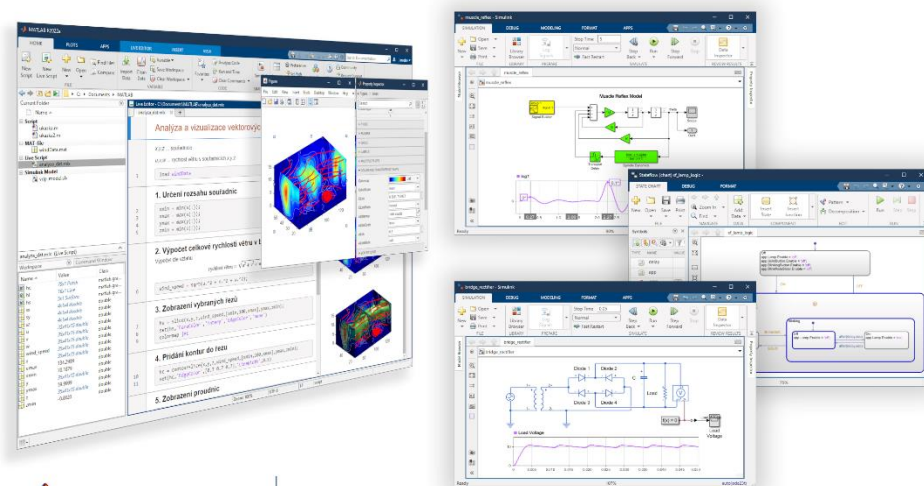


7.9.2023 Technical Computing Camp 2023

# Vývoj elektrických pohonných systémů, bateriových sestav a BMS

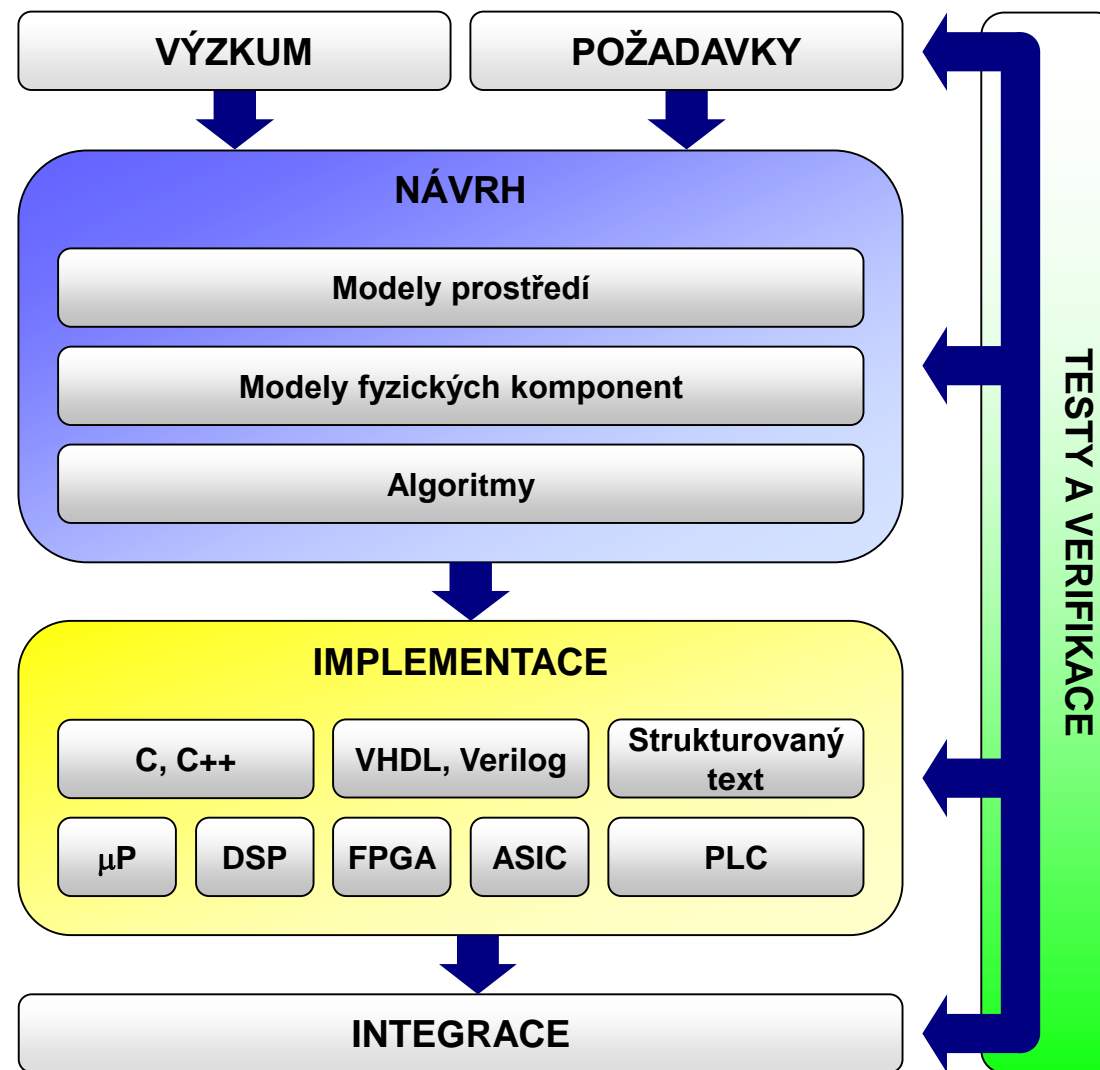


Jaroslav Jirkovský  
jirkovsky@humusoft.cz

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

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

# Vývoj metodou Model-Based Design

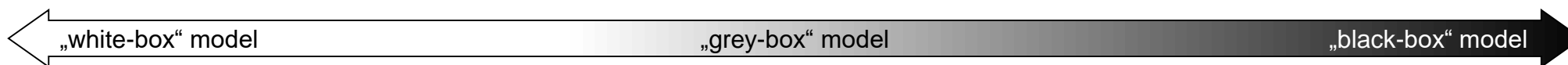


# Přístupy k modelování

- Pro různé situace jsou vhodné různé přístupy

## Fyzikální vztahy

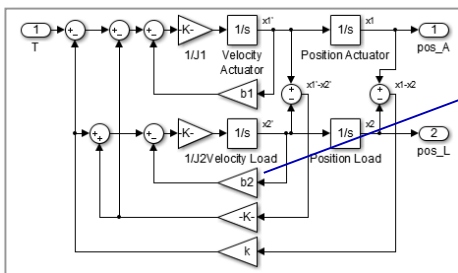
## Naměřená data



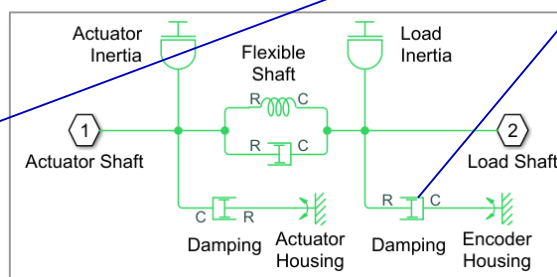
### Modelování rovnic

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

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

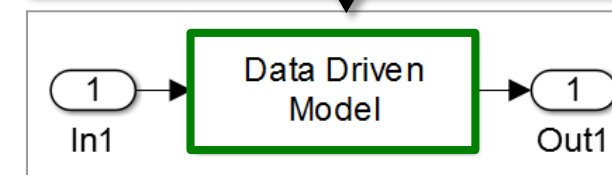
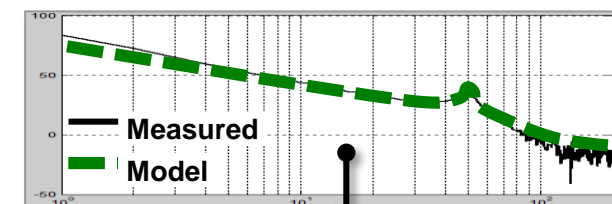


### Fyzikální síť

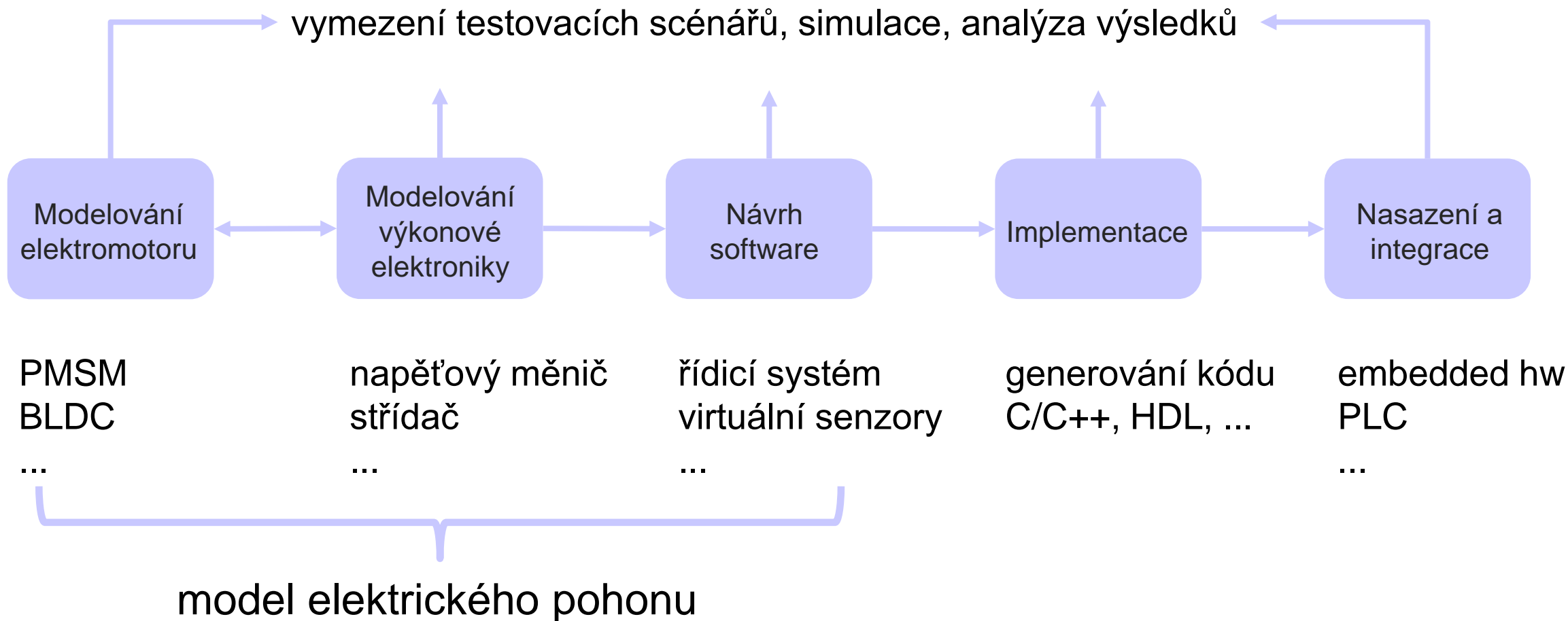


### Ladění neznámých parametrů

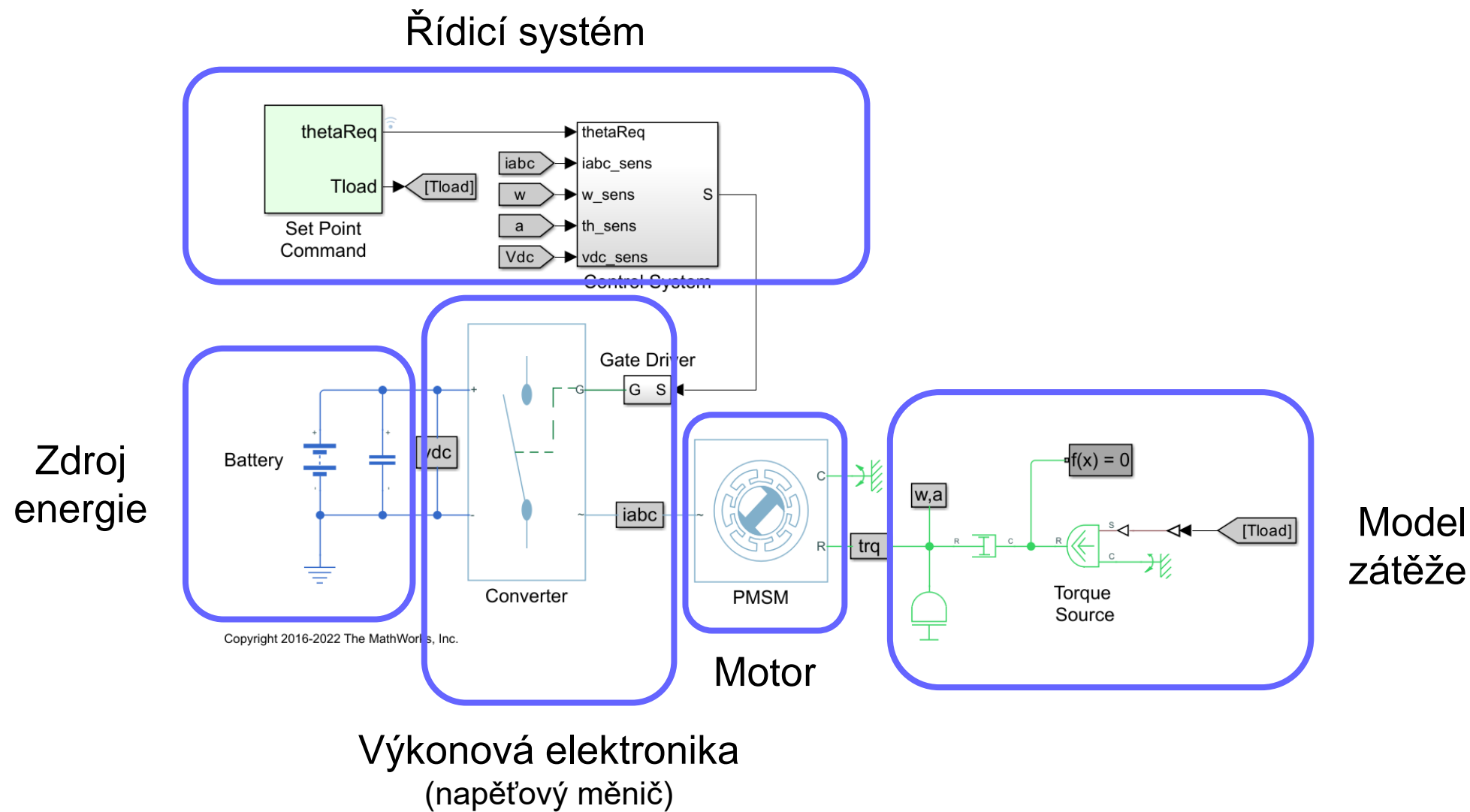
### Identifikace soustav



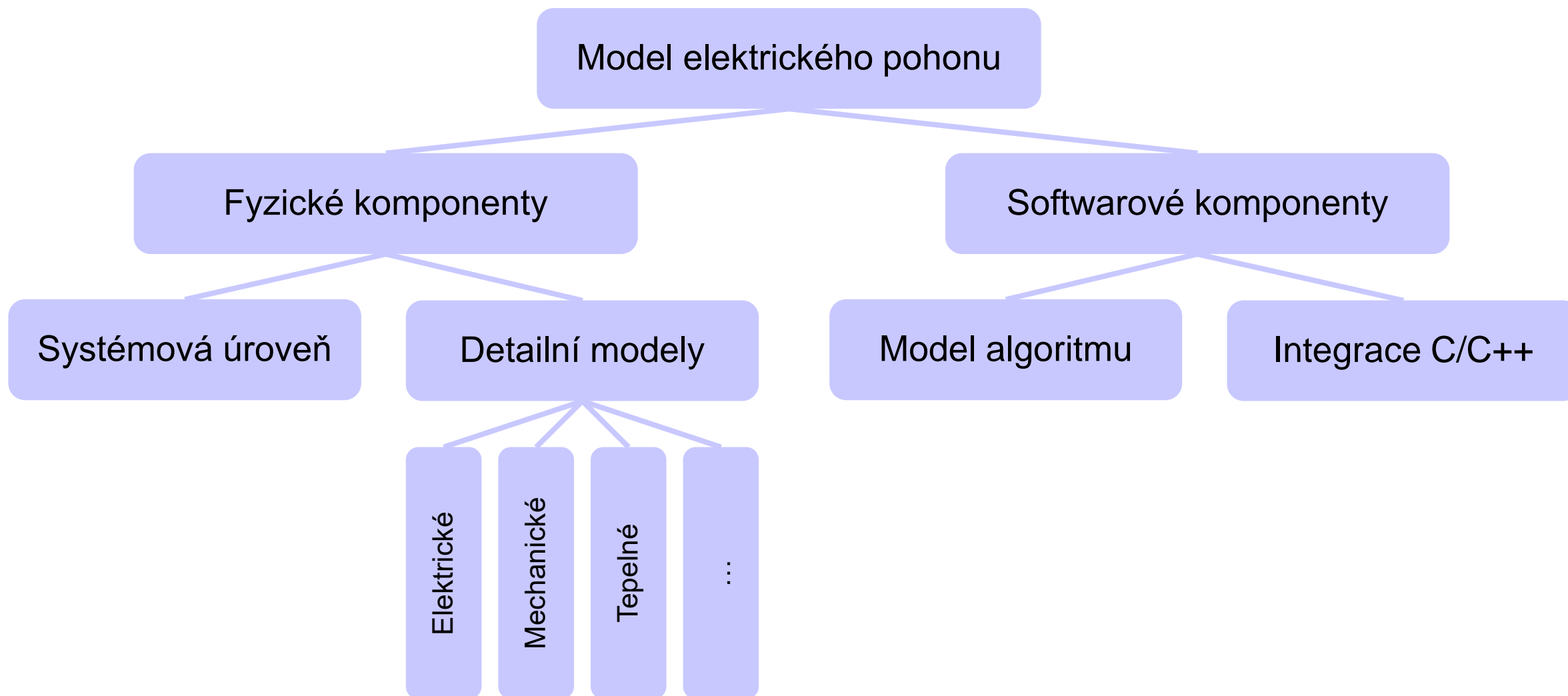
# Typické kroky při vývoji elektrického pohonného systému



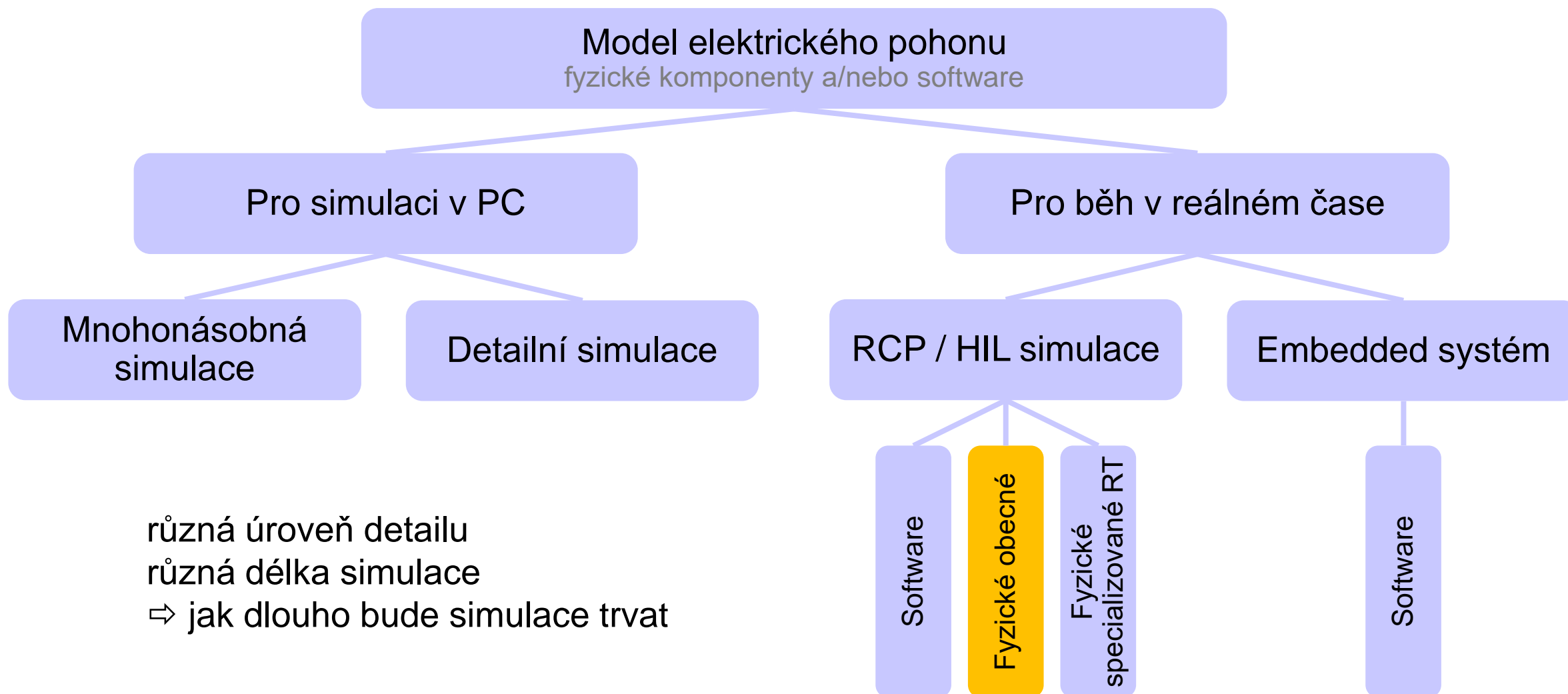
# Příklad modelu elektrického pohonu



# Modelování elektrického pohonu z hlediska komponent



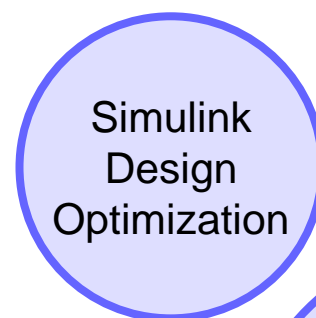
# Modelování elektrického pohonu z hlediska simulace/nasazení



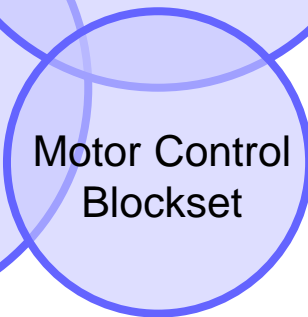
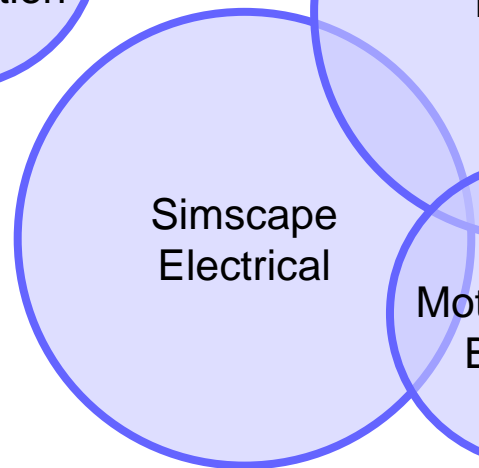
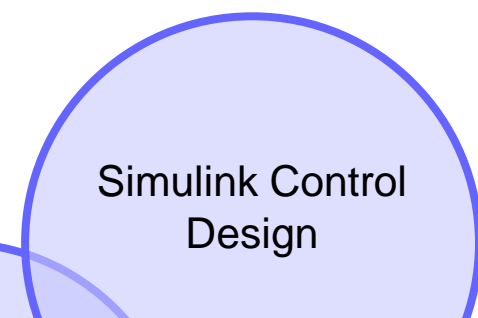
různá úroveň detailu  
různá délka simulace  
⇒ jak dlouho bude simulace trvat

# MATLAB a Simulink pro modelování elektrického pohonu

Optimalizace a ladění parametrů modelu



Linearizace modelů a návrh řídicích systémů



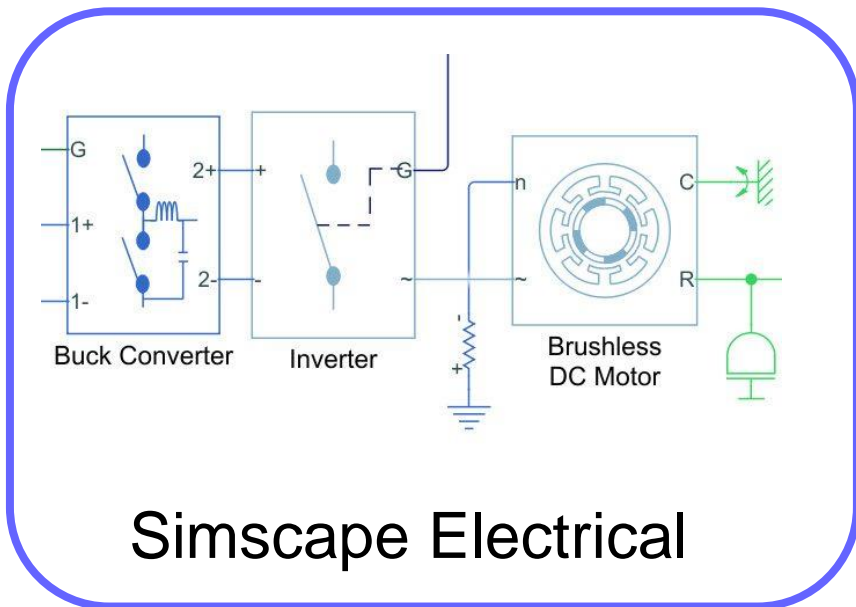
Modelování mechatronických systémů, výkonové elektroniky a jejich řízení\*

Návrh a implementace algoritmů pro řízení pohonů\*\*

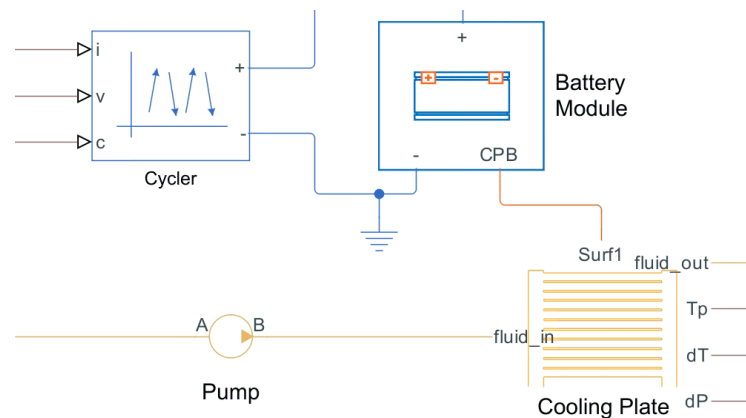


# Modelování pohonu a výkonové elektroniky

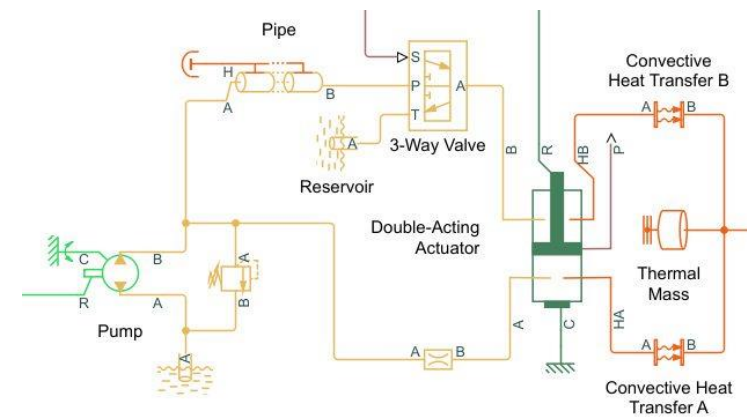
# Fyzikální modelování soustav



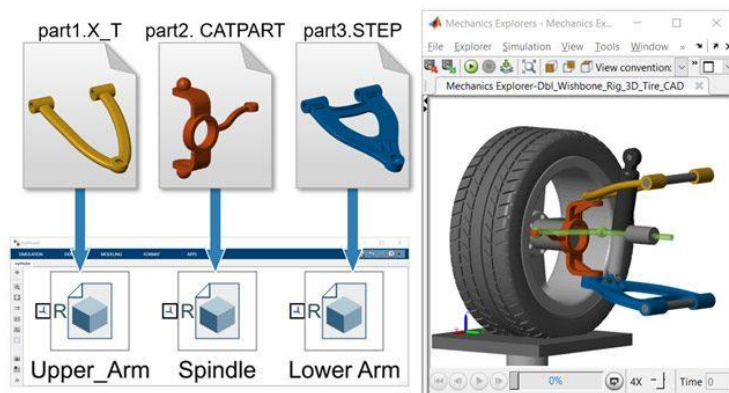
Simscape Electrical



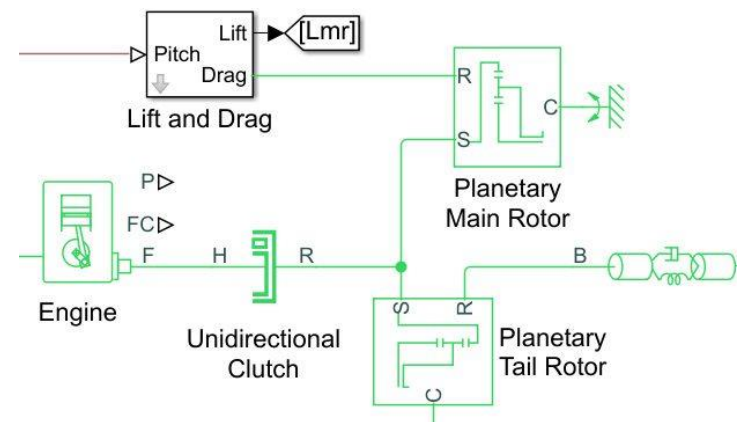
Simscape Battery



Simscape Fluids



Simscape Multibody

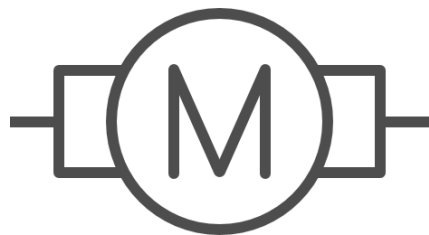


Simscape Driveline

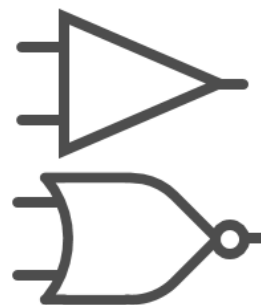
# Modely prvků v Simscape Electrical



polovodičové prvky



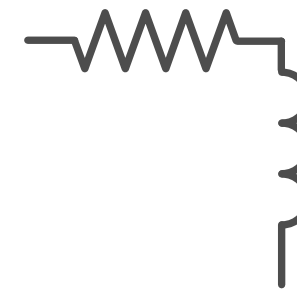
motory, akční prvky



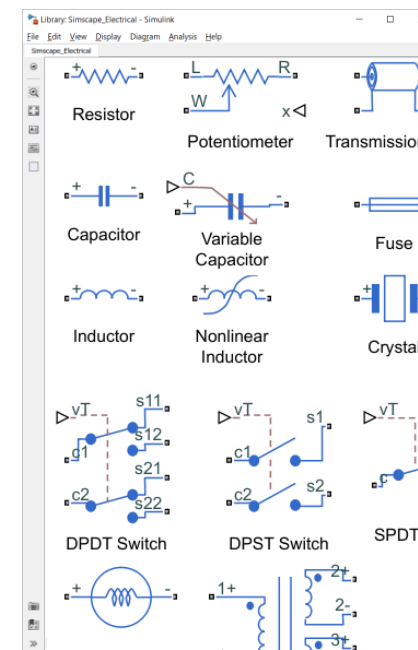
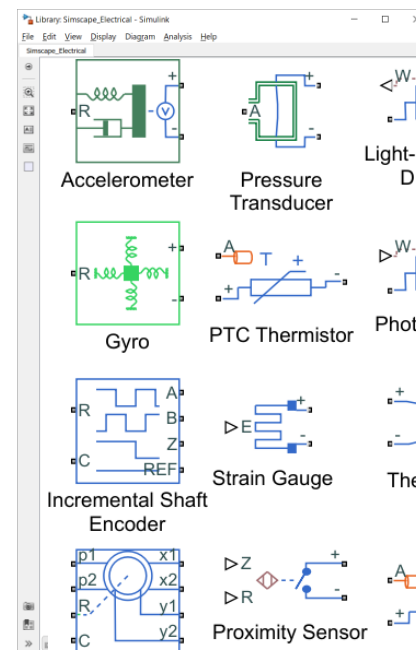
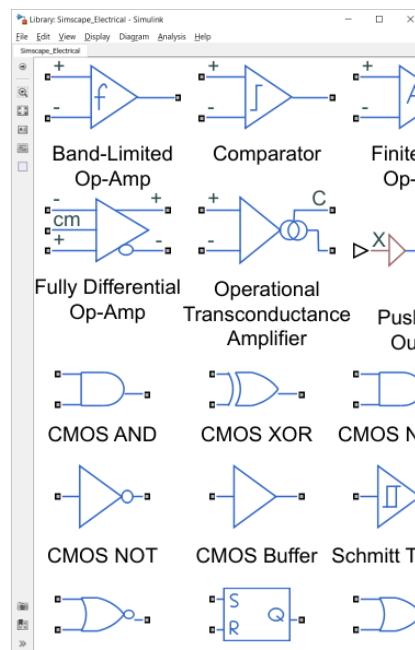
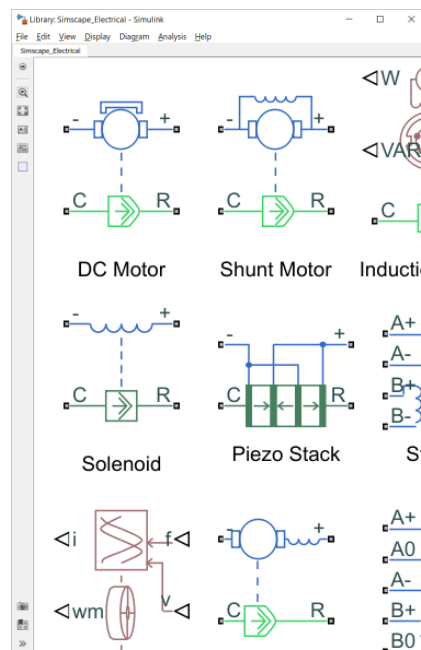
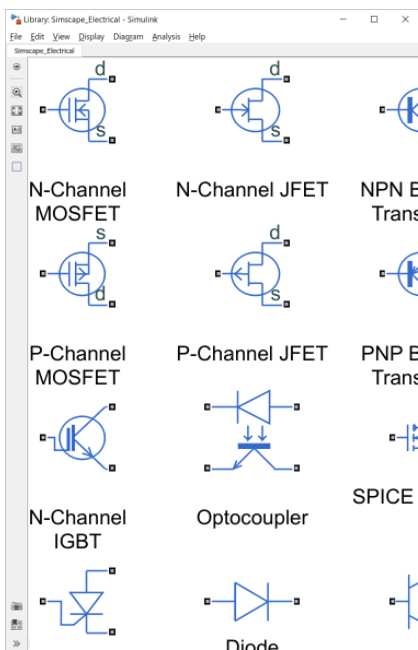
op. zesilovače, logická hradla



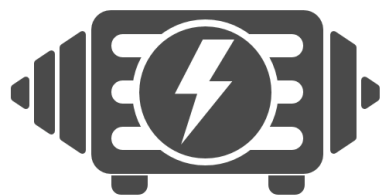
senzory



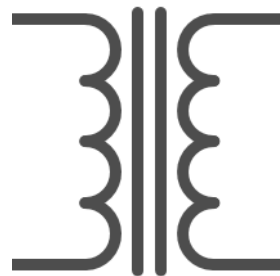
pasivní součástky



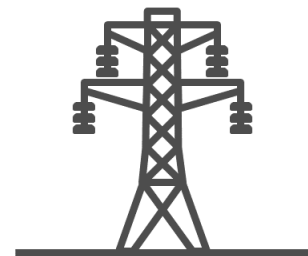
# Modely prvků v Simscape Electrical



třífázové  
motory



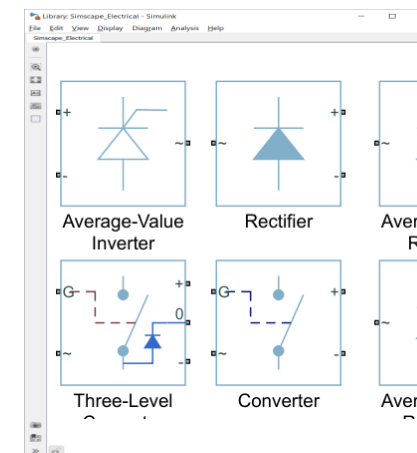
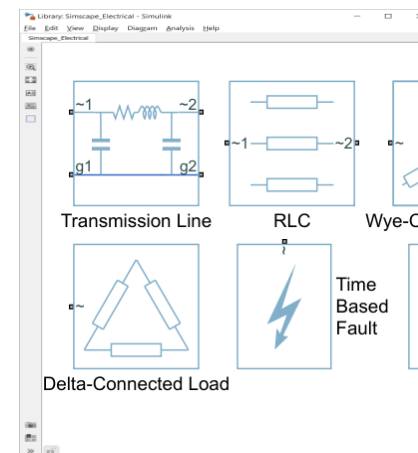
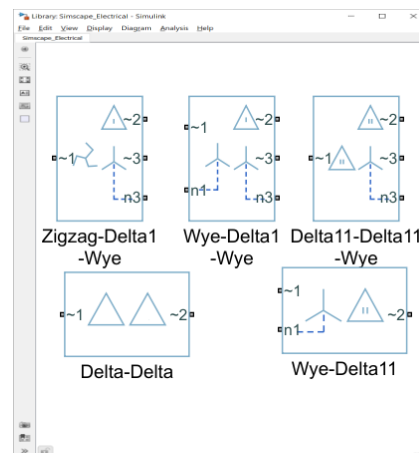
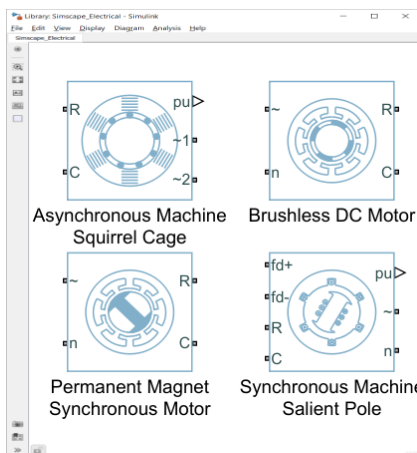
transformátory



vedení,  
FACTS



konvertory



# Modely prvků v Simscape Electrical



obrazové  
motory



transformátory

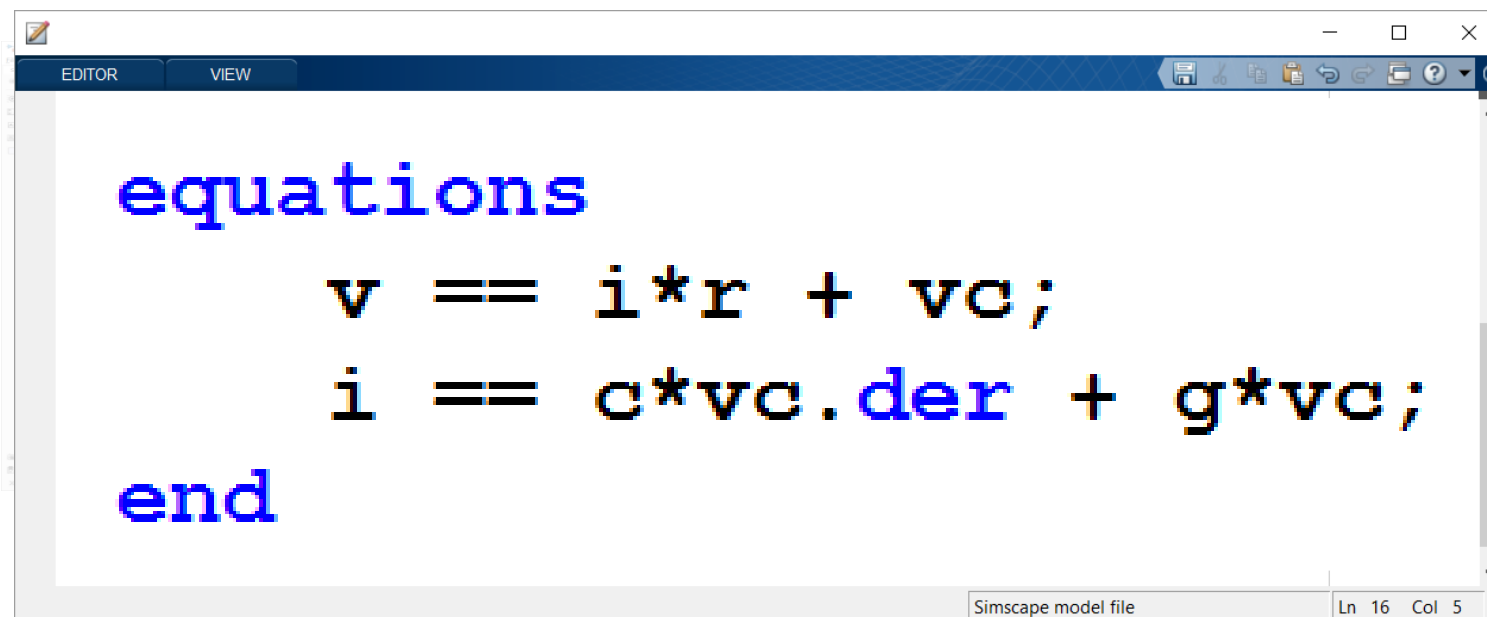
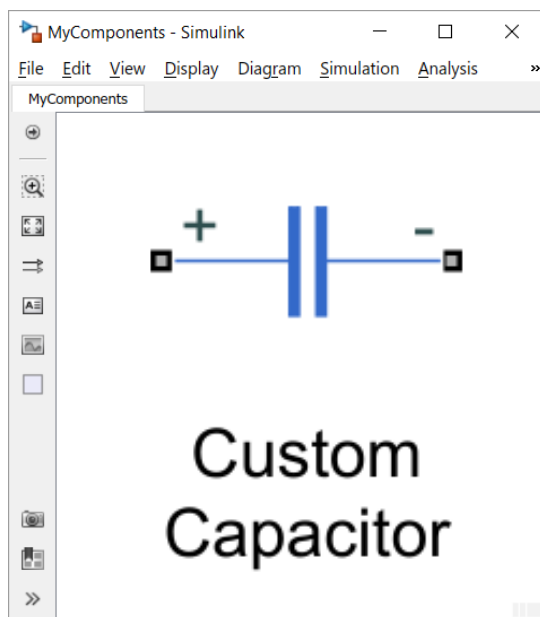


vedení,  
FACTS



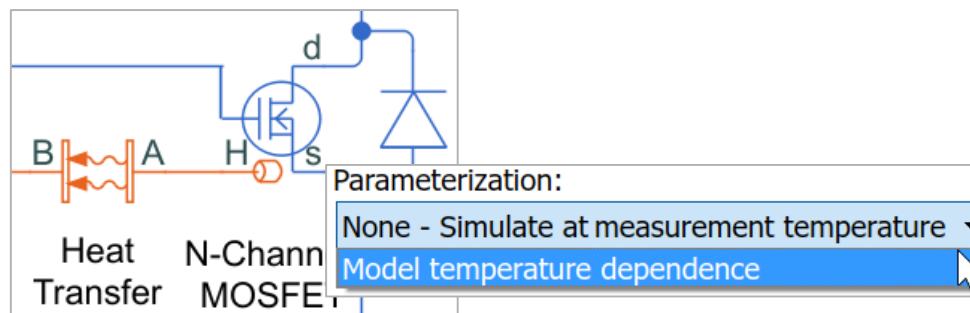
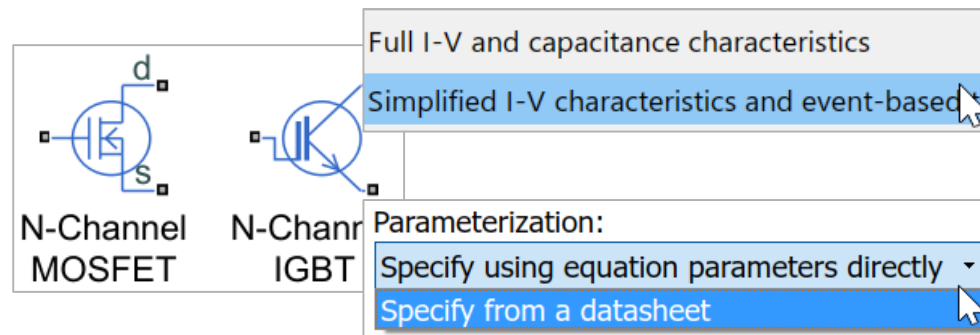
konvertory

+ možnost vytvoření vlastních prvků pomocí jazyka Simscape Language

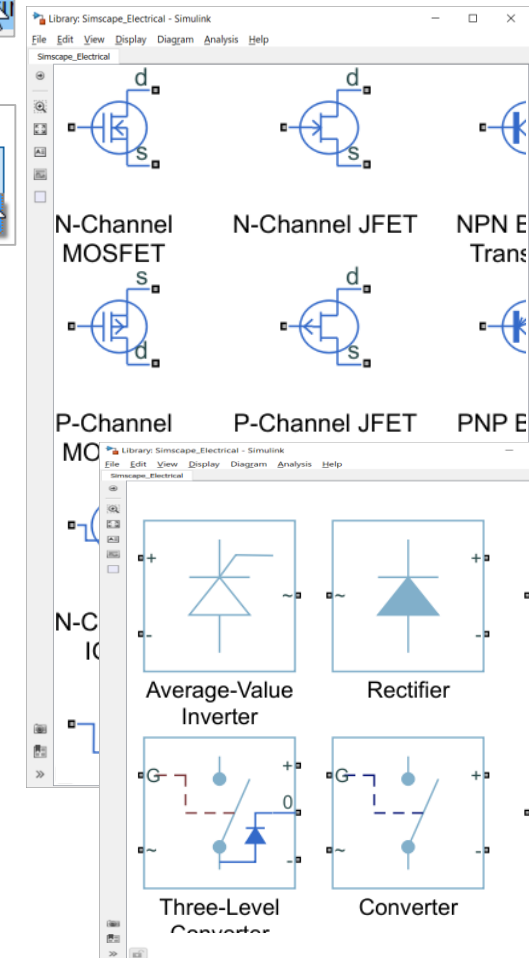


# Simscape Electrical: Polovodičové prvky

- Spínání a zesílení signálu
  - parametrizace dle „data sheets“
  - zjednodušené i detailní
- Tepelné efekty
  - vliv na chování prvku
  - přenos tepla do okolí

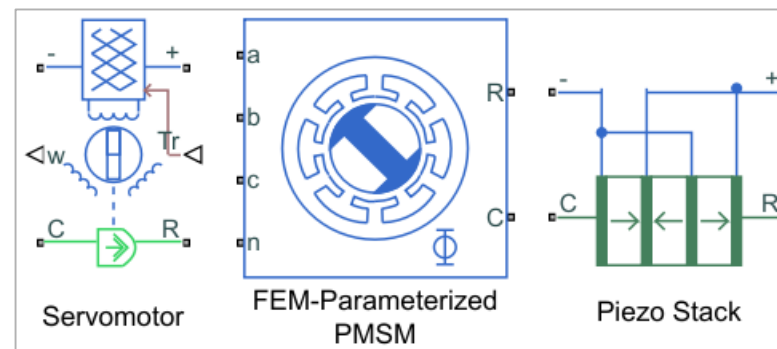


## ukázka knihoven



# Simscape Electrical: Pohony

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



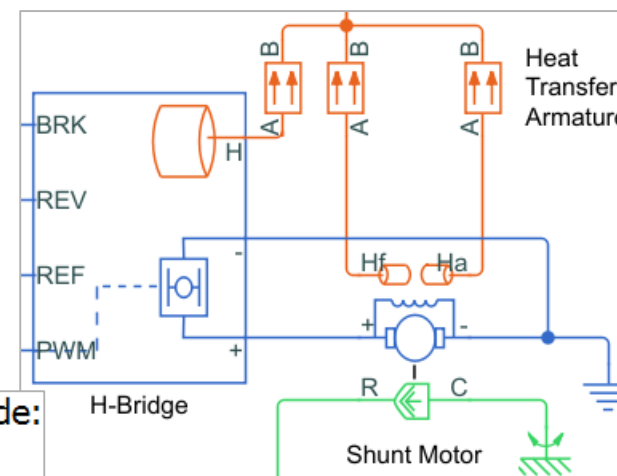
Parameterization:

- 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

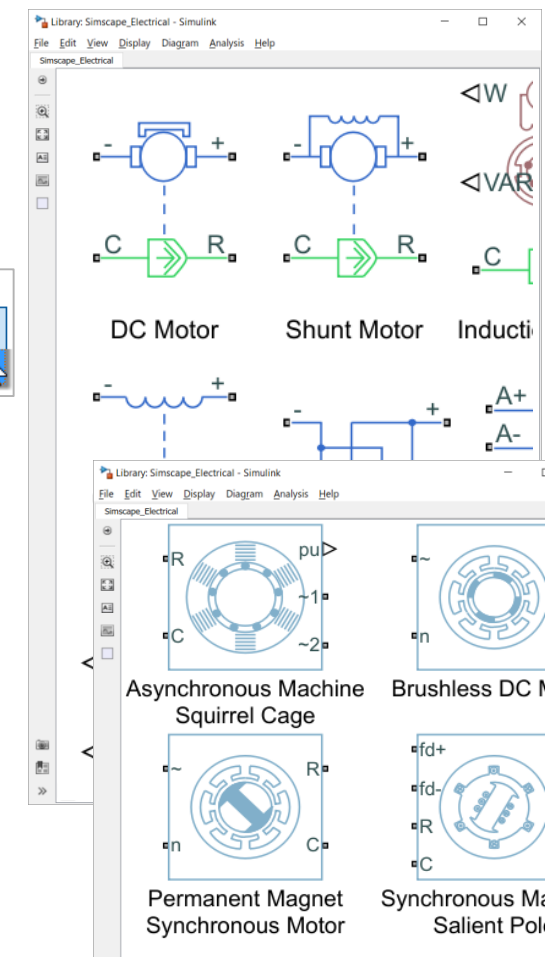


Simulation mode:

- Averaged
- PWM

- Zahrnutí / zanedbání účinků spínání

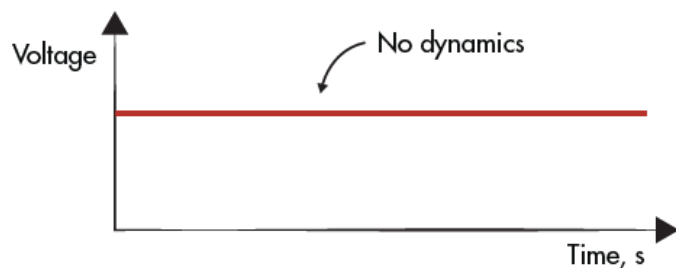
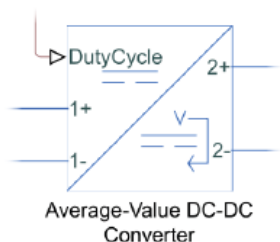
## Ukázka knihoven



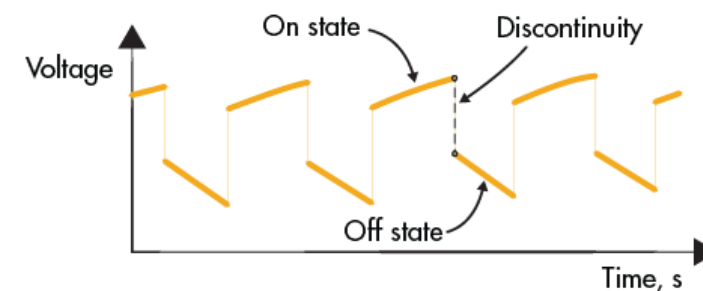
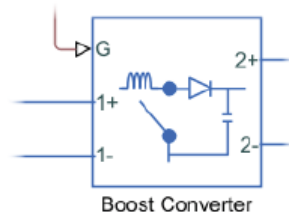
# Úroveň detailu

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

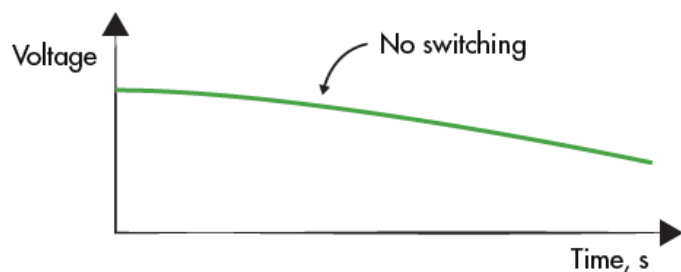
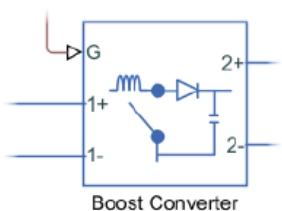
## Průměrná hodnota



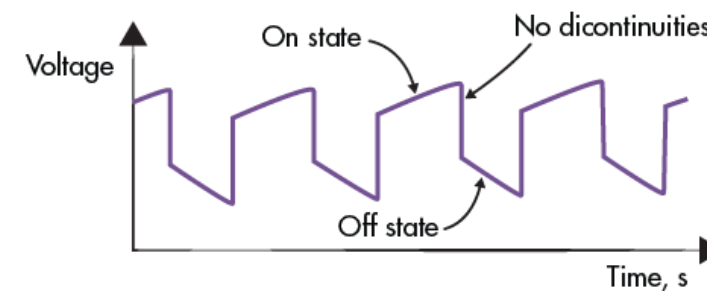
## Po částech lineární spínání



## Průměrná hodnota spínání



## Nelineární spínání





# Návrh řídicího systému

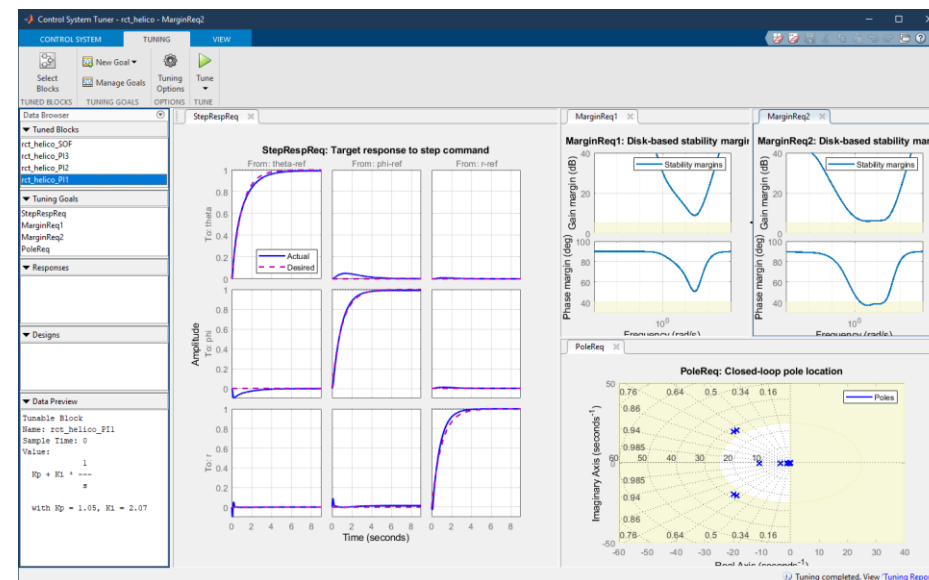
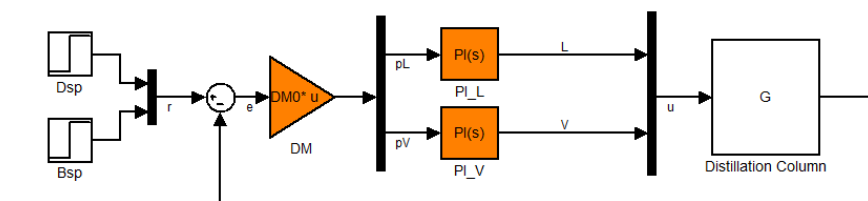
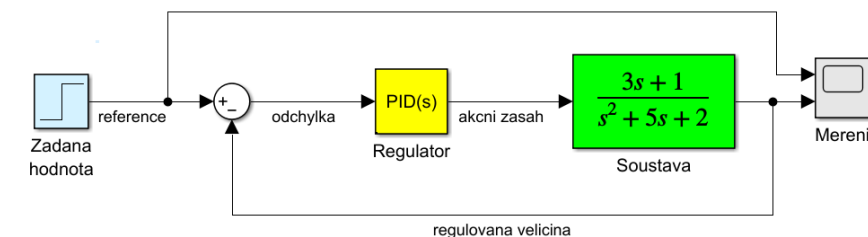
# Modelování řídicích systémů

- Klasické řídicí systémy

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

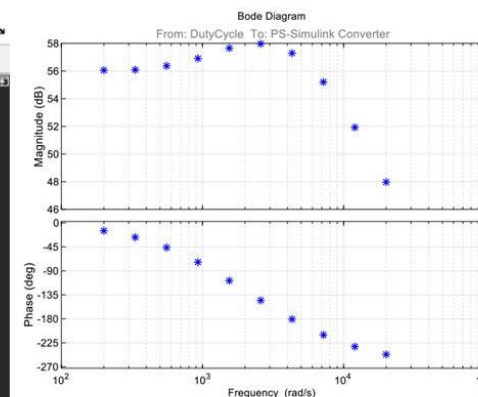
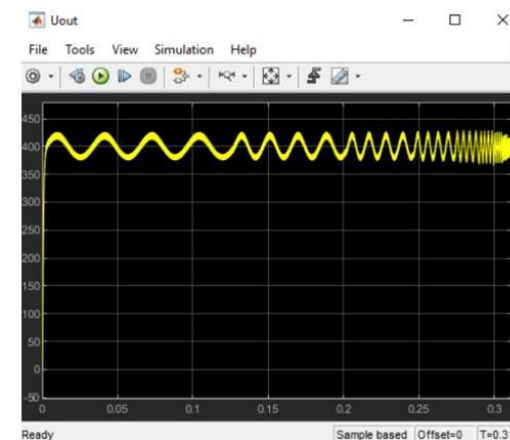
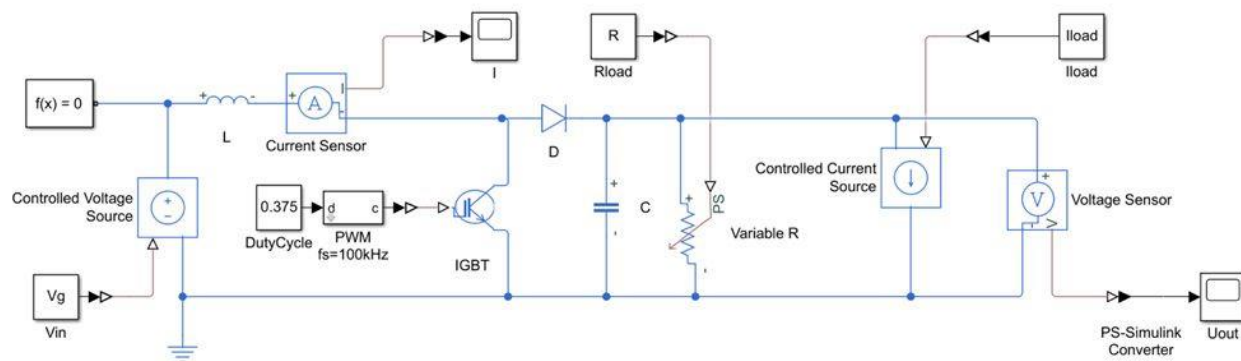
- Ladění klasických řídicích systémů

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



# Lineární aproximace modelu výkonové elektroniky

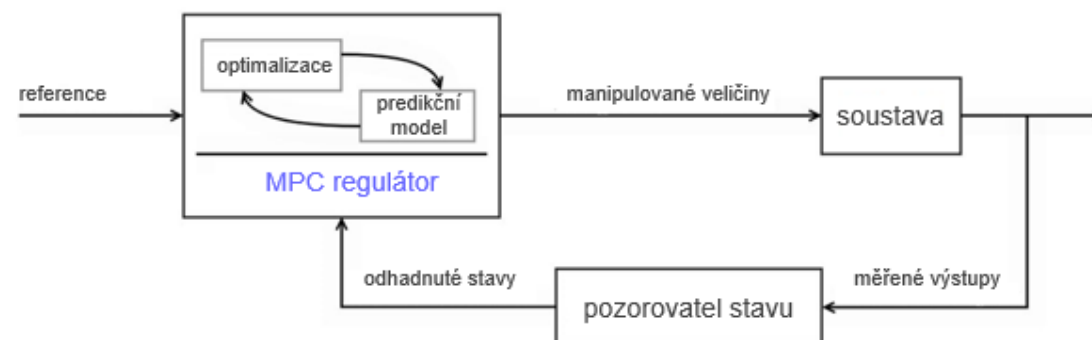
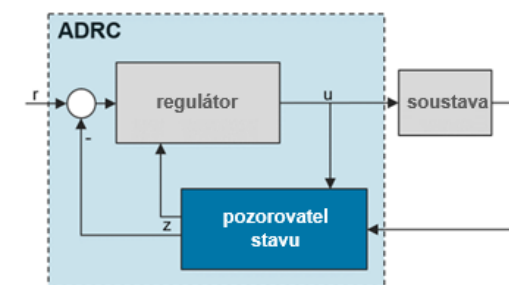
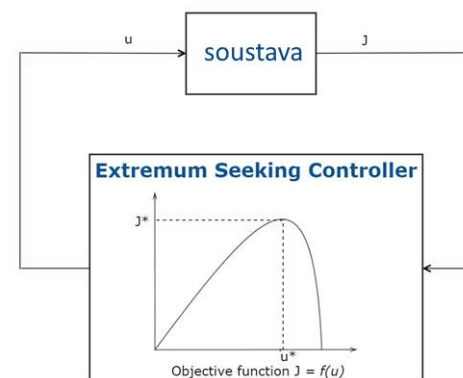
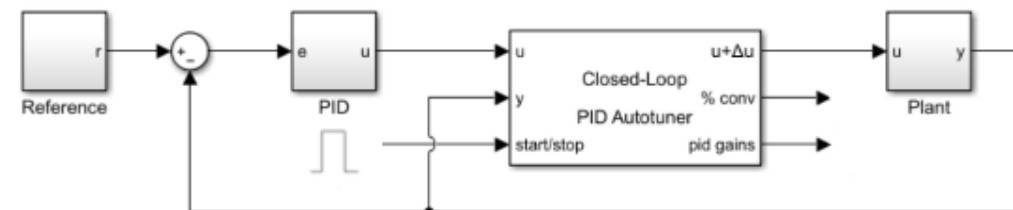
- Problém: spínané zařízení nemá exaktní lineární aproximaci
- Řešení: Small-Signal Analysis
  - aplikace drobného proměnného signálu a sledování odezvy (sin, chirp, rand)
  - odhad přenosové funkce nebo frekvenční charakteristiky



- Získaný LTI model umožní aplikaci klasických postupů při návrhu řízení

# Modelování řídicích systémů

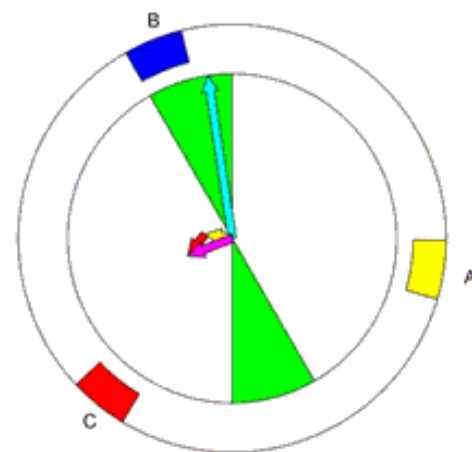
- Adaptivní řídicí systémy
  - Open-Loop / Closed-Loop PID Autotuner
  - Extremum Seeking Control
  - Model Reference Adaptive Control
  - Active Disturbance Rejection Control
- Prediktivní řízení
  - Model Predictive Control (MPC)
- Využití AI
  - Reinforcement learning (RL)



# Řízení elektrických pohonů

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

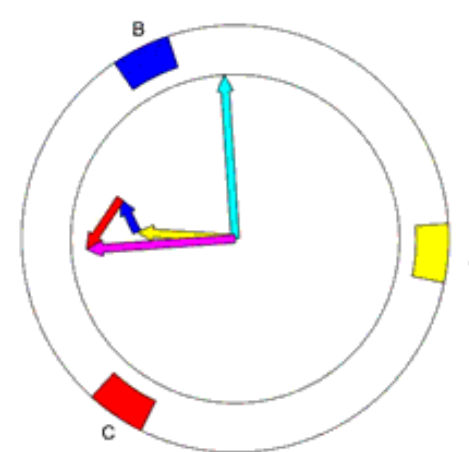
BLDC Six-Sector Commutation  
Two Pole-Pair



Commutates every 30 mechanical degrees

One mechanical rotation sees two electrical rotation

PMSM Field-Oriented Control  
Two Pole-Pairs



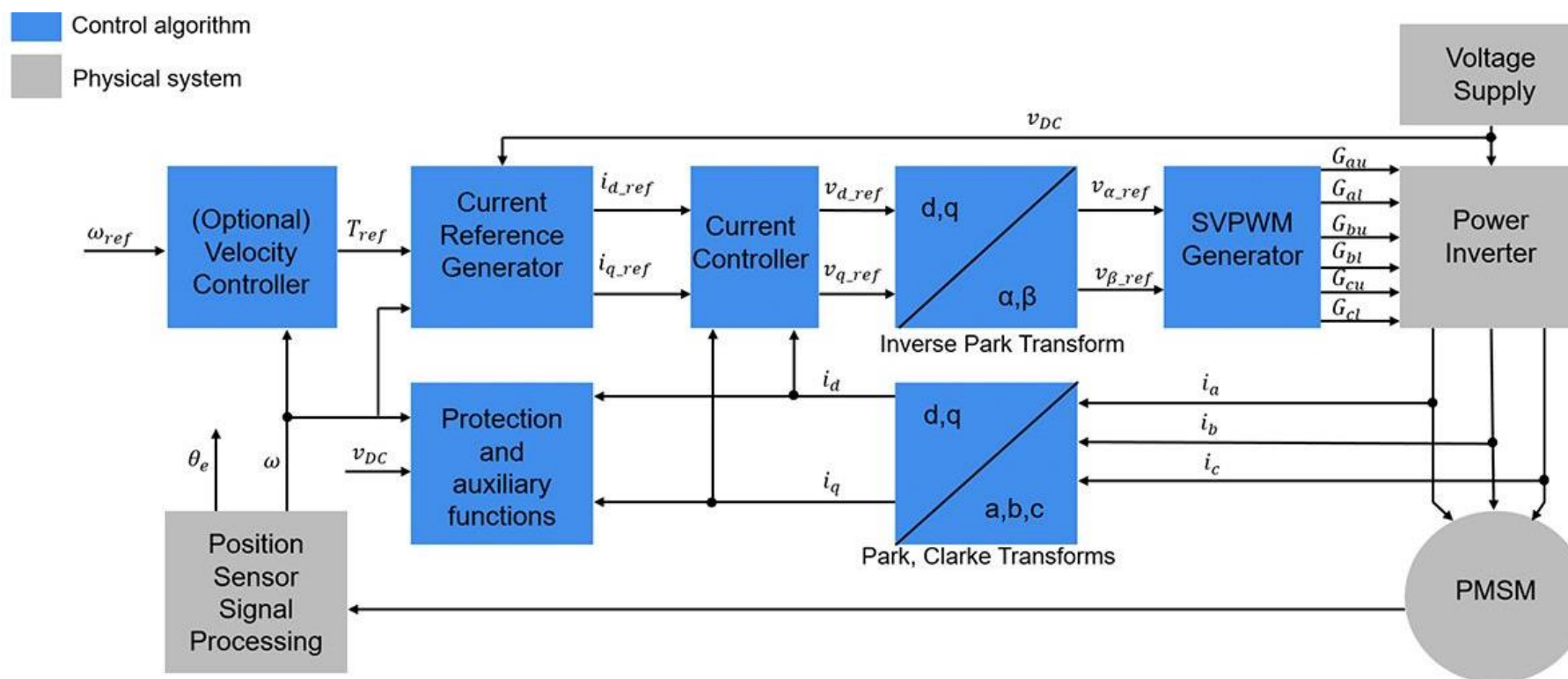
Current vector leads rotor magnetic reference by 90 mechanical degrees

One mechanical rotation sees two electrical rotations

-  Sector
-  Rotor Magnetic Reference
-  Current Vector

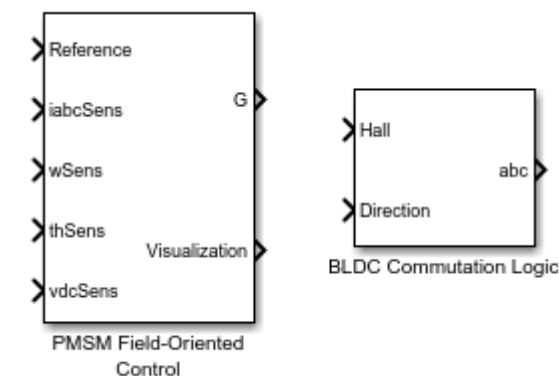
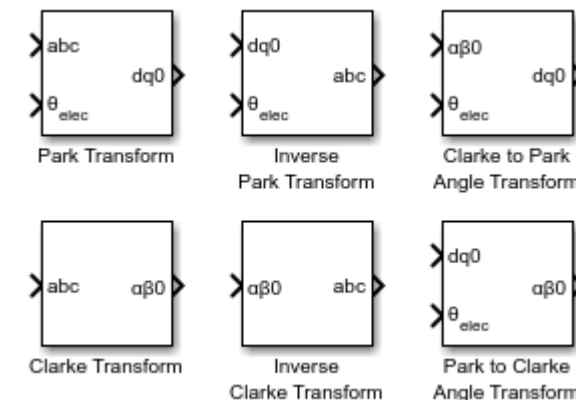
# Field-Oriented Control (FOC)

- Typ vektorového řízení
- Využívá Clarke/Park transformace



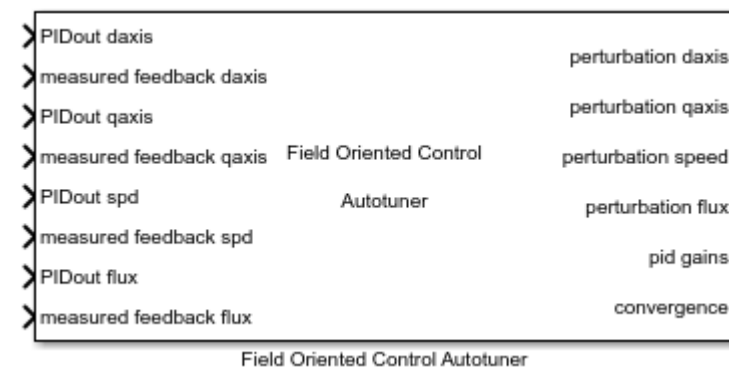
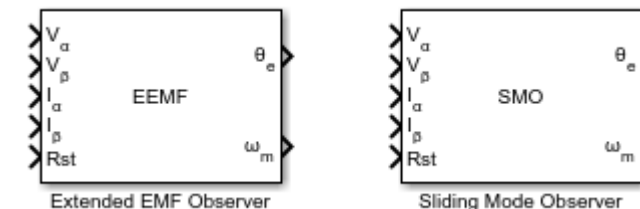
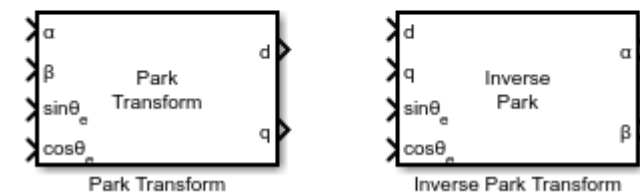
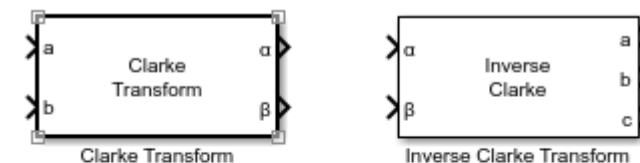
# Návrh řízení pohonu v prostředí Simulink

- 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

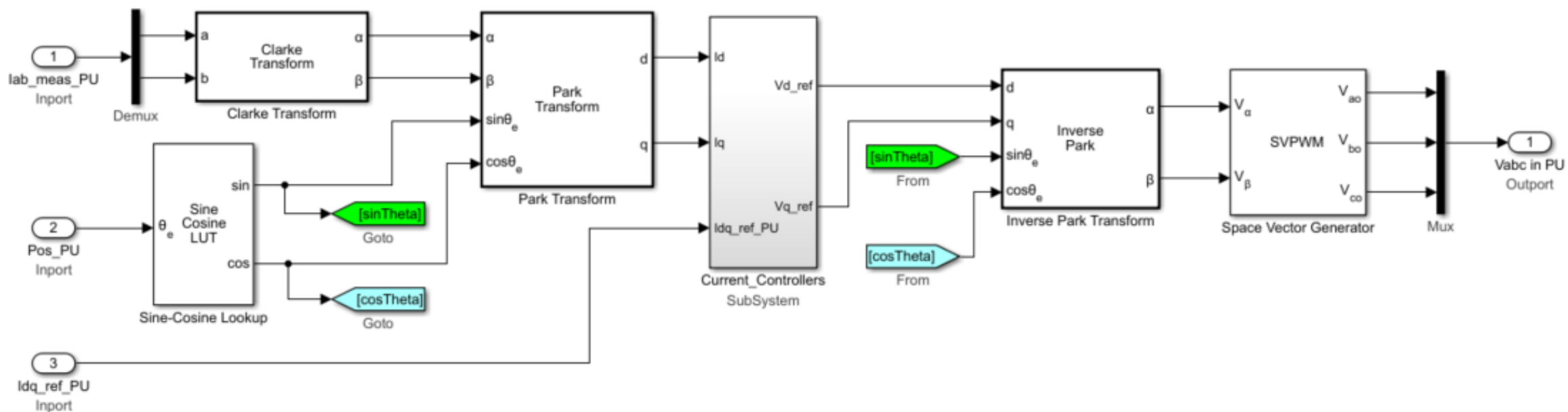
- Motor Control Blockset
  - orientováno na práci s reálným pohonem
  - zjednodušené modely pohonů a střídače
  - nástroje pro odhad parametrů pohonu z měření
- Připravené bloky pro
  - Clarke / Park transformace
  - PWM generátor
  - dekódování informací ze senzorů (Hallowa sonda, ... )
  - bez-senzorový 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

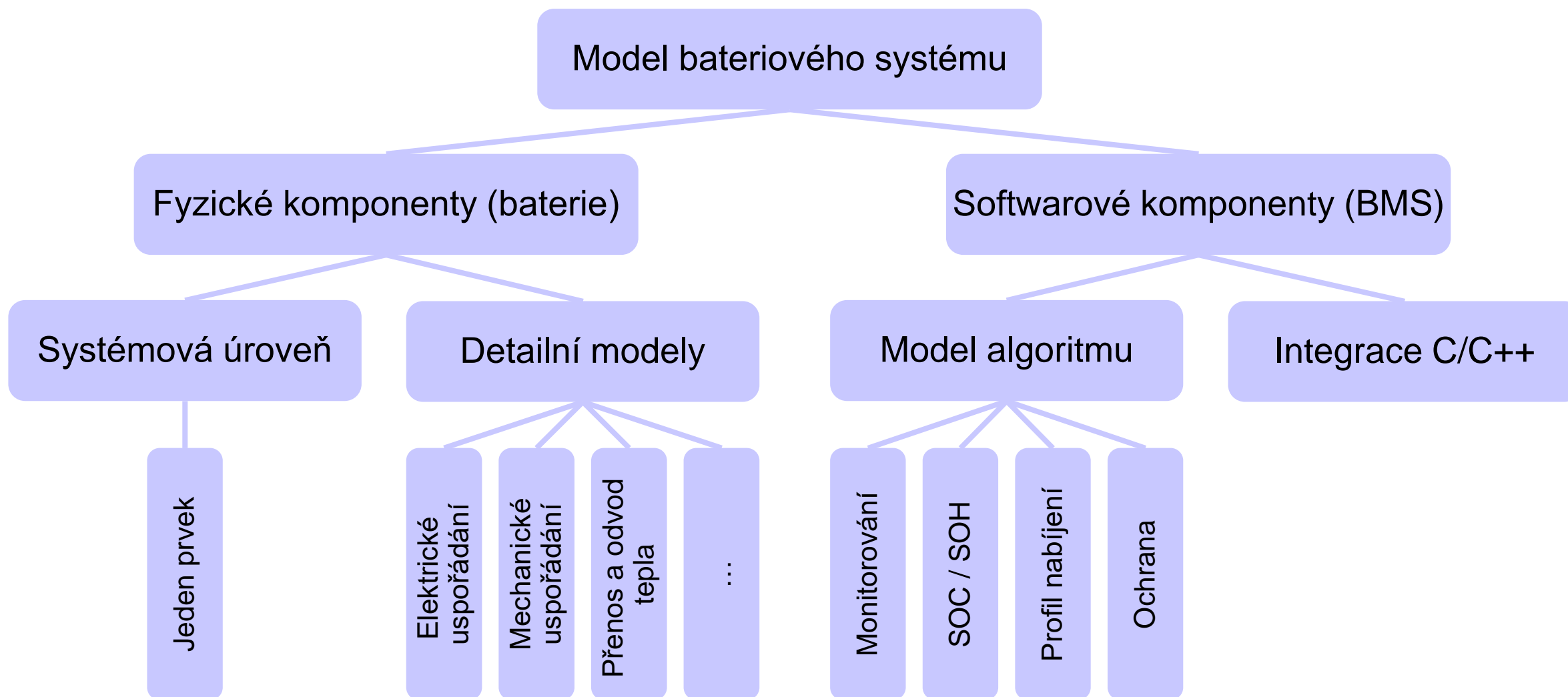


## Další informace

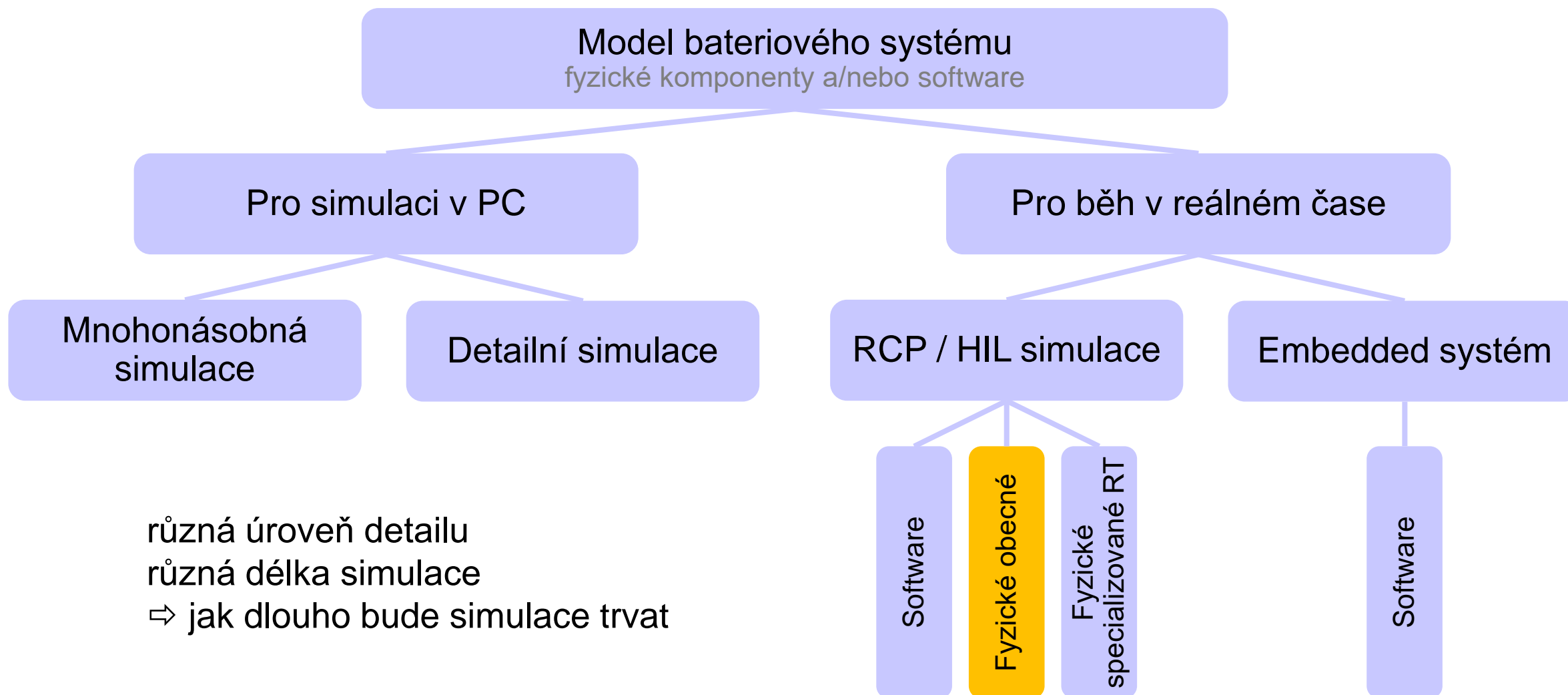
- MATLAB Tech Talks: Motor Control
  - <https://www.mathworks.com/videos/series/brushless-dc-motors.html>
- Video-série How to Design Motor Controllers Using Simscape Electrical
  - <https://www.mathworks.com/videos/series/how-to-design-motor-controllers-using-simscape-electrical.html>

# Bateriové systémy a BMS

# Modelování bateriového systému z hlediska komponent



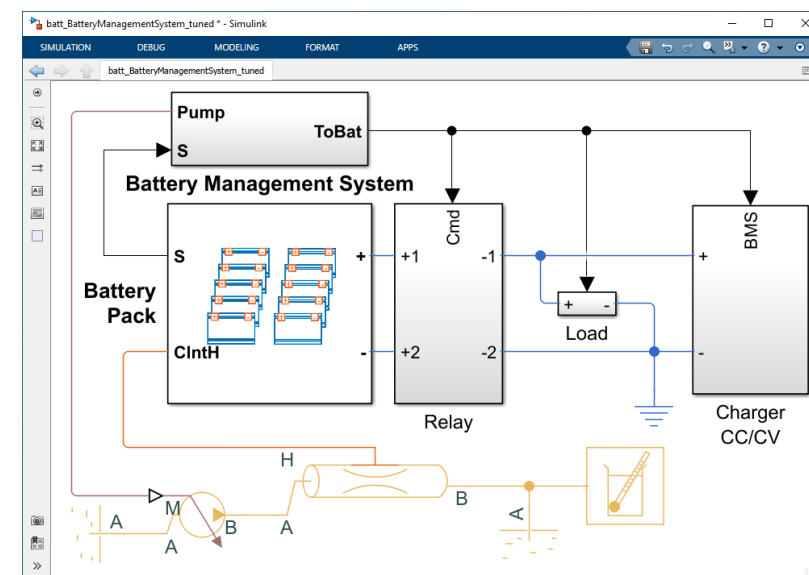
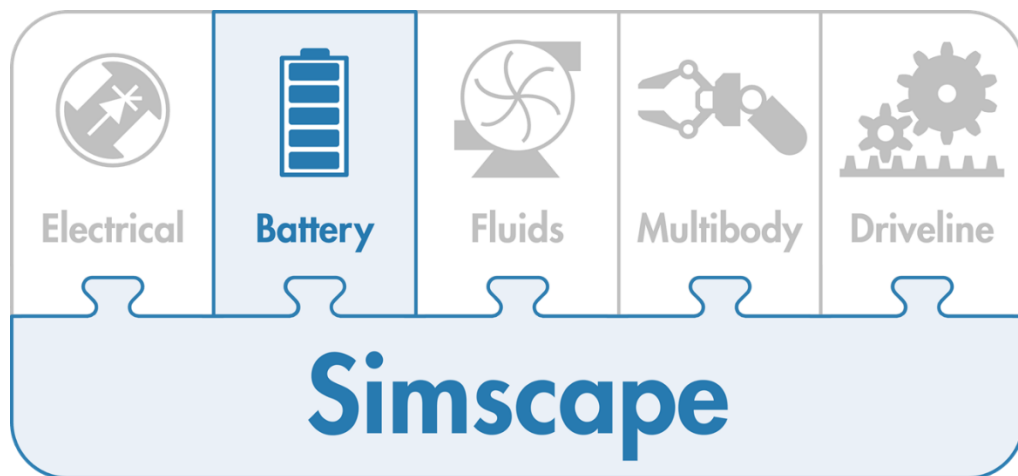
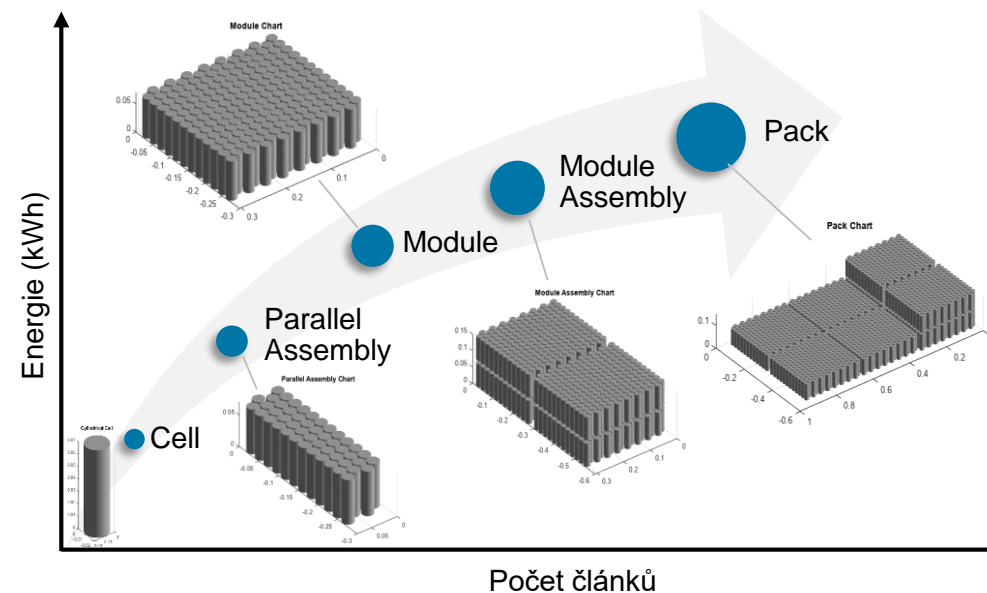
# Modelování bateriového systému z hlediska simulace/nasazení



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

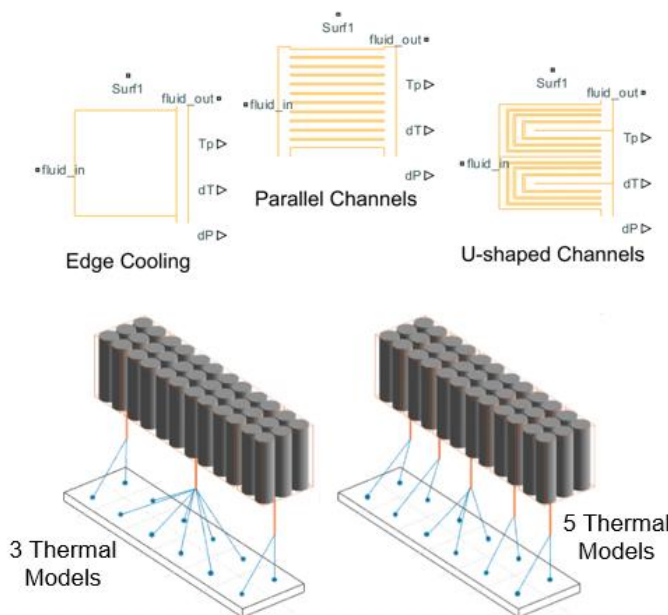
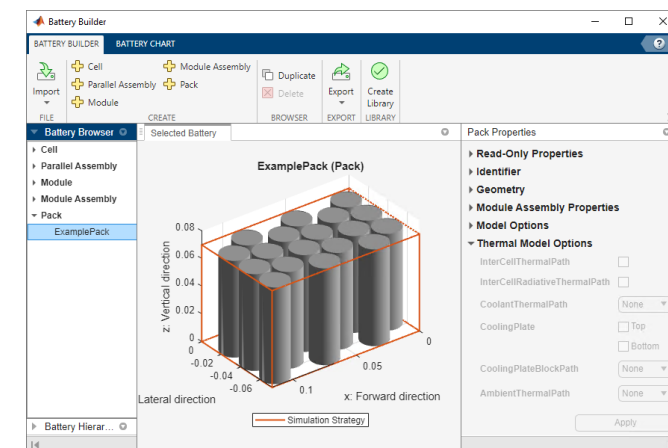
# Simscape Battery

- Fyzikální modelování bateriových sestav
  - elektrotermální chování článků
  - návrh architektury sestavení článků
- Algoritmy pro BMS
  - Battery Management System



# Simscape Battery – hlavní funkce

- Battery Pack Builder (funkce, App)
  - automatické poskládání modelů článků do bateriové sestavy
  - definice elektrických a tepelných propojení (sériové, paralelní)
  - nastavení kompromisu mezi rychlostí simulace a úrovní detailu
- Modelování chlazení
  - boční chlazení, paralelní vedení, vedení do U
  - různý počet připojení
- Algoritmy pro Battery Management
  - nabíjení/vybíjení, SOC, SOH, vyvážení článků, tepelný management, ochrana
- Aplikační příklady
  - nabíjení elektrického vozu, microgrid s BESS



# Modely Baterie

- Na základě ekvivalentního obvodu
- Battery
  - jednoduchý parametrický model
- Battery (Table-Based)
  - parametrizace pomocí tabulek hodnot
- Je možné zahrnout efekty
  - tepelné účinky
  - dynamika nabíjení
  - degradace v závislosti na stárnutí



Battery



Battery  
(Table-Based)

Block Parameters: Battery

Battery  Auto Apply

Settings Description

NAME	VALUE
<b>Main</b>	
Nominal voltage, Vnom	
Current directionality	
Internal resistance	
Battery charge capacity	
Expose charge measurement port	
<b>Dynamics</b>	
Charge dynamics	
First polarization resistance	
First time constant	
<b>Thermal Port</b>	
<b>Initial Targets</b>	
<b>Nominal Values</b>	

Block Parameters: Battery (Table-Based)

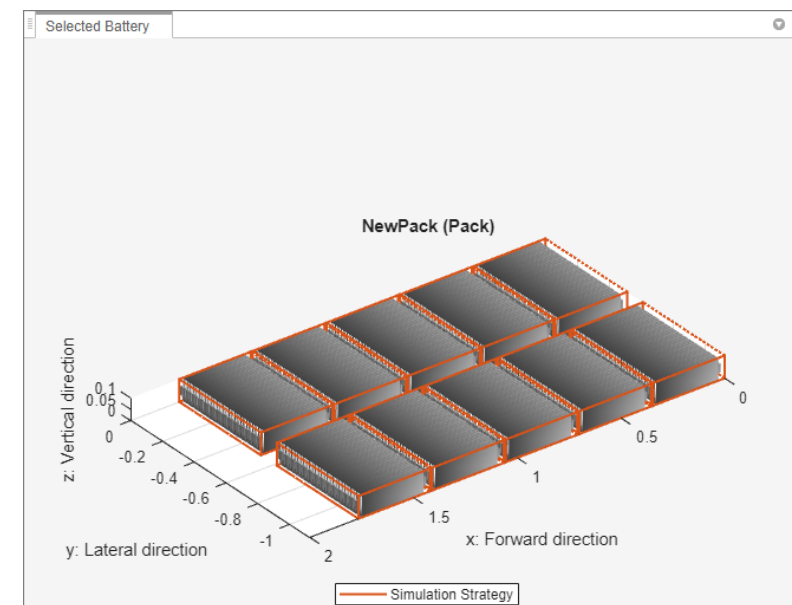
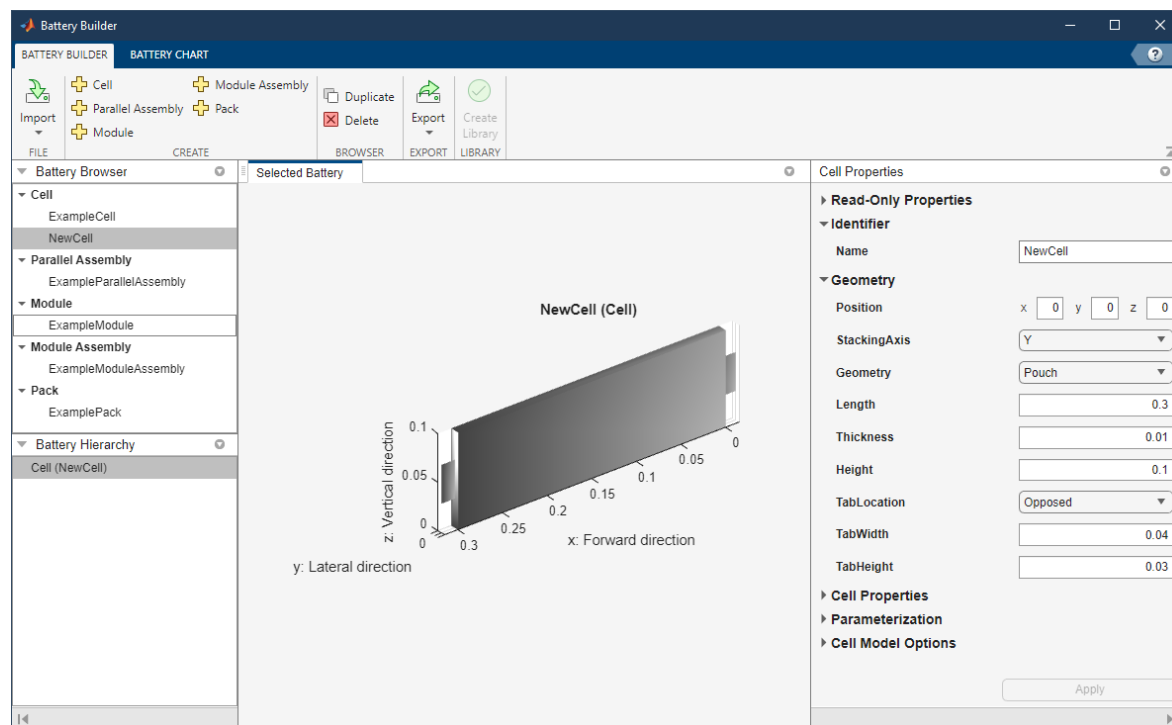
Battery (Table-Based)  Auto Apply

Settings Description

NAME	VALUE
Selected part	<click to select>
<b>Main</b>	
Vector of state-of-charge values, SOC	[0, .1, .25, .5, .75, .9, 1] <1x7 double>
Temperature dependent tables	Yes
Current directionality	Disabled
Vector of temperatures, T	[278, 293, 313] K
Open-circuit voltage, V0(SOC,T)	[3.49, 3.5, 3.51; 3.55, 3.57, 3.56; ...] V
Terminal voltage operating range [Min ...	[0, inf] [0, inf] V
Terminal resistance, R0(SOC,T)	[.0117, .0085, .009; .011, .0085, ...] Ohm
Cell capacity, AH	27 A*hr
Self-discharge	Disabled
Extrapolation method for all tables	Nearest
Expose SOC measurement port	No
<b>Dynamics</b>	
<b>Fade</b>	
<b>Calendar Aging</b>	
<b>Thermal</b>	
<b>Initial Targets</b>	
<b>Nominal Values</b>	



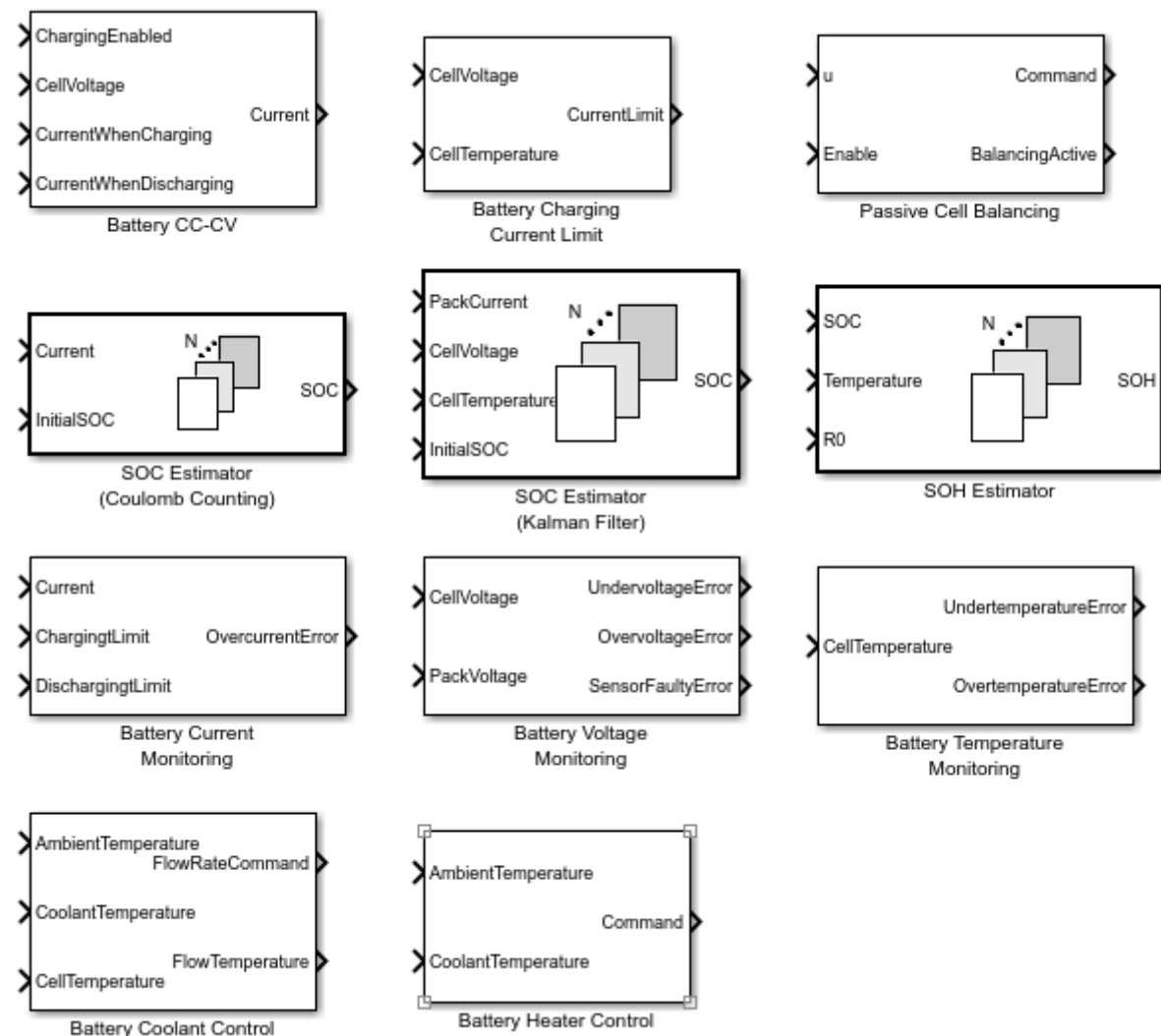
# Ukázka: Grafická aplikace Battery Builder





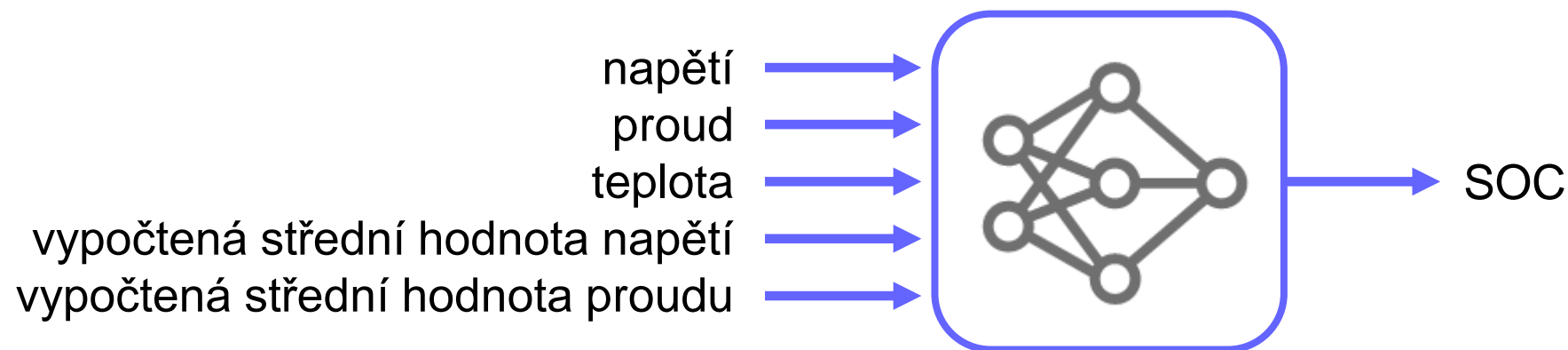
# Algoritmy Simscape Battery pro návrh BMS

- Nabíjení a vybíjení
  - CC-CV, omezení proudu
  - vyvážení nabití článků
- Odhad SOC a SOH
  - integrace proudu (coulomb counting)
  - Kalmanovi filtry
- Ochrana
  - proud, napětí, sledování teploty
  - kvalifikace poruch
- Tepelný management
  - řízení chlazení a ohřevu



# Využití AI pro odhad SOC

- Odhad SOC pomocí neuronové sítě
  - učení na základě laboratorně změřených údajů z reálné baterie



# Příklady a další možnosti modelování v oblasti baterií

- Prediktivní údržba
  - odhad zbývající životnosti baterie metodami machine learning (regresní model)
  - odhad zbývající životnosti baterie metodami deep learning (CNN)
- Reduced Order Modeling
  - náhrada fyzikálního modelu baterie neuronovou sítí
- Techno-ekonomické modelování
  - řízení nabíjení mnoha připojených EV k sítí individuálně pro dosažení optimálních výsledků

# Uživatelská reference

## Mahindra Electric Uses System-Level Simulation to Optimize Battery Thermal Management System for an Electric Vehicle

### Challenge

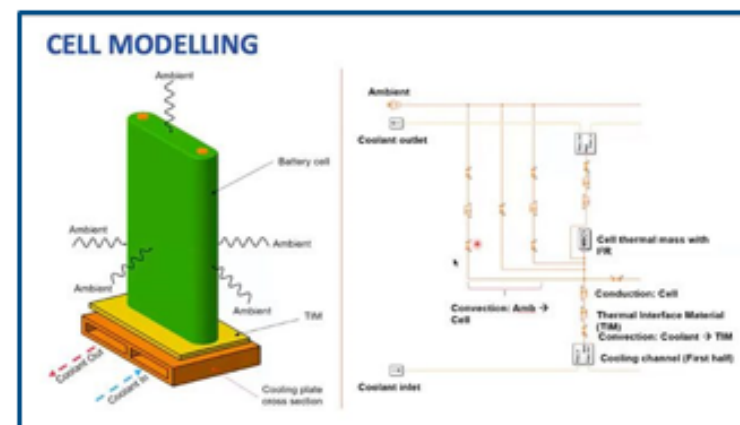
Develop new logic for better energy efficiency of an EV battery thermal management system

### Solution

Create and validate a system-level simulation model for an electric vehicle and tune parameters to optimize energy efficiency

### Key Outcomes

- Created and validated a system-level simulation model for an electric vehicle with battery, cooling circuit, refrigeration circuit, vehicle, and driver
- Developed concepts and tuned parameters to choose the best components at its best operating point
- Developed new compressor operation logic and tested it for better energy efficiency



Cell modeling with thermal behavior.

*“1D simulation has been used in Mahindra Electric to optimize the BTMS. In this system model, the battery, cooling circuit, and refrigeration circuit were effectively implemented using Simscape. The vehicle, driver, and equivalent circuit model were implemented on the Simulink platform.”*

*- Vipin K. Venugopal, Mahindra Electric*

Otázky?