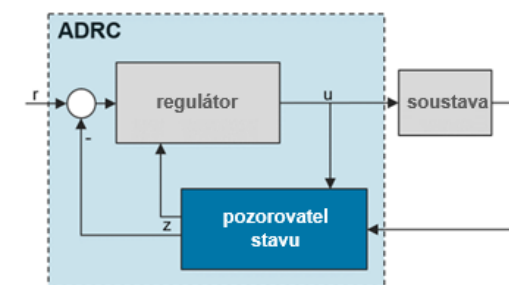
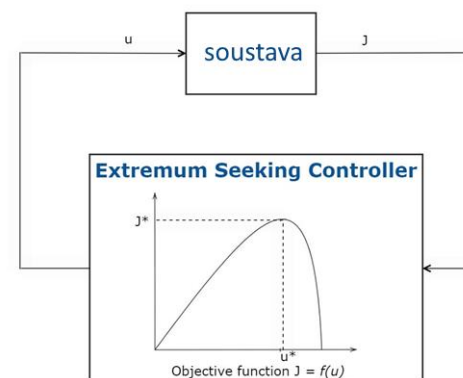
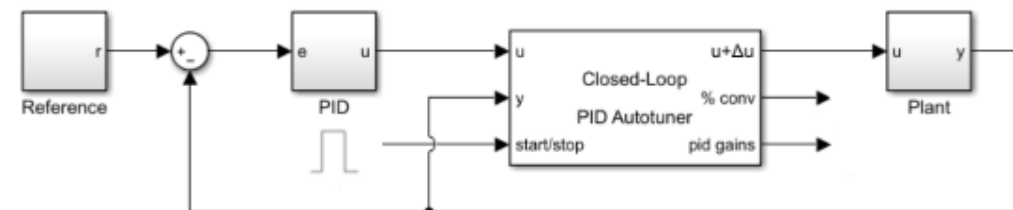
- Získaný LTI model umožní aplikaci klasických postupů při návrhu řízení

Ukázka: PID regulace DC-DC měniče



Modelování řídicích systémů

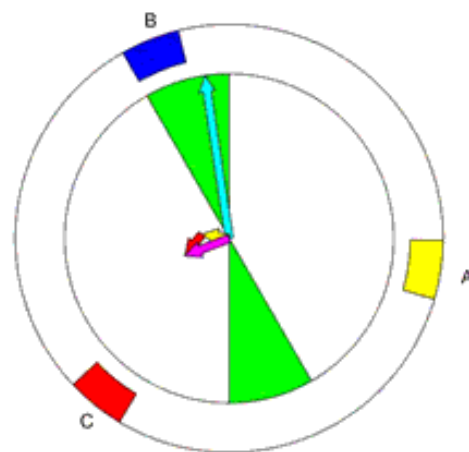
- Adaptivní řídicí systémy
 - Open-Loop / Closed-Loop PID Autotuner
 - Extremum Seeking Control
 - Model Reference Adaptive Control
 - Active Disturbance Rejection Control
- Prediktivní řízení
 - Model Predictive Control (MPC)
- Využití AI
 - Reinforcement learning (RL)



Řízení elektrických pohonů

- Motory s elektronickou komutací
- BLDC
 - lichoběžníkové řízení
 - (field-oriented control)
- PMSM
 - field-oriented control

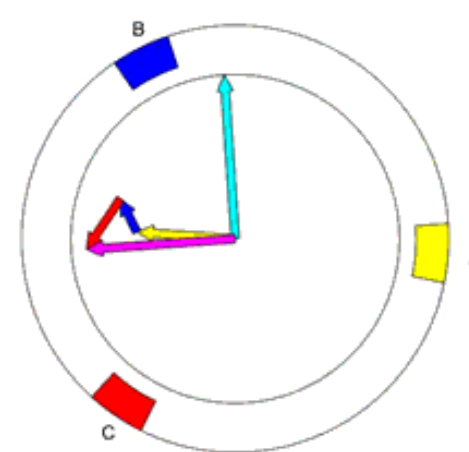
BLDC Six-Sector Commutation
Two Pole-Pair



Commutates every 30 mechanical degrees


One mechanical rotation sees two electrical rotation

PMSM Field-Oriented Control
Two Pole-Pairs



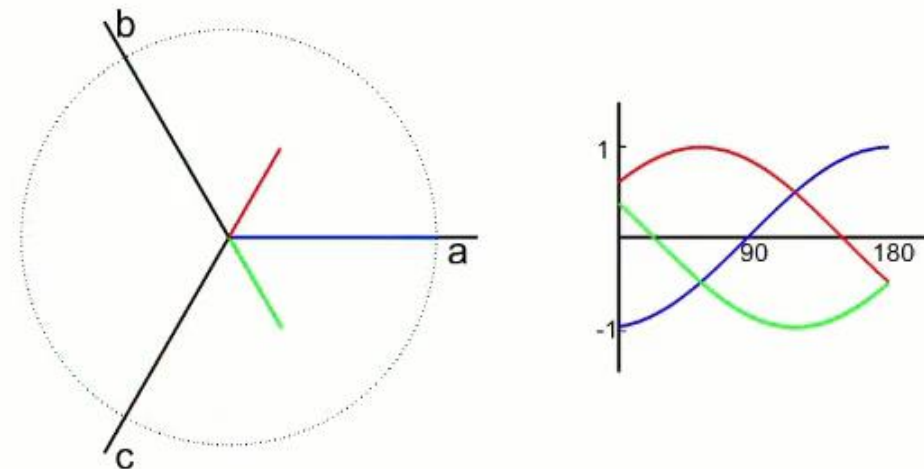
Current vector leads rotor magnetic reference by 90 mechanical degrees

One mechanical rotation sees two electrical rotations

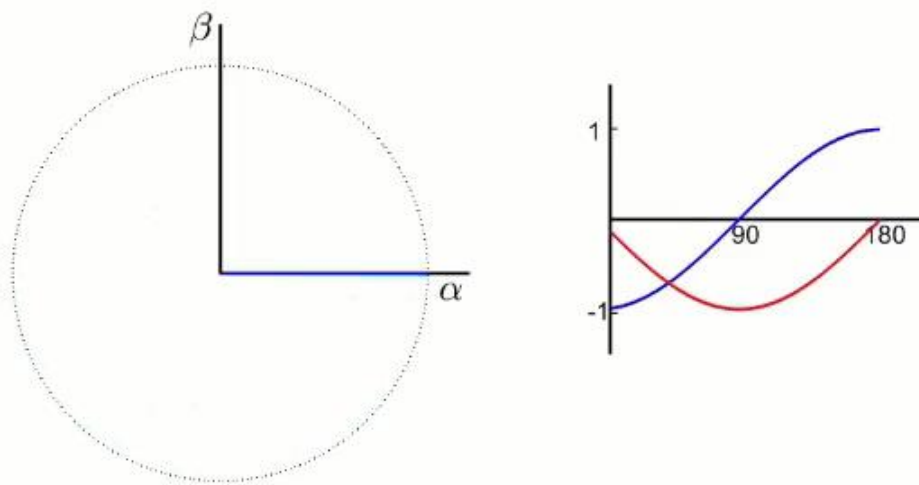
-  Sector
-  Rotor Magnetic Reference
-  Current Vector

Clarke a Park transformace

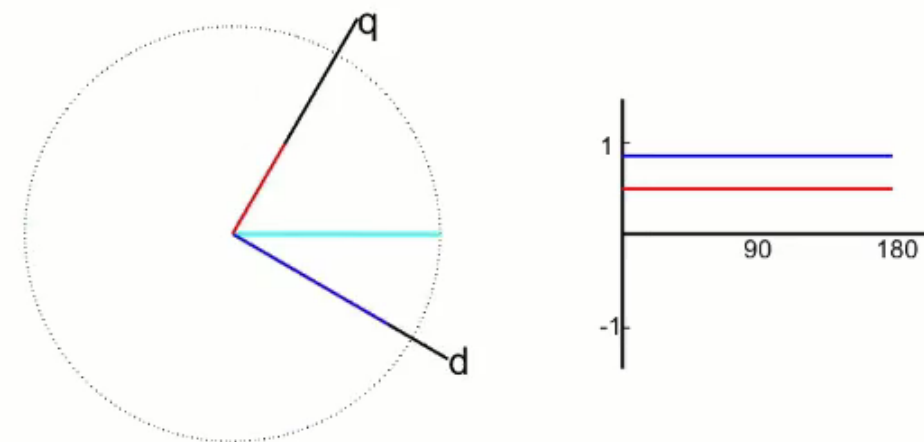
- Složky třífázového systému



- Transformace Clarkové

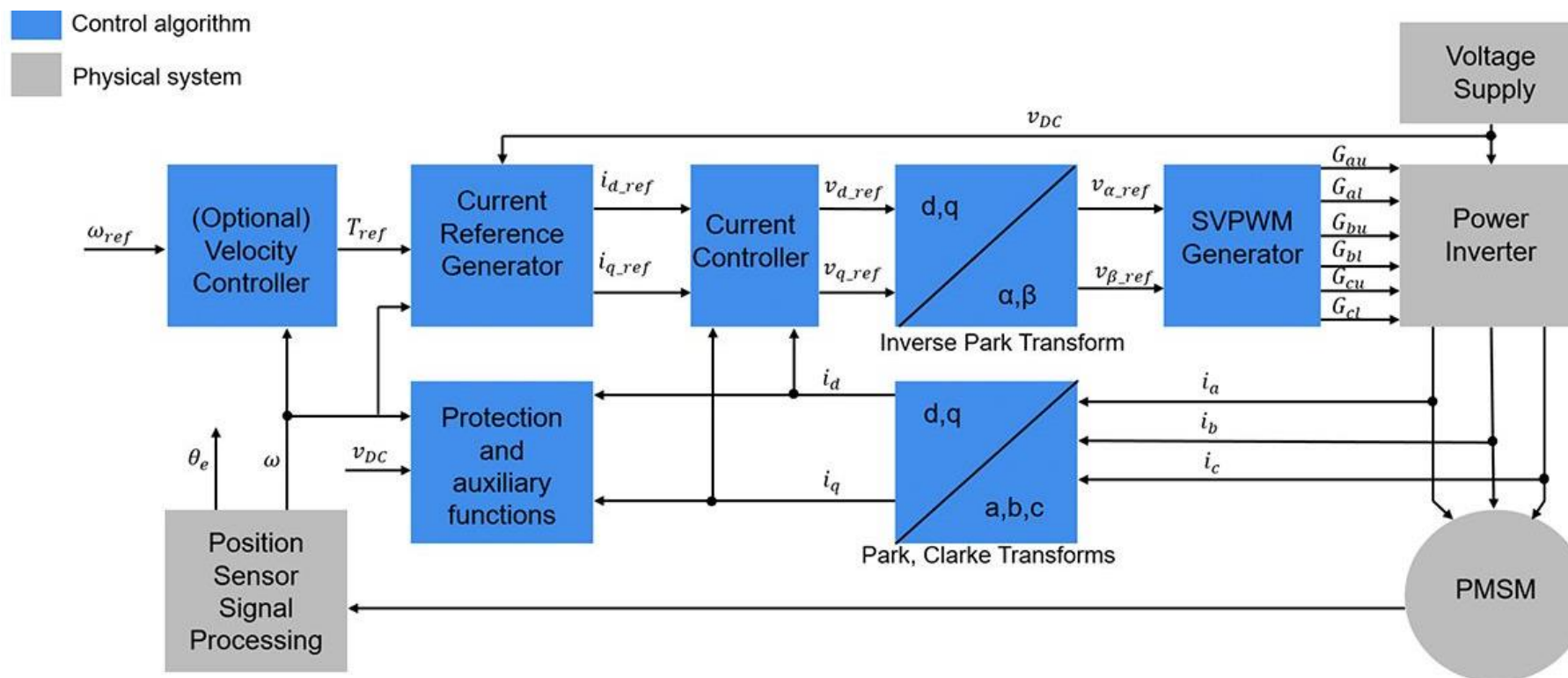


- Transformace Parkova



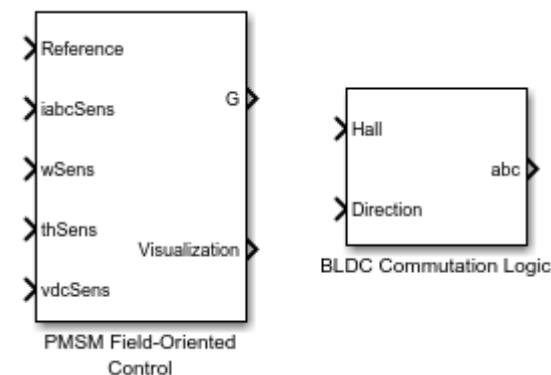
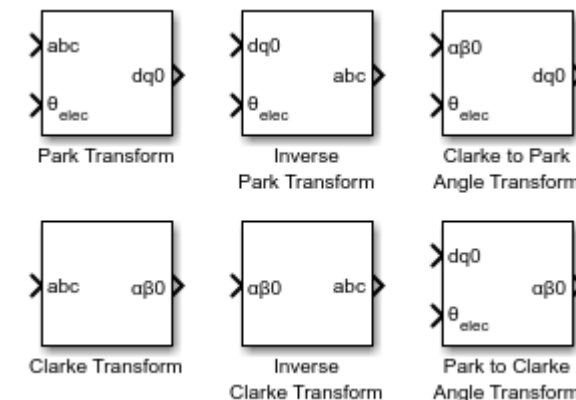
Field-Oriented Control (FOC)

- Typ vektorového řízení
- Využívá Clarke/Park transformace



Návrh řízení pohonu v prostředí Simulink

- Simscape Electrical
 - orientováno na práci s modelem pohonu
- Připravené bloky pro
 - Clarke / Park transformace
 - PWM různých typů
 - kompletní řízení pohonů BLDC, PMSM, IM, SM, SRM
- FOC
 - sestavení z jednotlivých částí
 - připravené hotové bloky



Návrh řízení pohonu v prostředí Simulink

- Motor Control Blockset

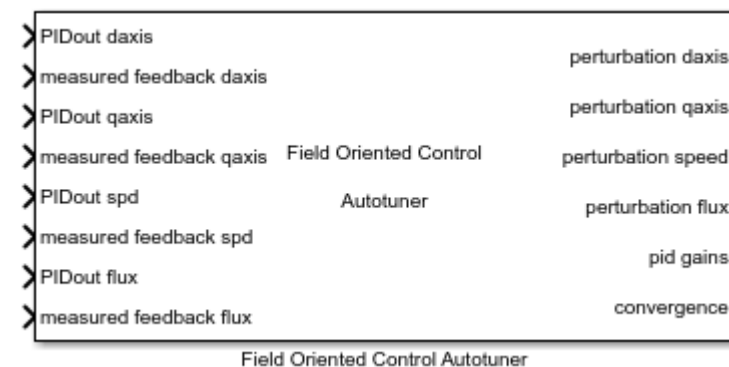
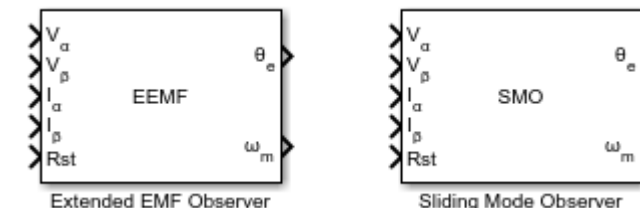
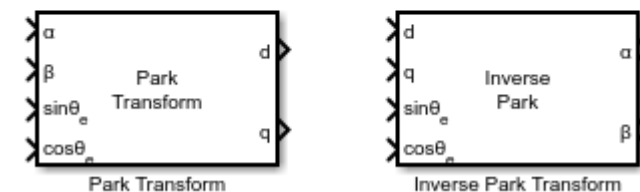
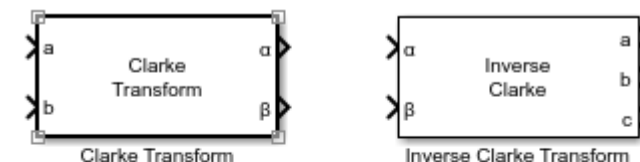
- orientováno na práci s reálným pohonem
- zjednodušené modely pohonů a střídače
- nástroje pro odhad parametrů pohonu z měření

- Připravené bloky pro

- Clarke / Park transformace
- PWM generátor
- dekódování informací ze senzorů (Hallowa sonda, ...)
- bez-senzorový odhad polohy pohonu
- výpočet referenčních hodnot pro řídicí systém

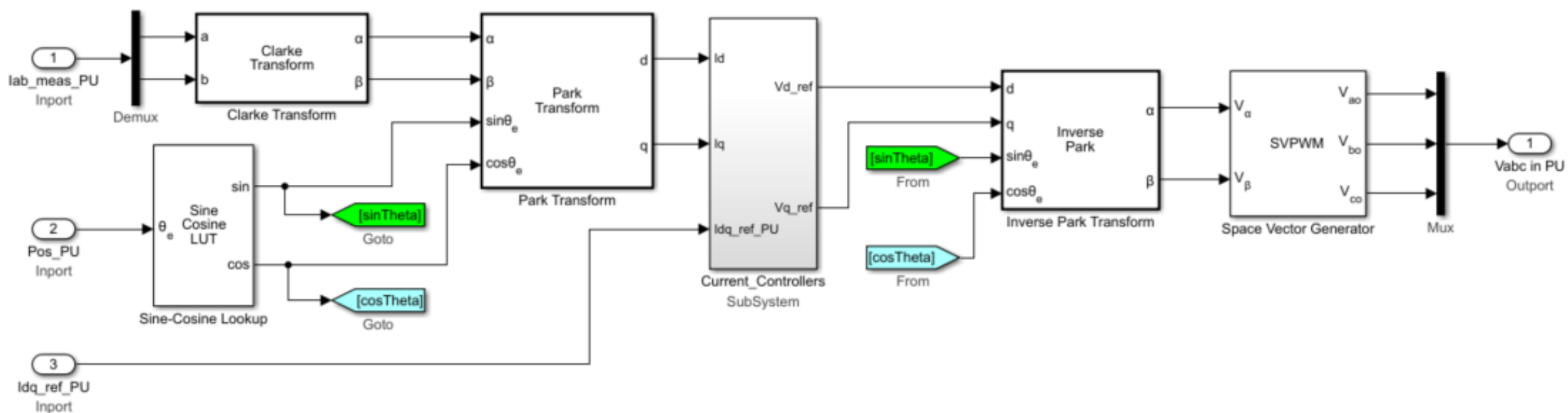
- FOC – sestavení z jednotlivých částí

- Field Oriented Control Autotuner



Zapojení FOC v prostředí Simulink

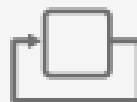
- Příklad zapojení FOC řízení
- Bloky z knihovny Motor Control Blockset



AI pro elektrické systémy

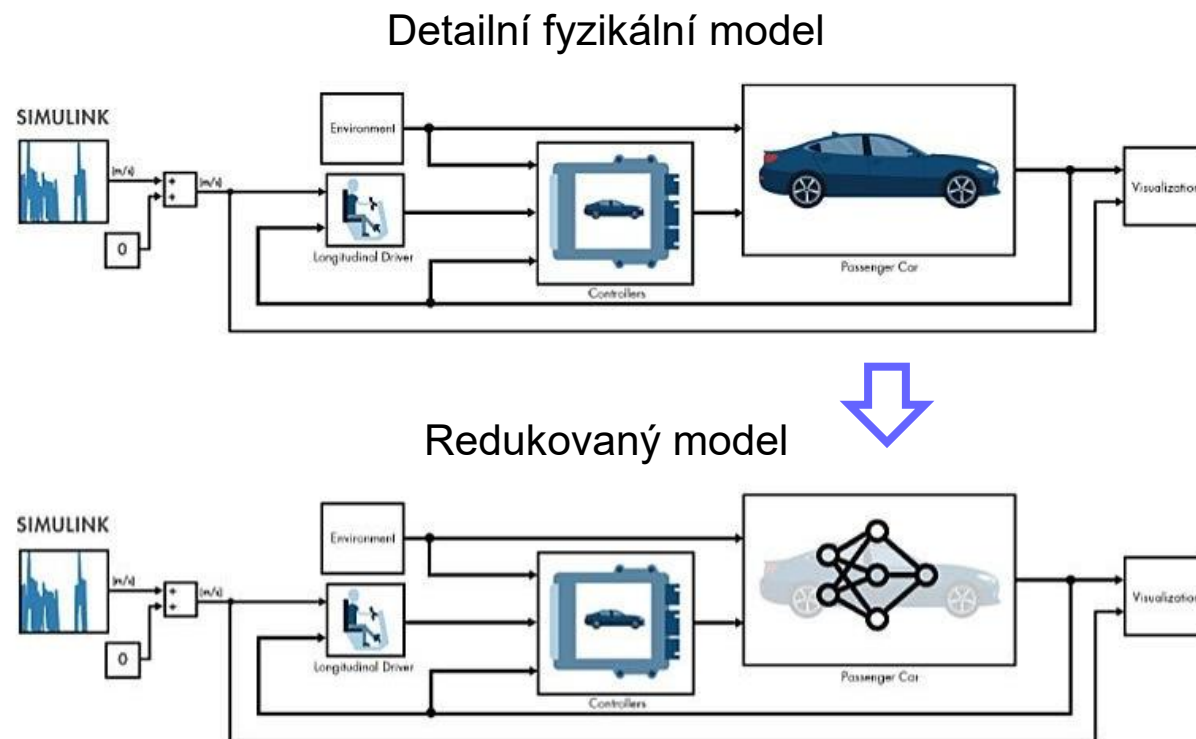
Využití AI v oblasti elektrických systémů

- Redukované modely (ROM - Reduced Order Modeling)
- Virtuální senzory
- Řídicí systémy založené na AI
- Předpovídání spotřeby, dodávky a cen energií
- Prediktivní údržba systémů



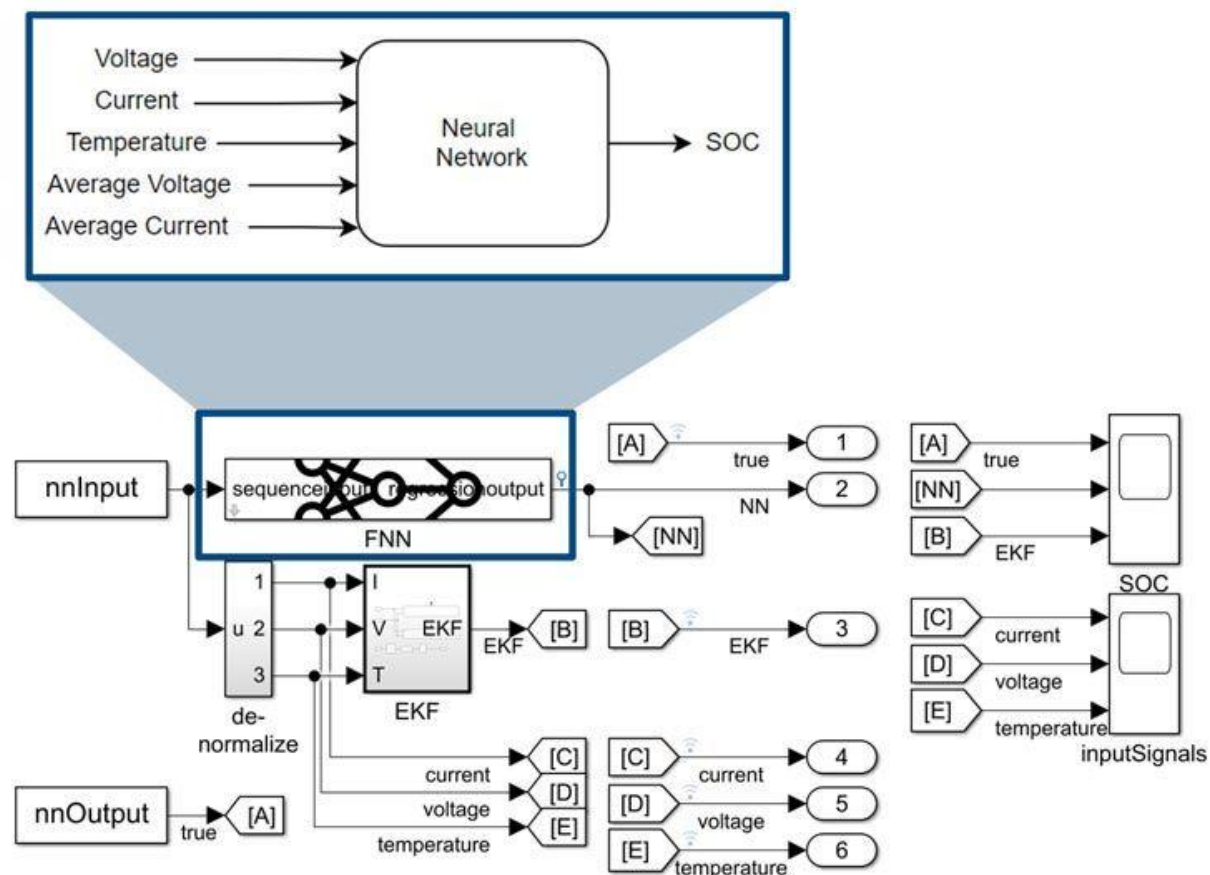
Reduced Order Modeling (ROM)

- Tvorba redukovaného modelu fyzických prvků na základě dat
 - při zachování podstatné dynamiky soustavy
- Jednodušší model = rychlejší simulace
- Aplikace
 - urychlení simulace
 - digitální dvojče, ...
- Dynamický AI-ROM model
 - ARX model s ML algoritmem (SVM, ...)
 - neural state space, neural ODE, LSTM
- Učení ROM modelu
 - na základě dat z detailního modelu



Virtuální senzory

- Výpočet hodnot veličiny, která nelze (snadno) měřit přímo
- Virtuální senzor založený na AI
 - neuronová síť
- Učení virtuálního senzoru
 - data generovaná modelem systému



Otázky?