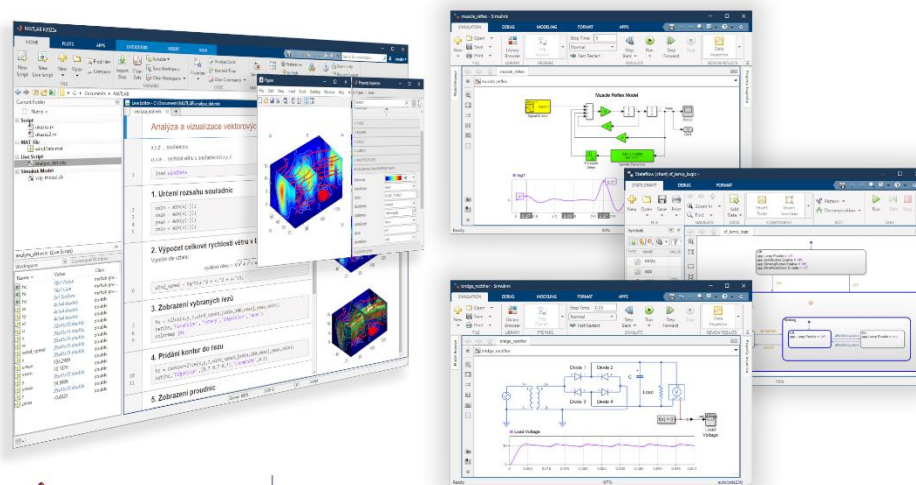


MATLAB a Simulink Modelování a vývoj elektrických pohonů a výkonové elektroniky



Jaroslav Jirkovský
jirkovsky@humusoft.cz

www.humusoft.cz

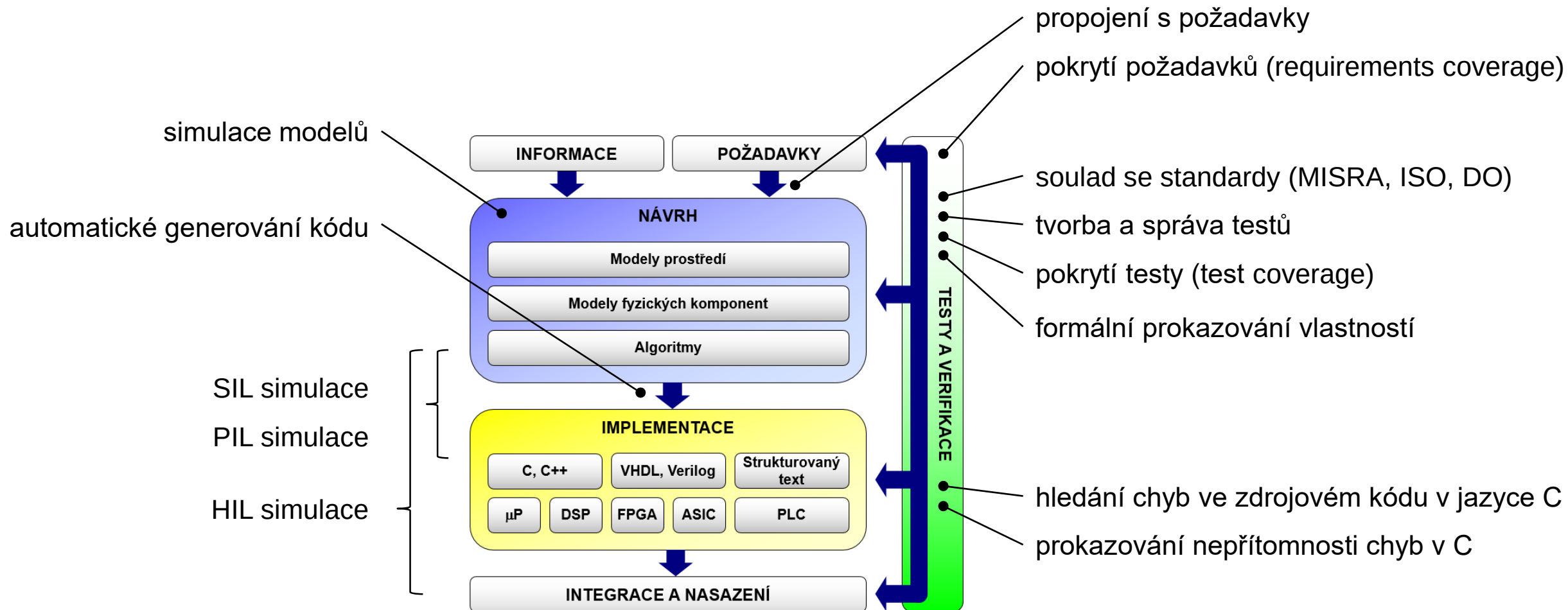
info@humusoft.cz

www.mathworks.com

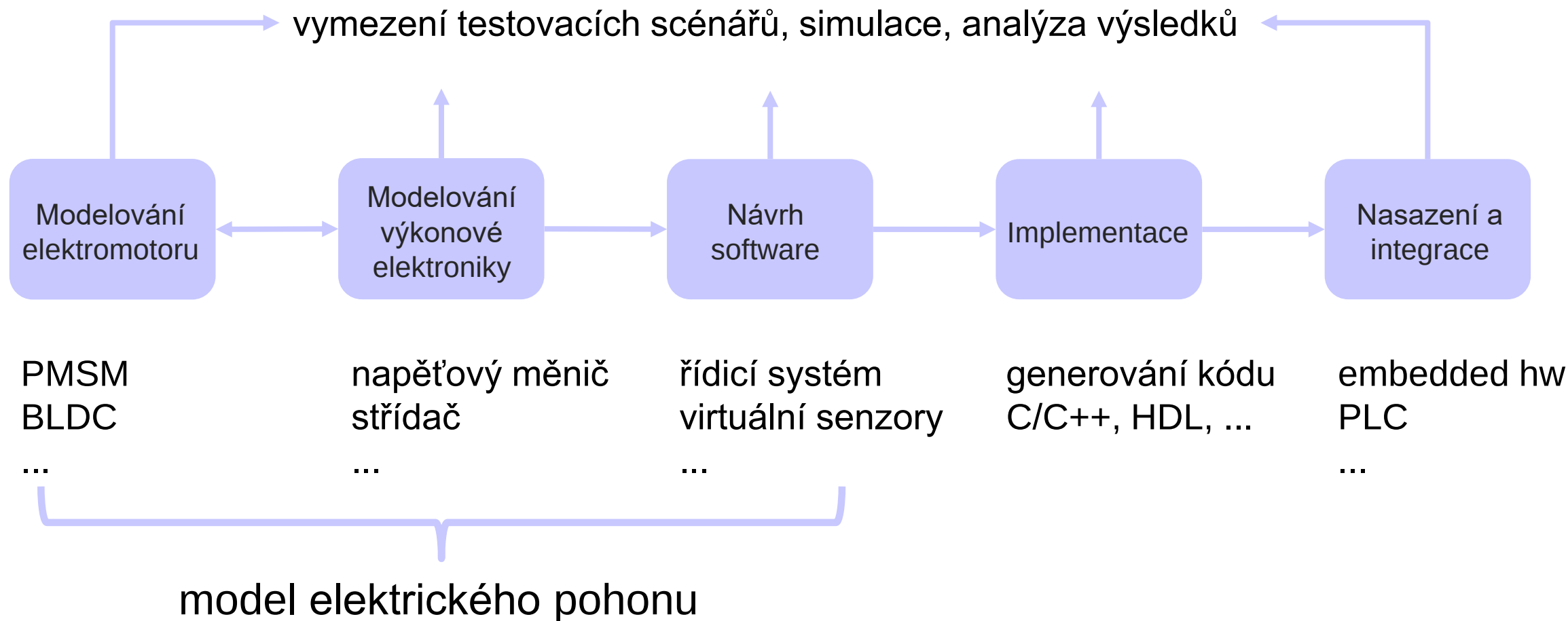


Nasazení

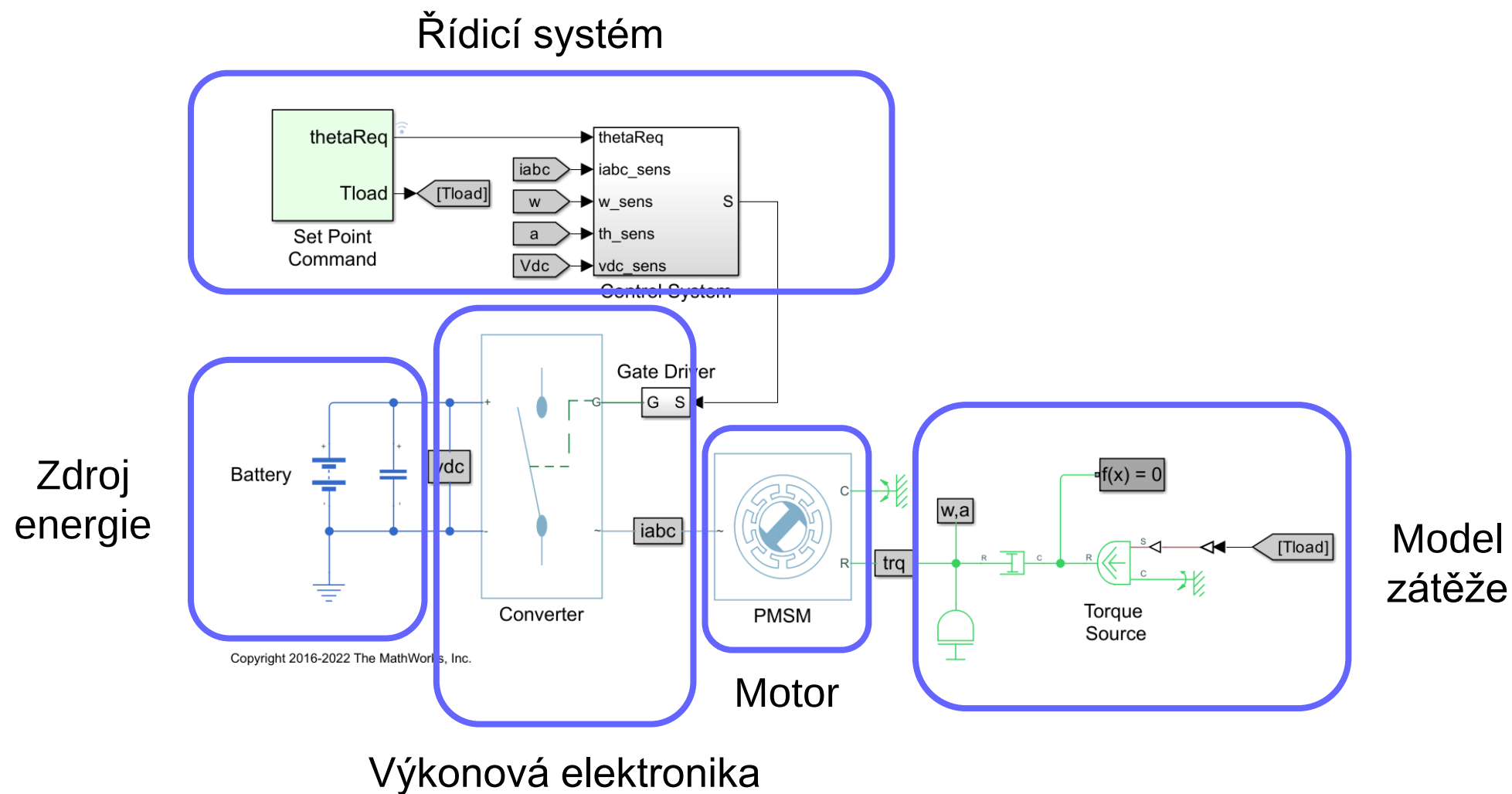
Vývoj metodou Model-Based Design



Typické kroky při vývoji software pro elektrický pohonný systém

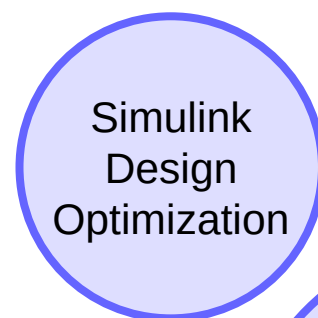


Příklad modelu elektrického pohonu



MATLAB a Simulink pro modelování elektrického pohonu

Optimalizace a ladění
parametrů modelu



Linearizace modelů
a návrh řídicích systémů

Simulink Control
Design

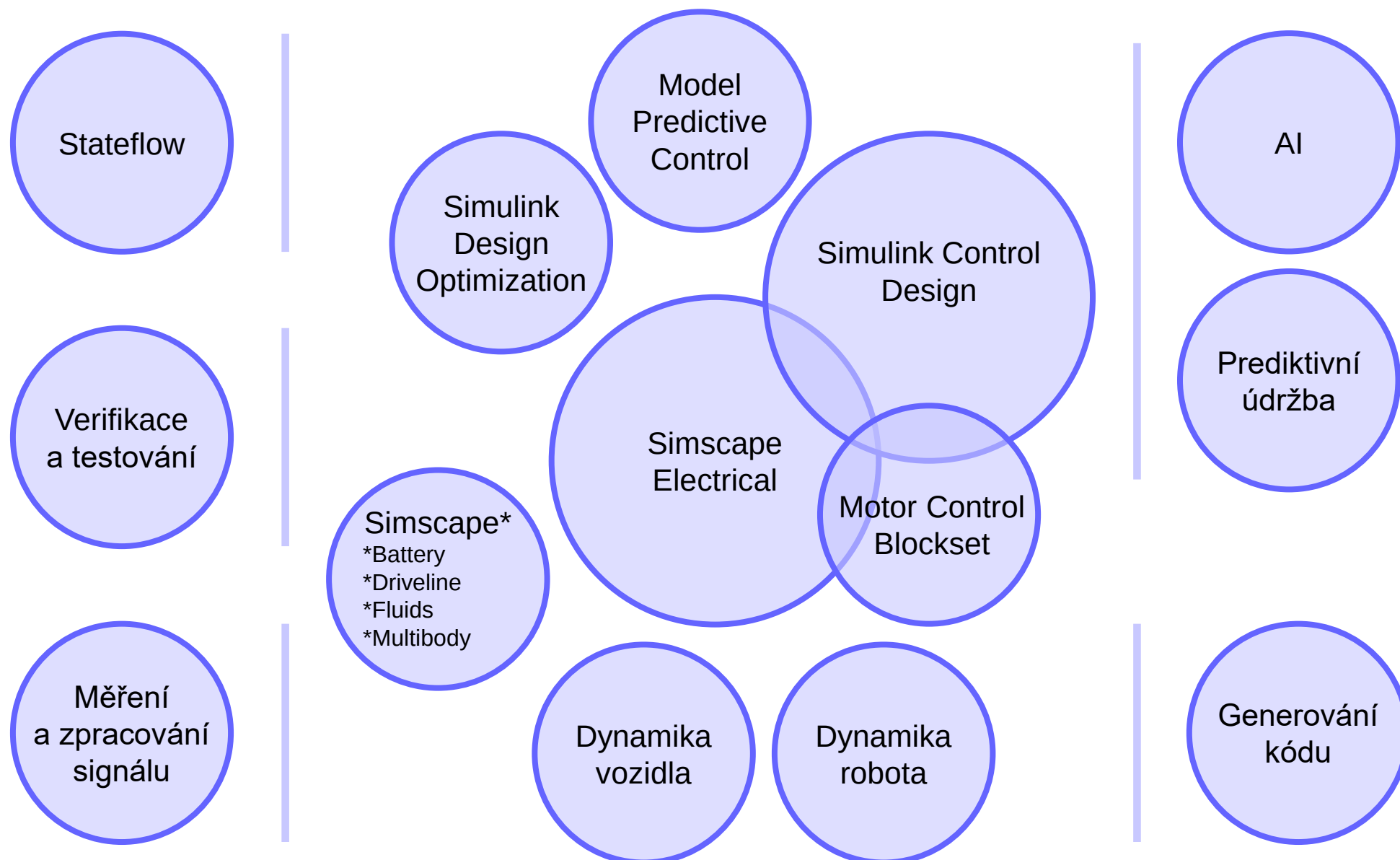
Simscape
Electrical

Motor Control
Blockset

Modelování mechatronických
systémů, výkonové elektroniky
a jejich řízení*

Návrh a implementace
algoritmů pro řízení pohonů**

MATLAB a Simulink pro modelování elektrického pohonu

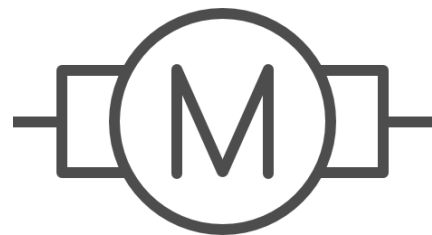


Modelování pohonu a výkonové elektroniky

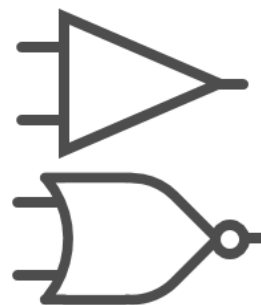
Modely 1f prvků v Simscape Electrical



polovodičové
prvky



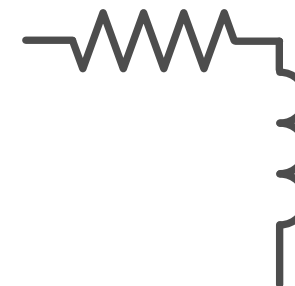
motory,
akční prvky



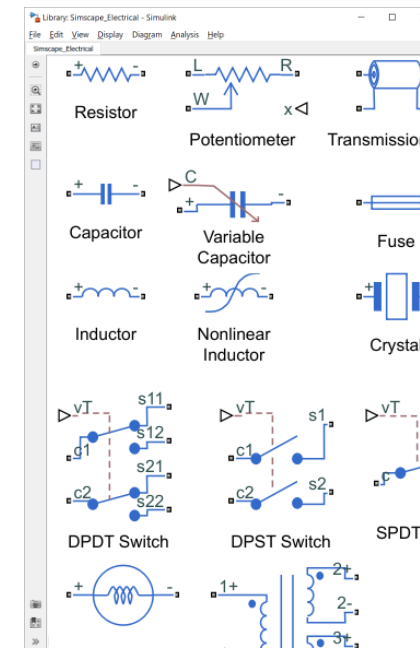
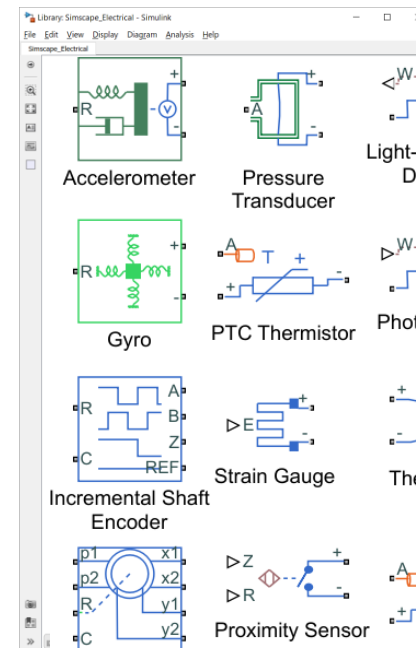
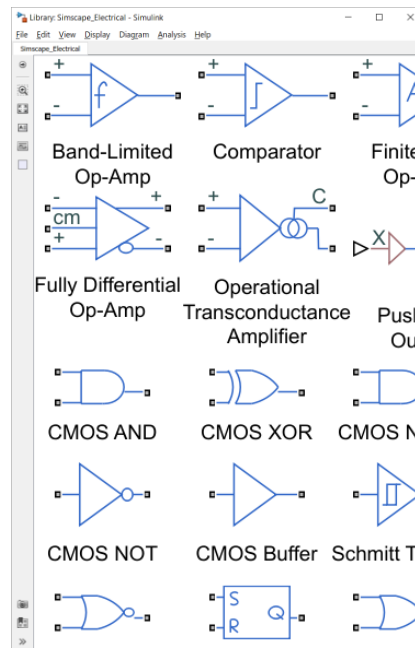
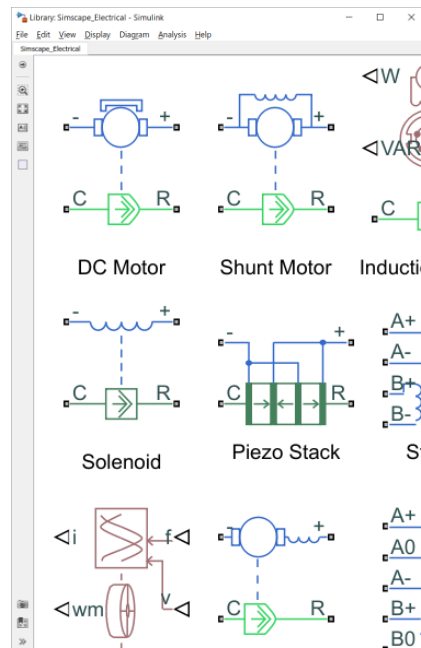
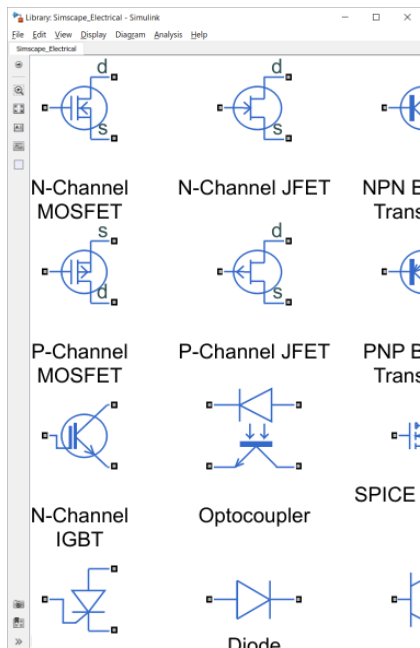
op. zesilovače,
logická hradla



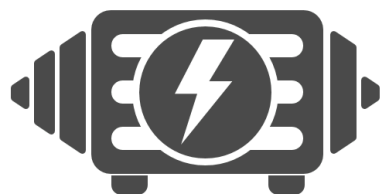
senzory



pasivní
součástky



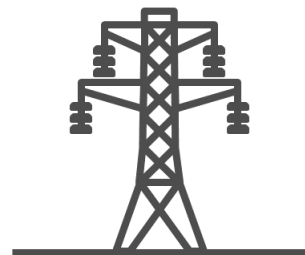
Modely 3f prvků v Simscape Electrical



třífázové
motory



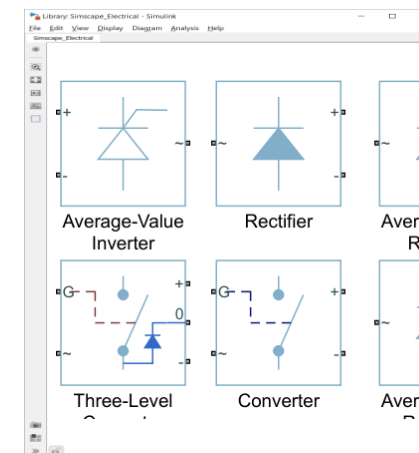
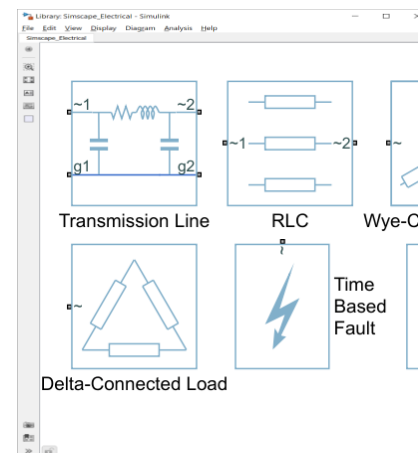
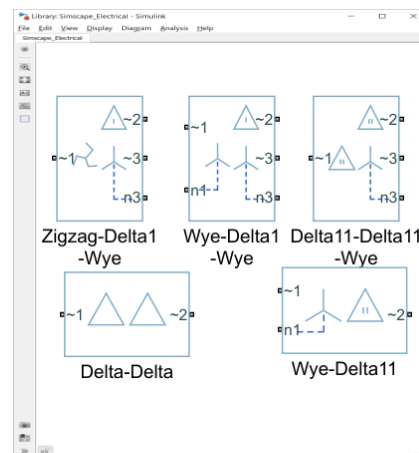
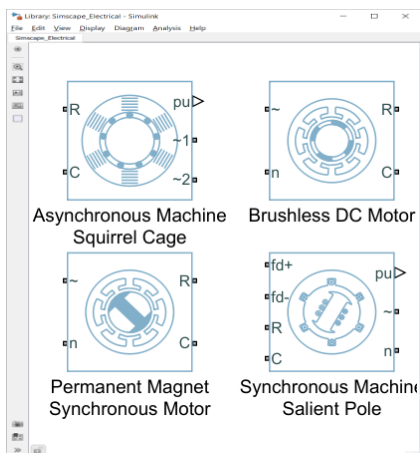
transformátory



vedení,
FACTS



měníče,
střídače

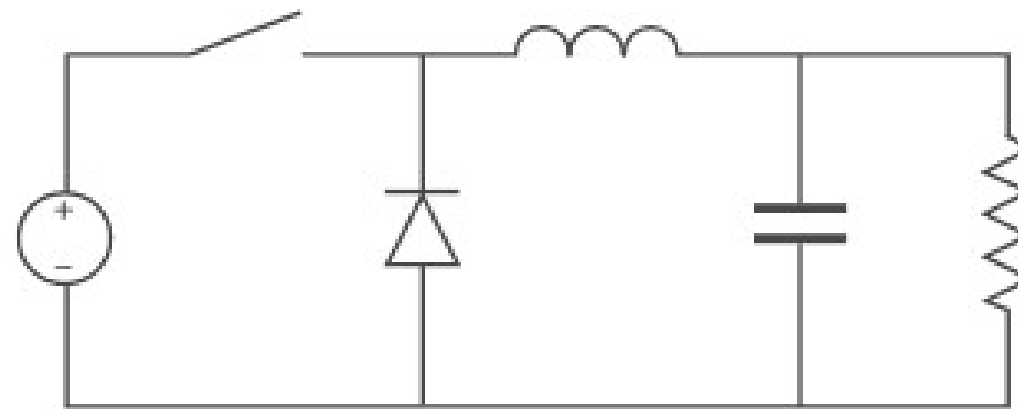


Ukázka: Buck Converter

- DC-DC měnič
 - snížení hodnoty vstupního napětí 48V na hodnotu 12V
- Spínací prvek řízený PWM signálem
 - hodnota výstupního napětí dána hodnotou Duty Cycle (střída signálu)

$$DC = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad V_{out} = DC V_{in}$$

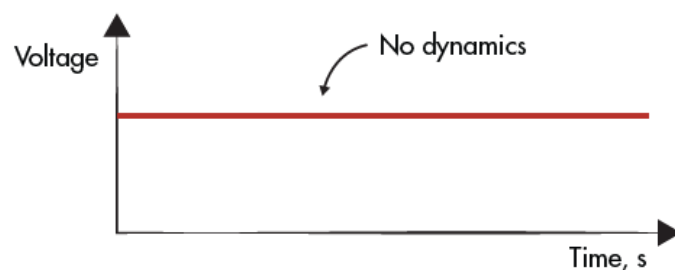
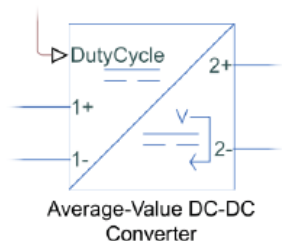
$$DC = \frac{12}{48} = 0.25$$



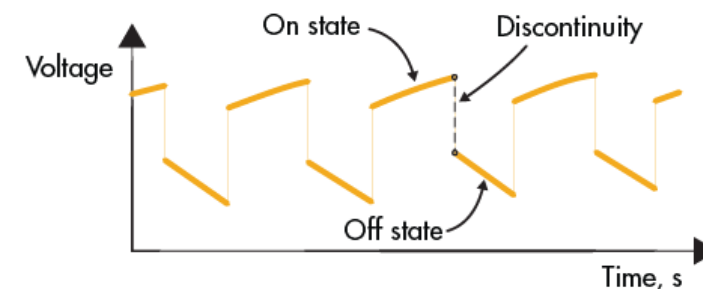
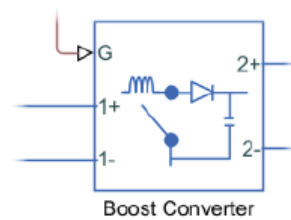
Úroveň detailu

- Pro různé účely je možné využít různou úroveň detailu
- Například pro DC-DC měnič:

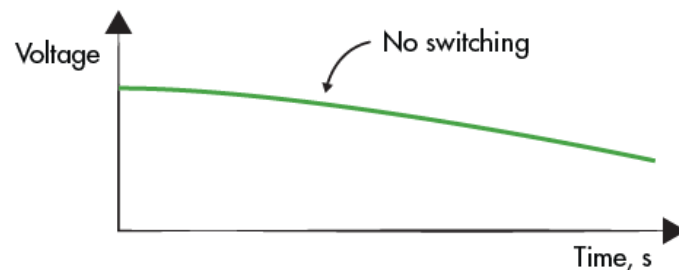
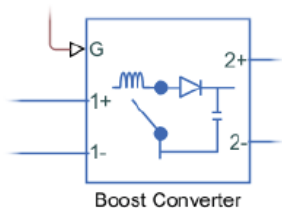
Průměrná hodnota



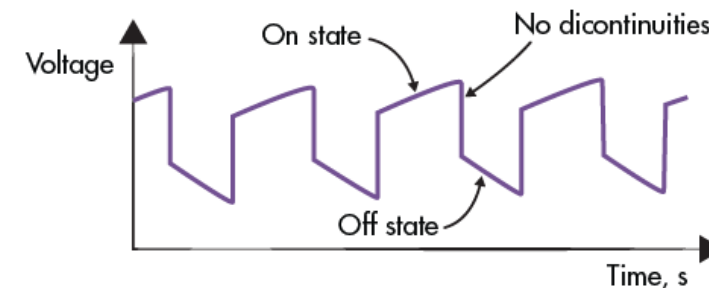
Po částech lineární spínání



Průměrná hodnota spínání

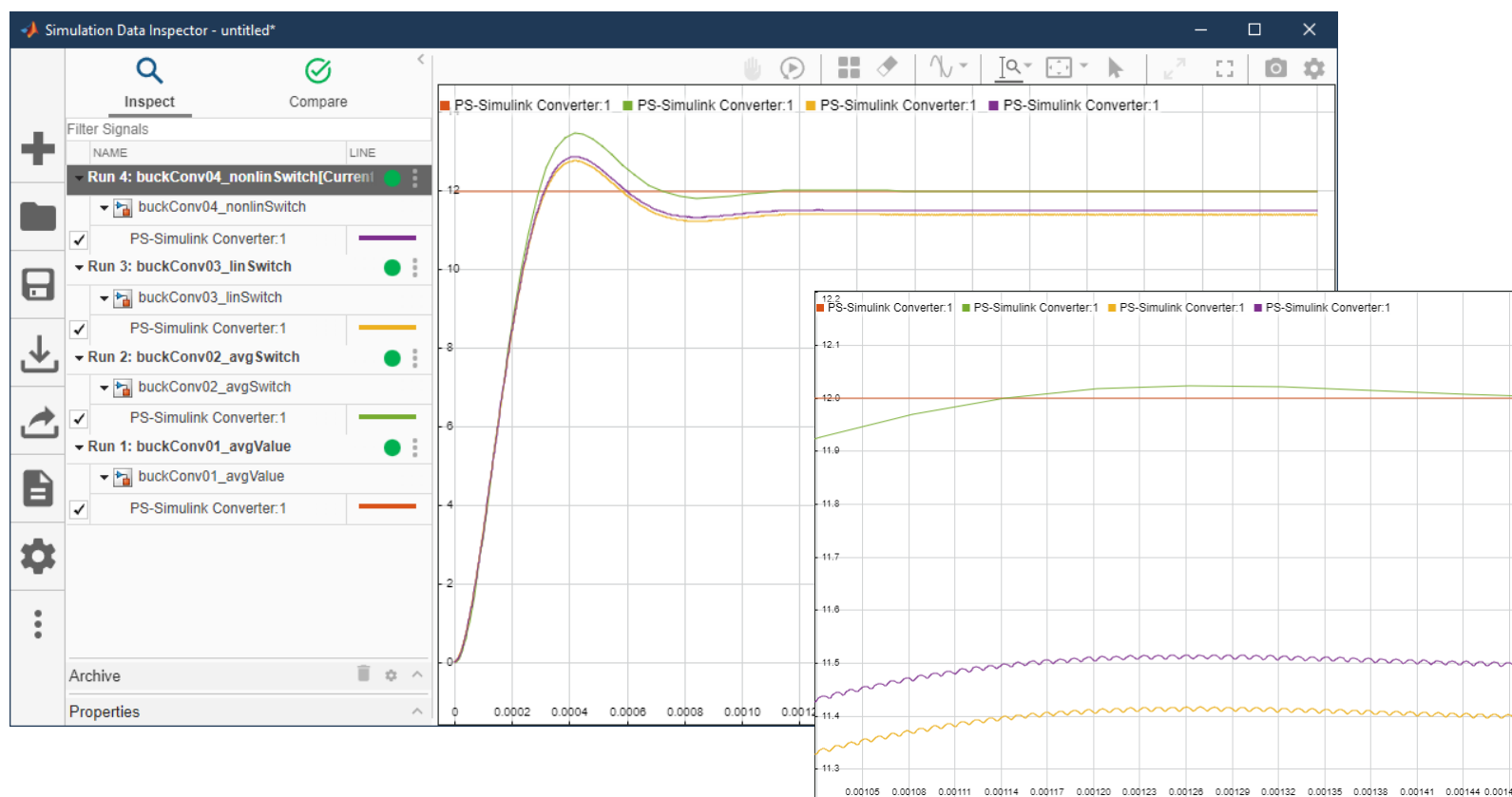


Nelineární spínání



Ukázka: Úroveň detailu

- Odlišná úroveň detailu pro DC-DC měnič



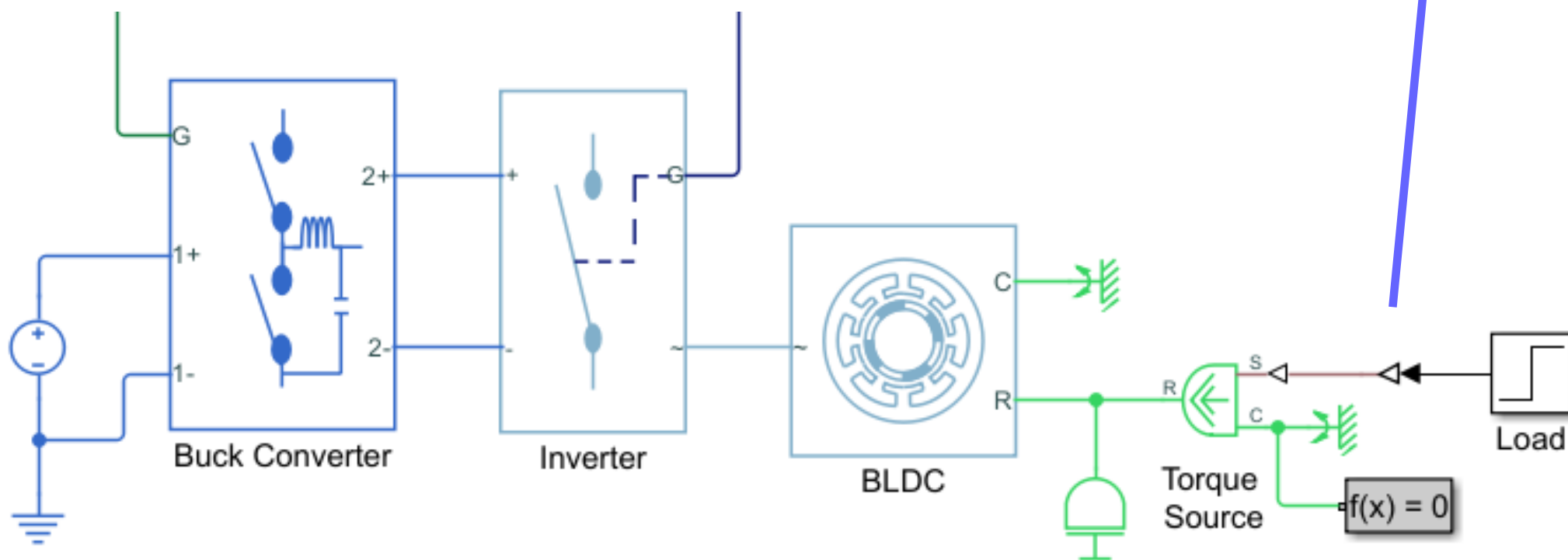
Zapojení kompletního pohonu

- výkonová elektronika + motor + zátěž

řízení měniče

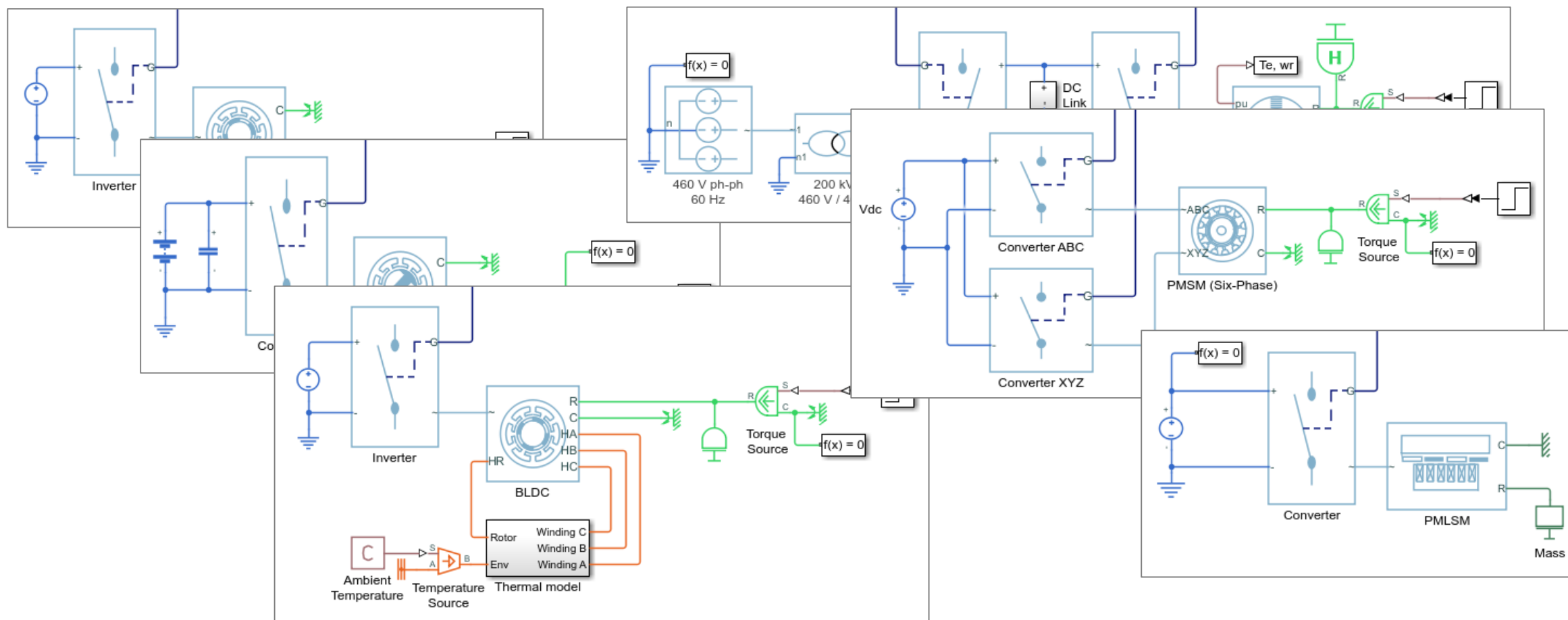
řízení střídače

simulace zátěže



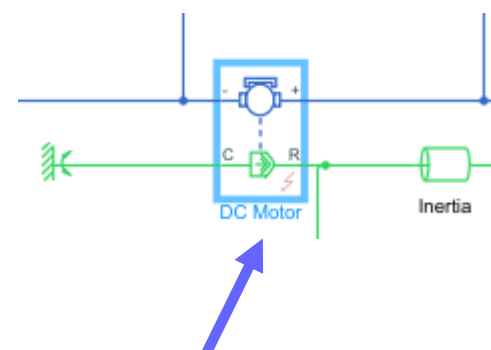
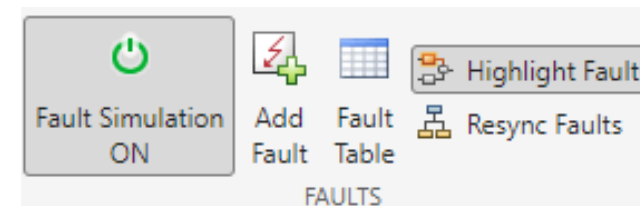
Zapojení kompletního pohonu: další ukázky

- výkonová elektronika + motor + zátěž

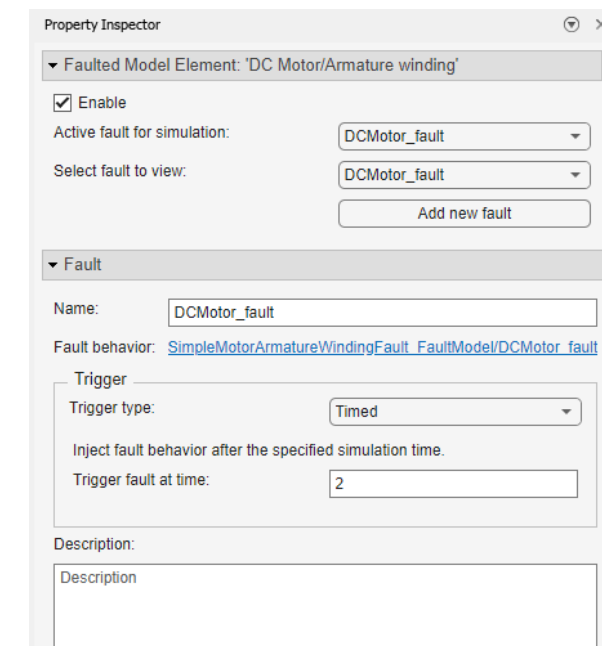


Modelování a simulace poruch

- Simulace poruch
 - analýza vlivu poruchy na chování systému
 - návrh systémů pro diagnostiku poruch
- Zadání „neinvazivním“ způsobem
 - nemění topologii modelu
 - přiřazení poruchy k vybranému bloku
- Nastavení poruch
 - spouštěč poruchy, parametry poruchy
 - scénář pro více poruch v jedné simulaci
- Panel správce zadaných poruch



označení poruchy

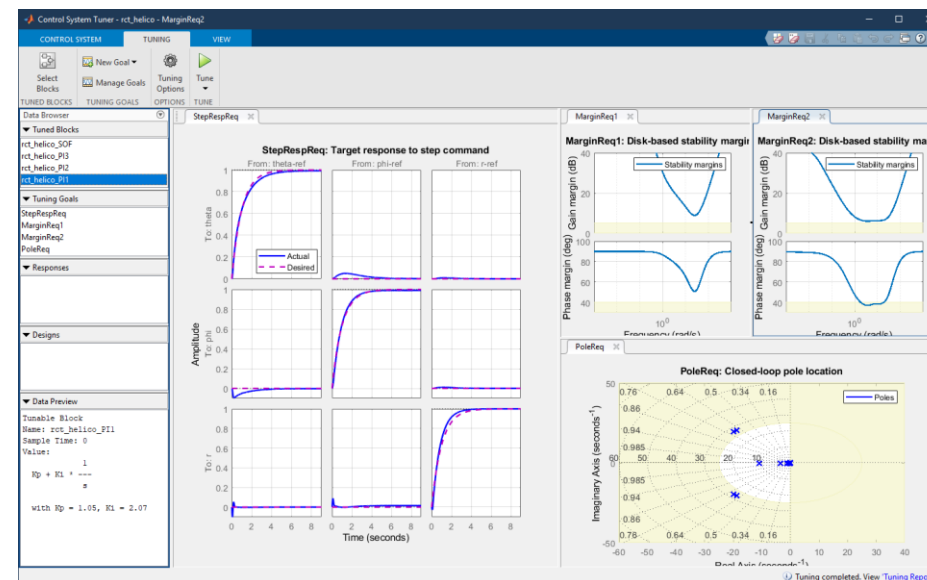
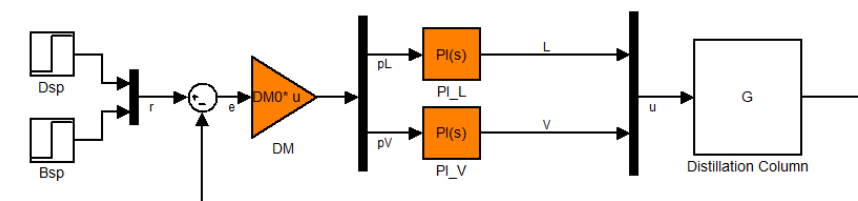
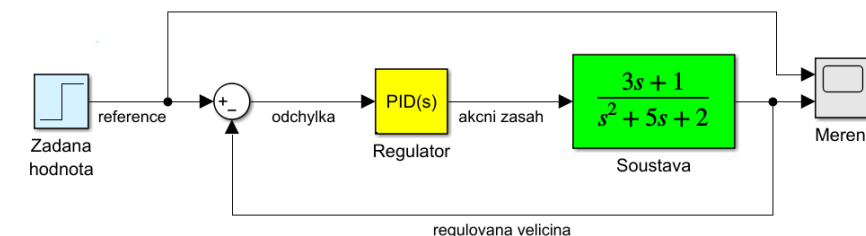


Fault Table				
Enable	Model Element/Fault Name	Active Fault	Trigger	Description
☒	DC Motor/Armature winding			
	DCMotor_fault	☐	Timed: 2	
	DCMotor_fault_1	☒	Always On	

Návrh řídicího systému

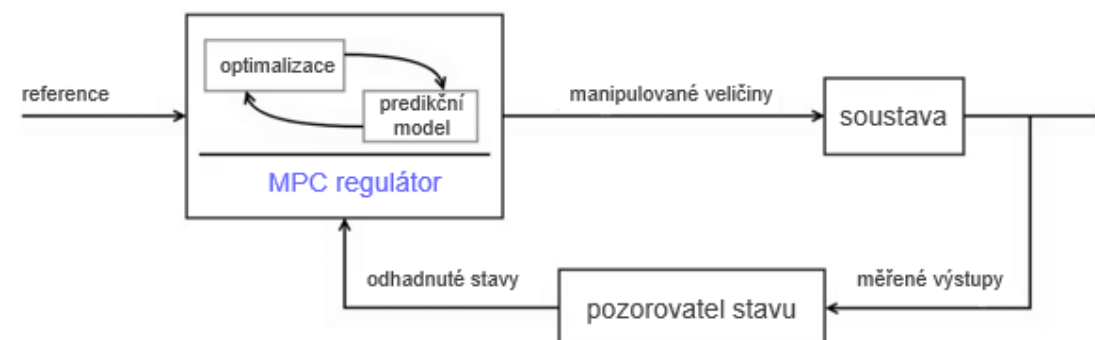
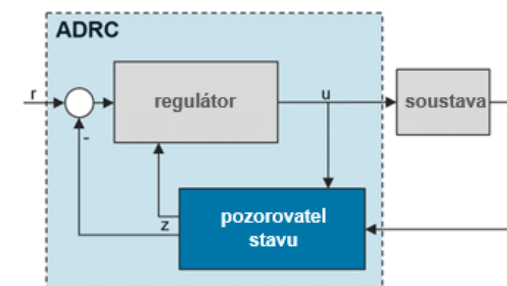
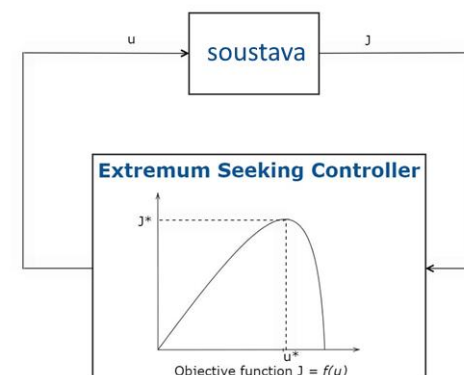
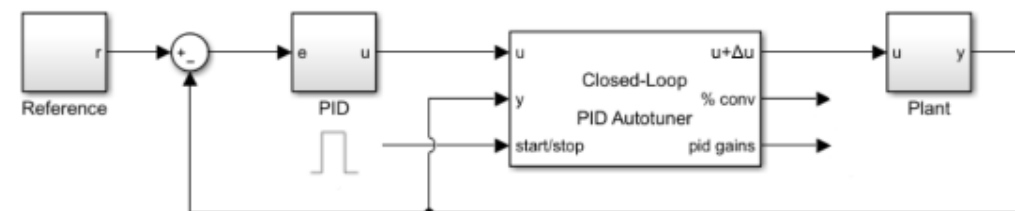
Modelování řídicích systémů

- 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



Modelování adaptivních/prediktivních řídicích systémů

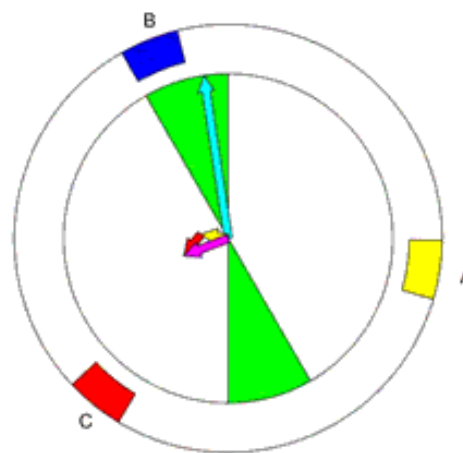
- Adaptivní řídicí systémy
 - Open-Loop / Closed-Loop PID Autotuner
 - Extremum Seeking Control
 - Model Reference Adaptive Control
 - **Active Disturbance Rejection Control**
- Prediktivní řízení
 - Model Predictive Control (MPC)
- Využití AI
 - Reinforcement learning (RL)



Řízení elektrických pohonů

- Motory s elektronickou komutací
- BLDC
 - lichoběžníkové řízení
(šesti-sektorová komutace)
- PMSM
 - field-oriented control
(vektorové řízení)

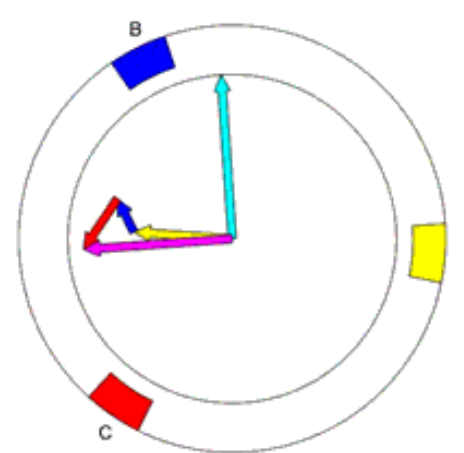
BLDC Six-Sector Commutation
Two Pole-Pair



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

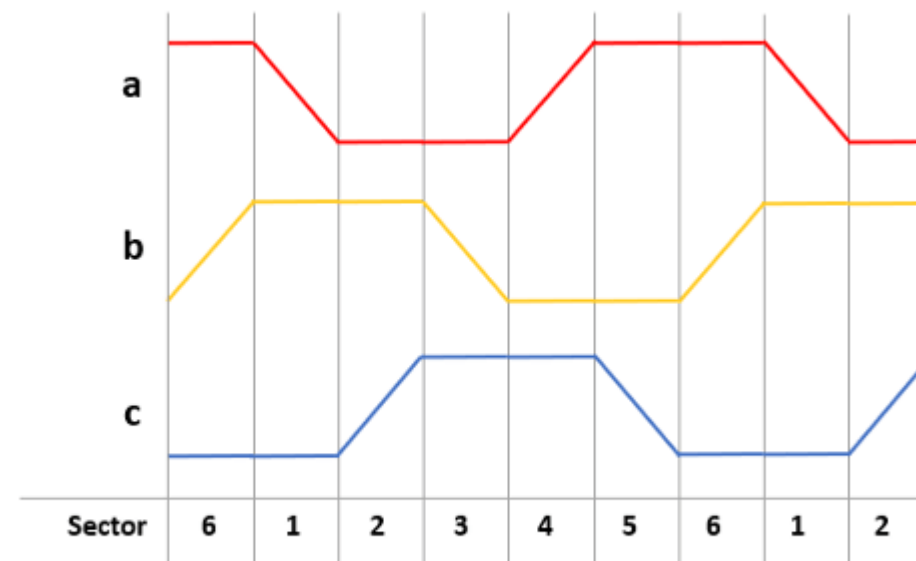
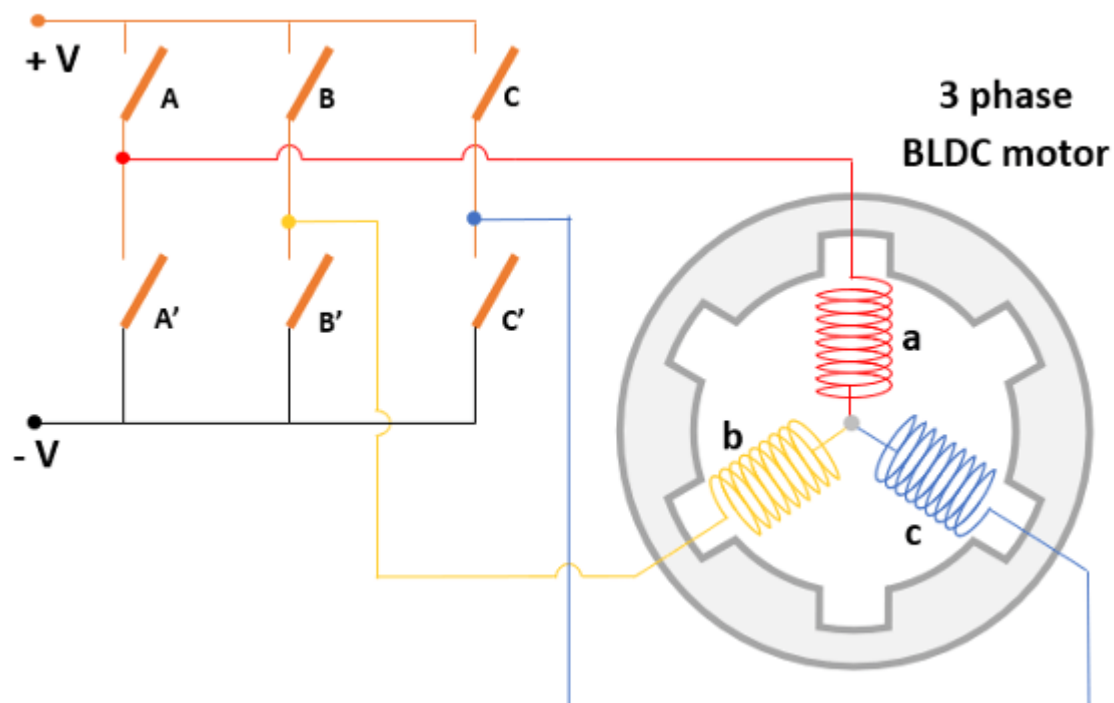
One mechanical rotation sees two electrical rotations



Lichoběžníkové řízení (šesti-sektorová komutace)

- Střídač spíná vždy 2 fáze dle polohy rotoru
 - sepnutí konkrétních spínačů dáno tabulkou
- Rychlost otáčení dána velikostí vstupního napětí

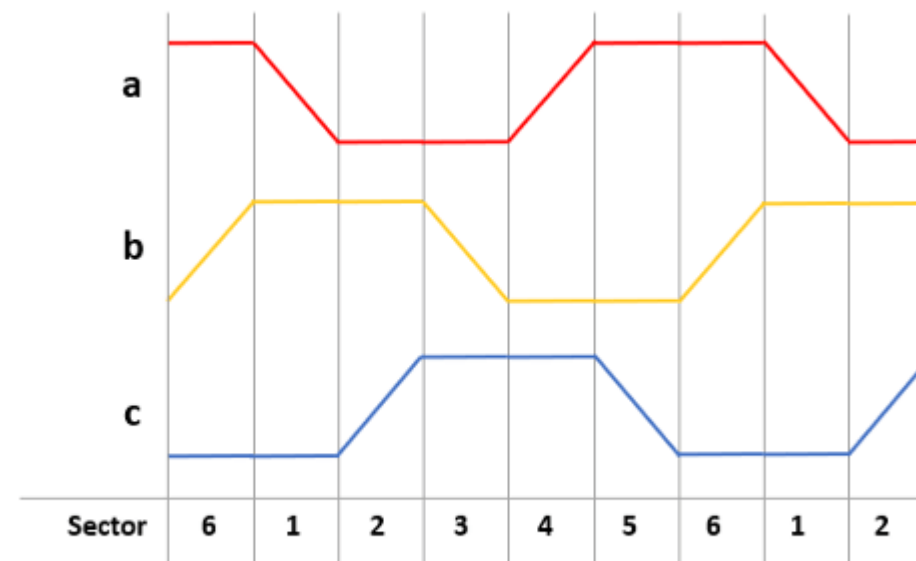
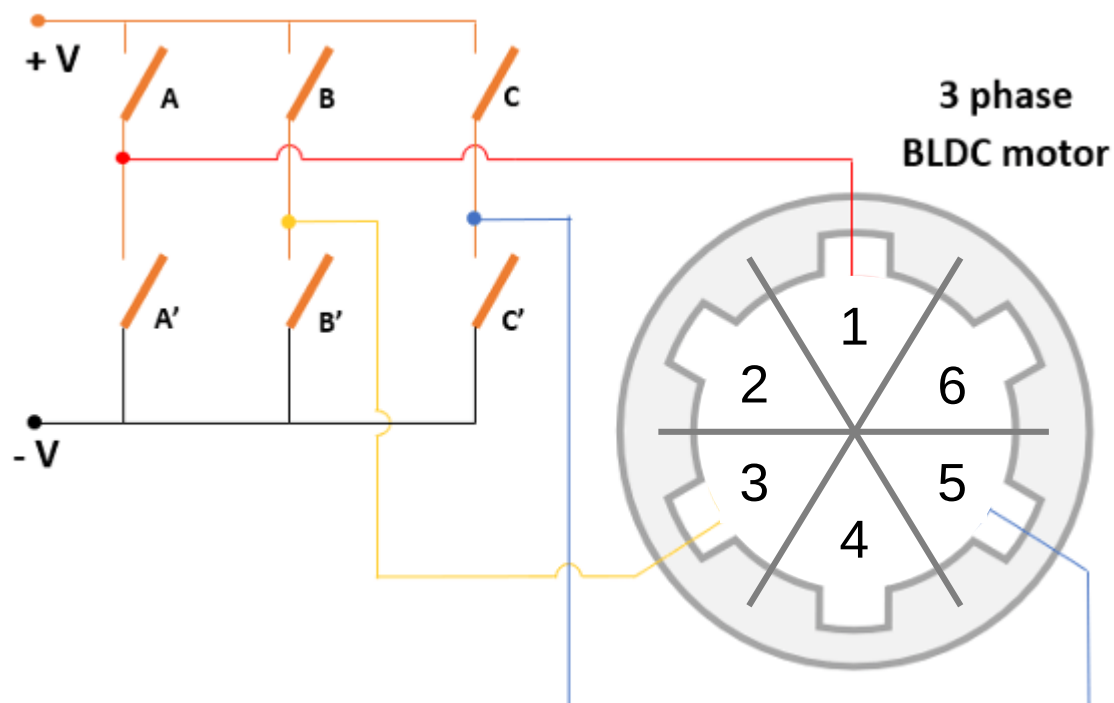
Sektor	AA'	BB'	CC'
1	00	10	01
2	01	10	00
3	01	00	10
4	00	01	10
5	10	01	00
6	10	00	01



Lichoběžníkové řízení (šesti-sektorová komutace)

- Střídač spíná vždy 2 fáze dle polohy rotoru
 - sepnutí konkrétních spínačů dáno tabulkou
- Rychlost otáčení dána velikostí vstupního napětí

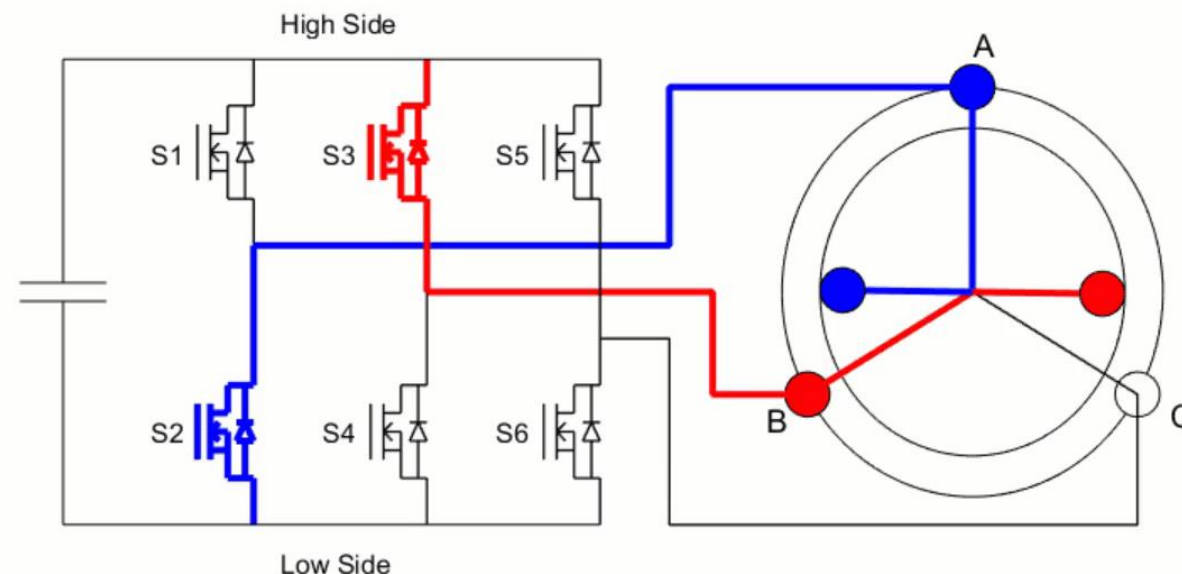
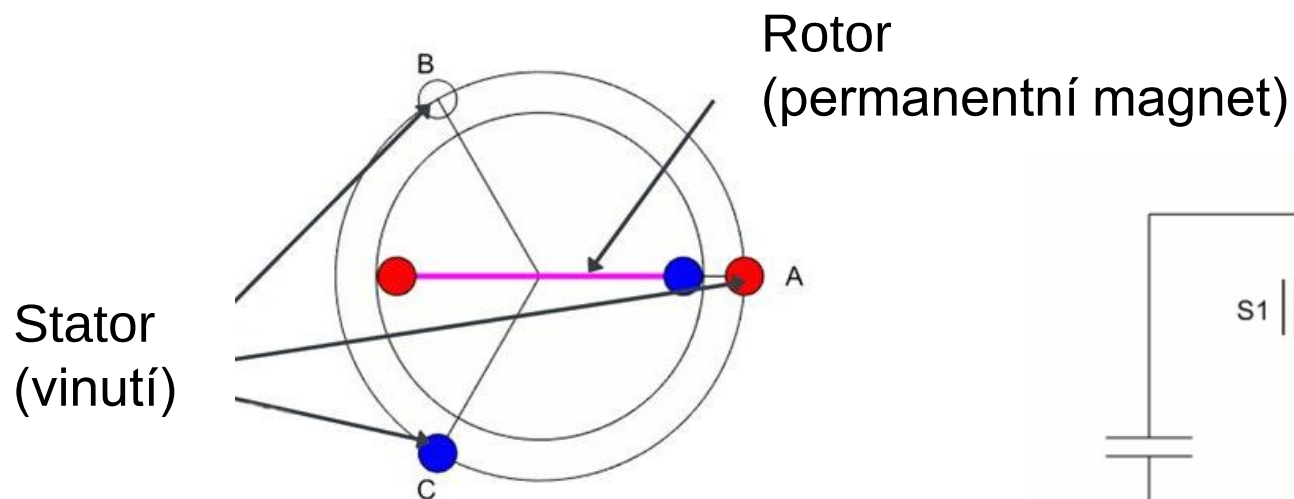
Sektor	AA'	BB'	CC'
1	00	10	01
2	01	10	00
3	01	00	10
4	00	01	10
5	10	01	00
6	10	00	01



Lichoběžníkové řízení (šesti-sektorová komutace)

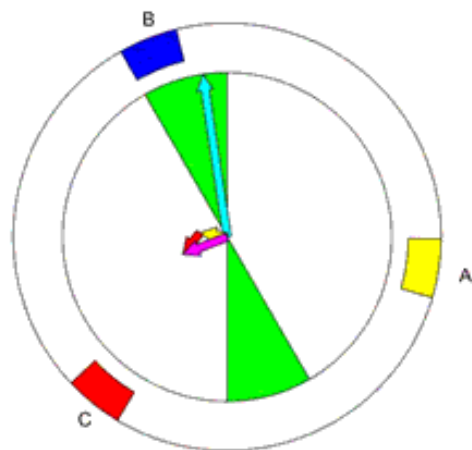
- Střídač spíná vždy 2 fáze dle polohy rotoru
 - sepnutí konkrétních spínačů dáno tabulkou
- Rychlost otáčení dána velikostí vstupního napětí

Sektor	AA'	BB'	CC'
1	00	10	01
2	01	10	00
3	01	00	10
4	00	01	10
5	10	01	00
6	10	00	01



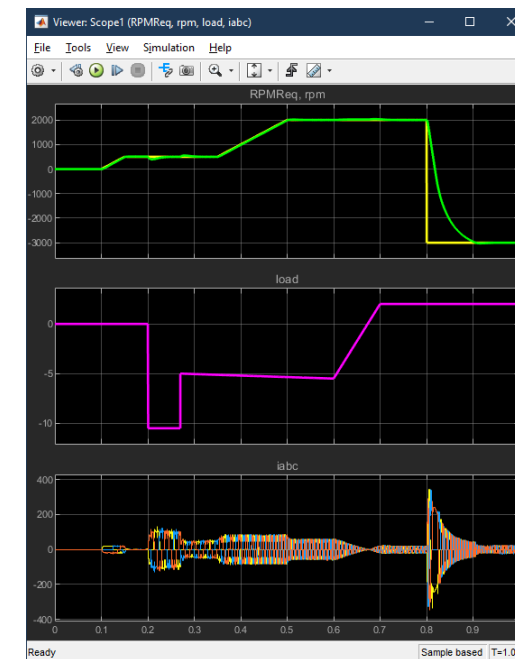
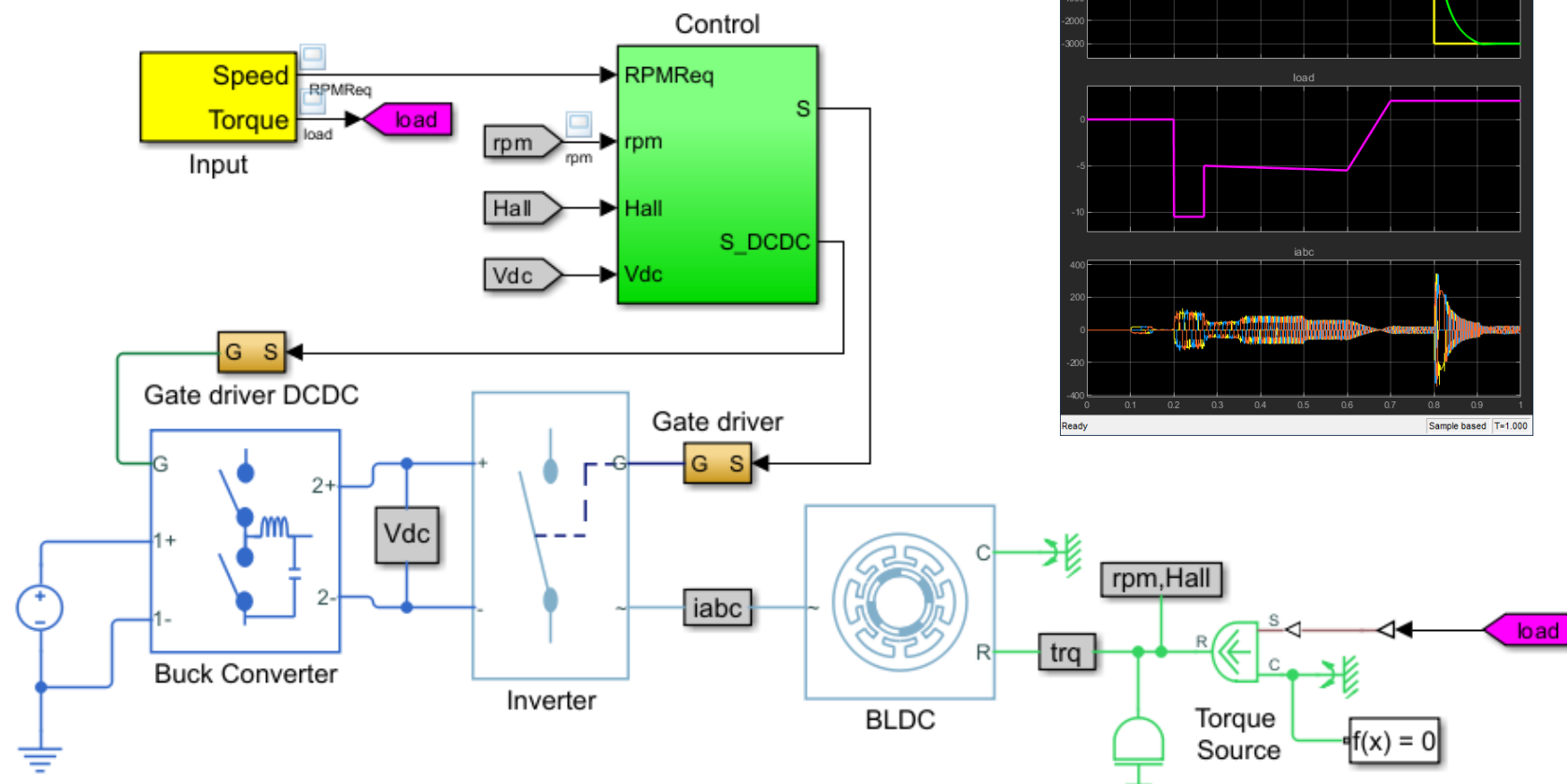
Ukázka: Model a řídicí systém BLDC pohonu: řízení otáček

BLDC Six-Sector Commutation
Two Pole-Pair



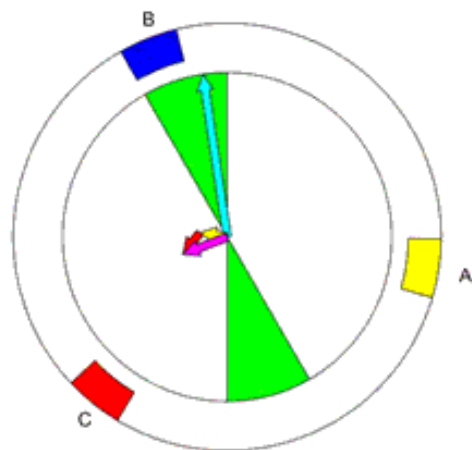
Commutates every 30 mechanical degrees

One mechanical rotation sees two electrical rotation



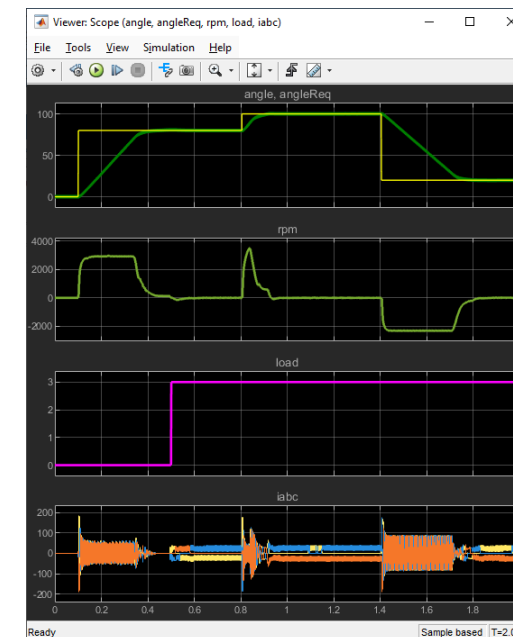
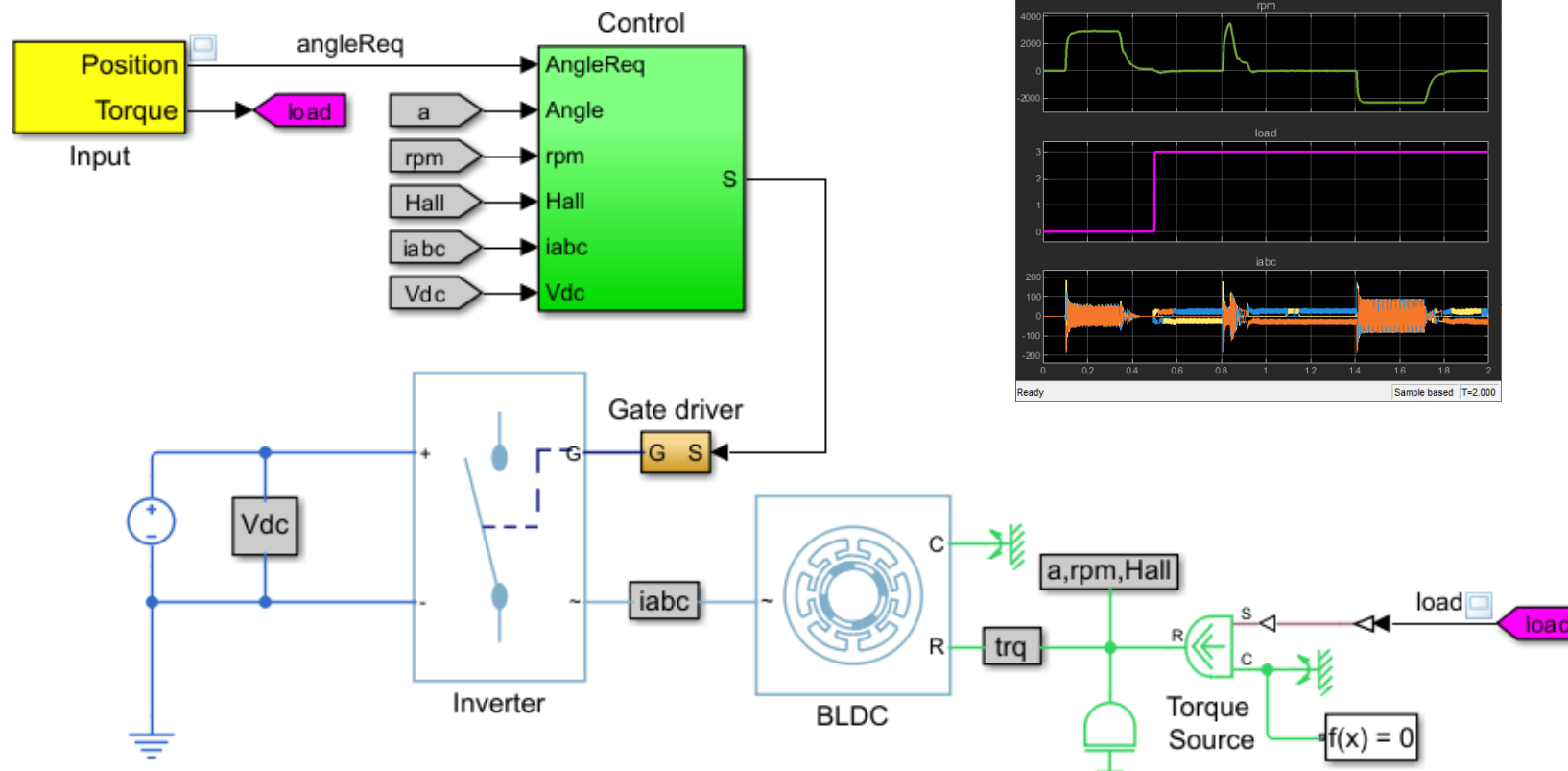
Ukázka: Model a řídicí systém BLDC pohonu: řízení polohy

BLDC Six-Sector Commutation
Two Pole-Pair



Commutates every 30 mechanical degrees

One mechanical rotation sees two electrical rotation



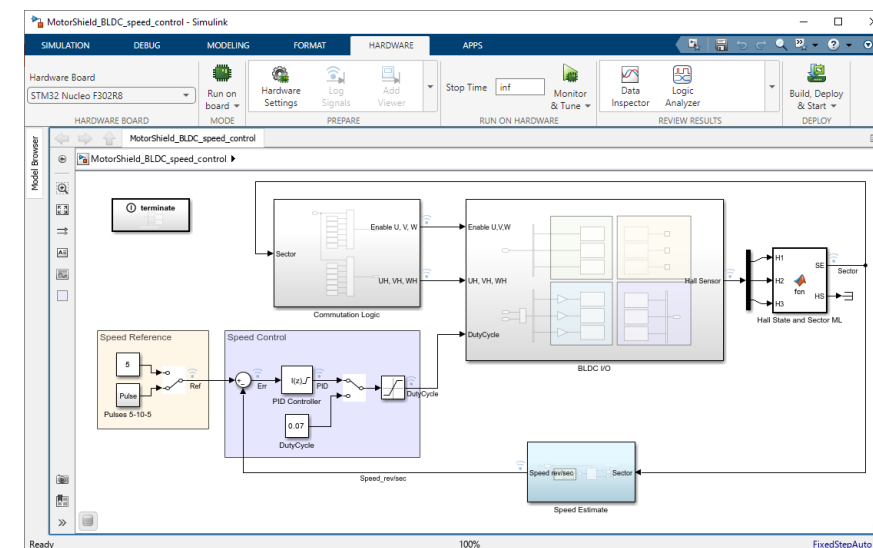
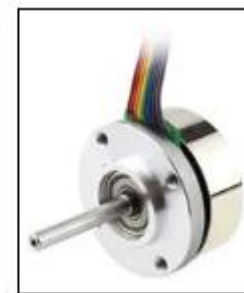
Ukázka: Nasazení ř. s. BLDC pohonu na cílovou platformu

- BLDC motor
 - stejnosměrný motor s elektronickou komutací
 - 8 pólových dvojic
 - Hallův senzor
- Algoritmus
 - PID regulace otáček, šesti-sektorová komutace
 - Simulink Coder Support for STM32 Nucleo Boards
- Spuštění a nasazení algoritmu
 - v režimu Monitor & Tune
- Hardware
 - STM32 Nucleo F302R8, X-NUCLEO-IHM07M1

řízení

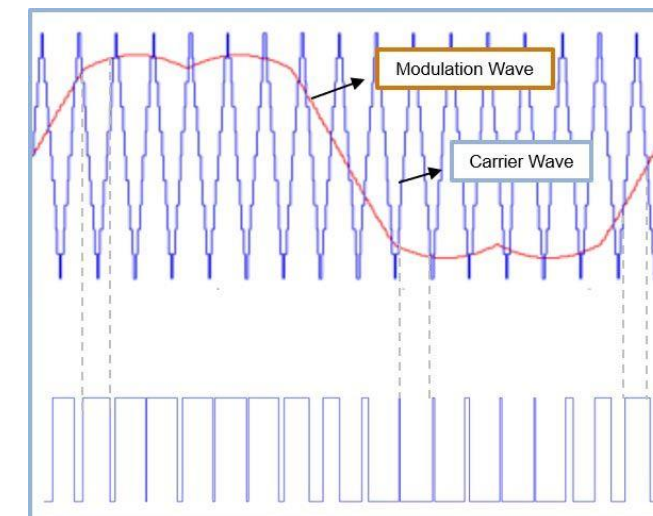
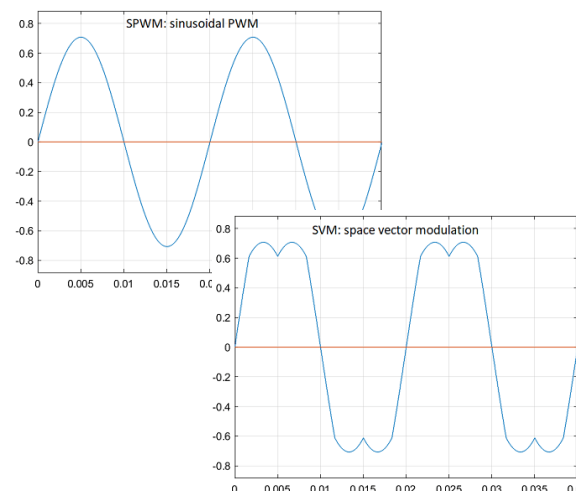
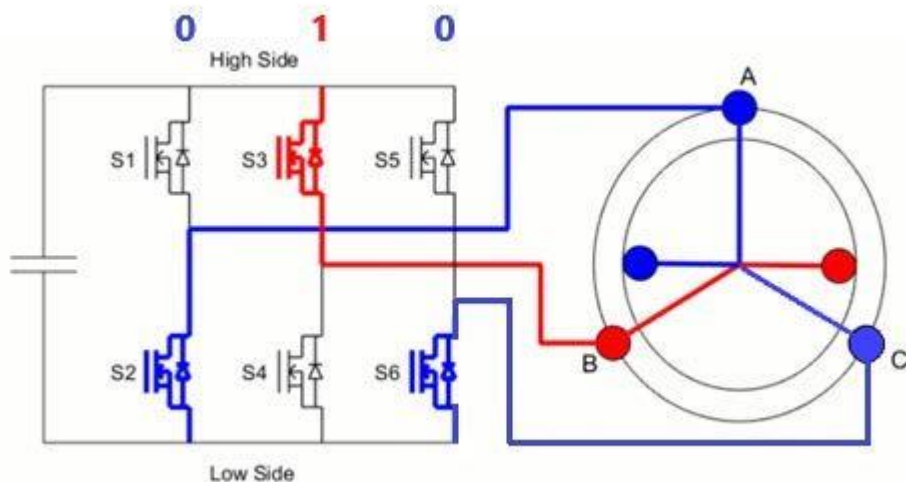
výkonová část

motor



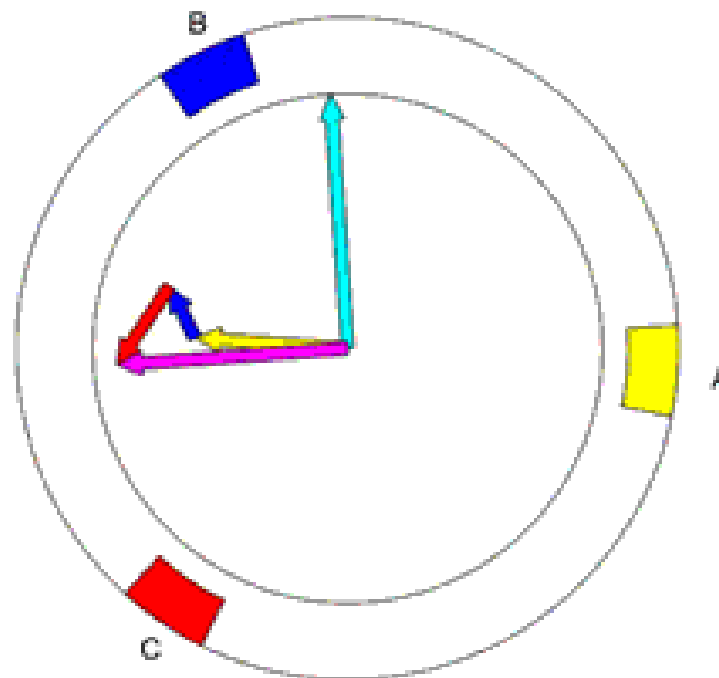
Field-Oriented Control (vektorové řízení)

- Střídač ovládá všechny 3 fáze najednou
 - napětí jednotlivých fází mají střídavý průběh (sinusový, SVM)
- Okamžitá hodnota napětí dané fáze dosažena PWM modulací
- Rychlost otáčení rotoru stejná s rychlostí otáčení pole statoru (synchronní motor)



Field-Oriented Control (vektorové řízení)

- Řízení momentu a rychlosti v plném pracovním rozsahu
- Problém
 - řízení střídavého 3f napětí
- Řešení
 - Clarke a Park transformace

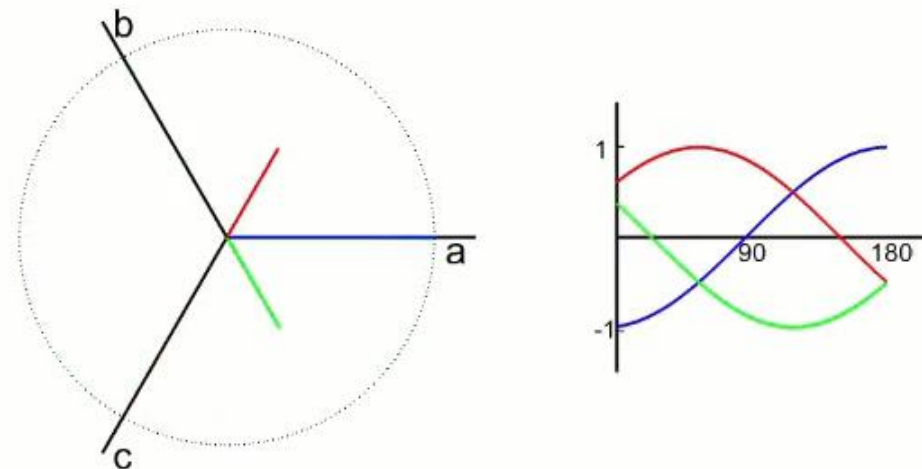


 Rotor Magnetic Reference
 Current Vector

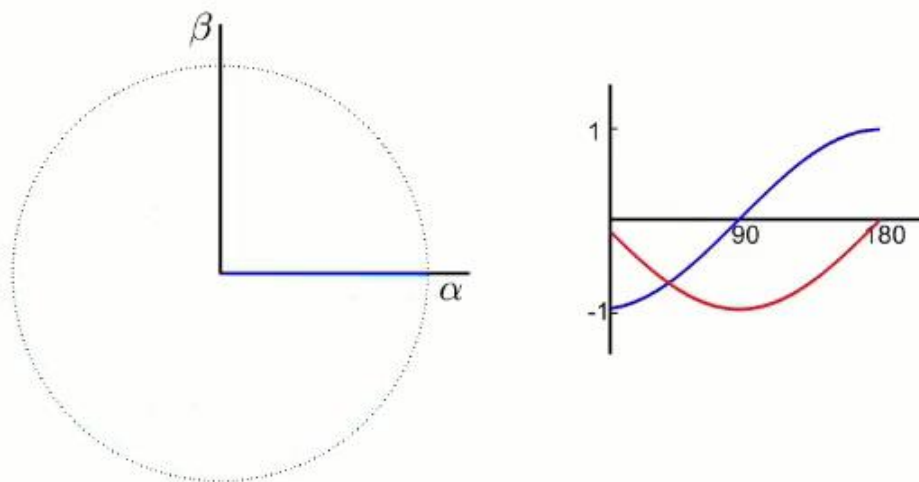
Current vector leads rotor magnetic reference by 90 mechanical degrees

Field-Oriented Control – Clarke a Park transformace

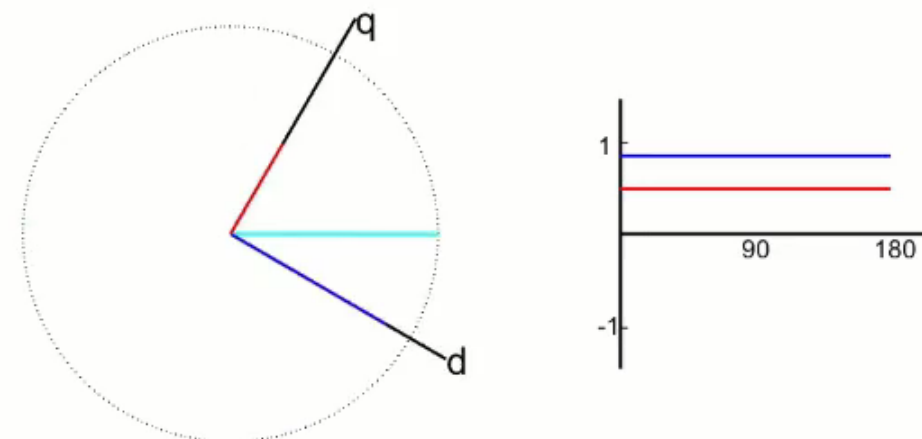
- Složky třífázového systému



- Transformace Clarkové



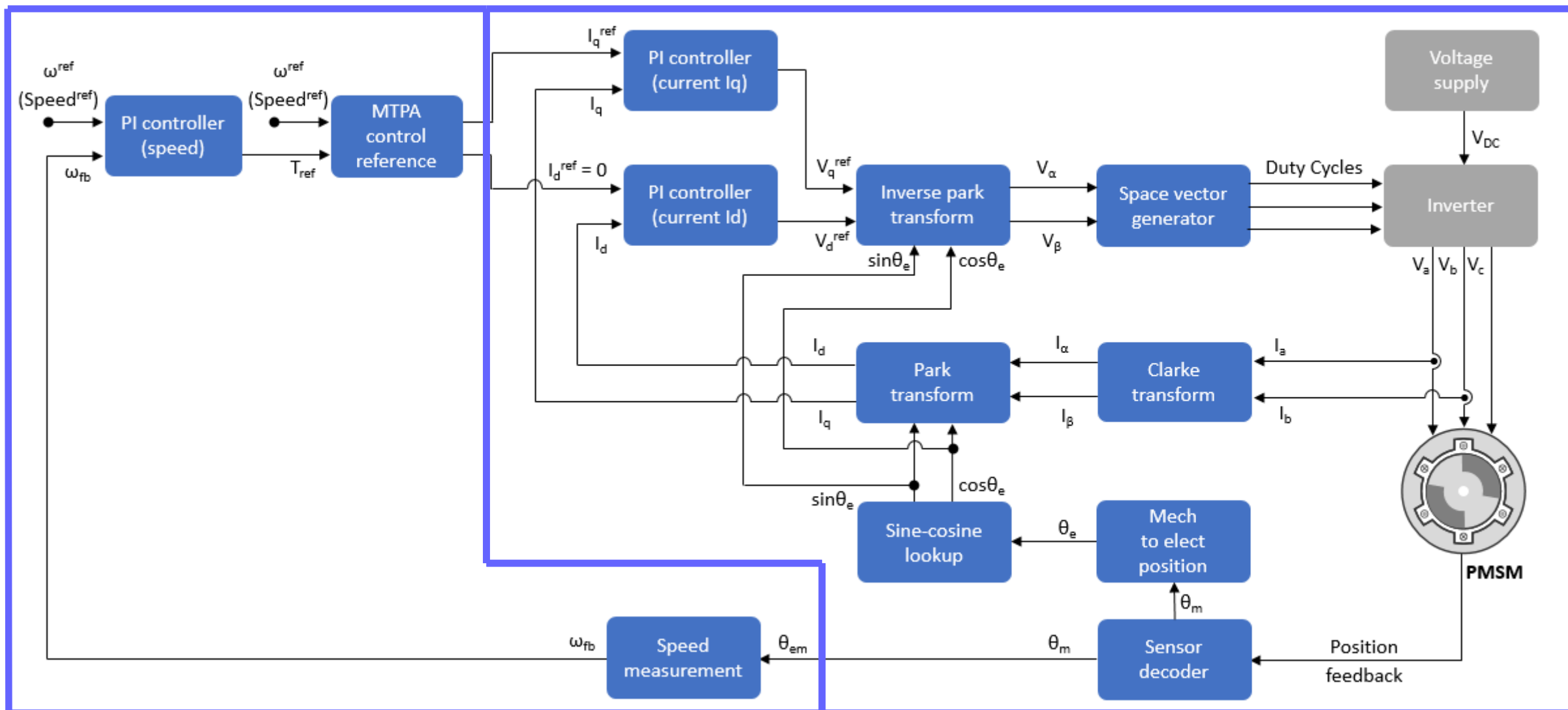
- Transformace Parkova



Field-Oriented Control – schéma zapojení

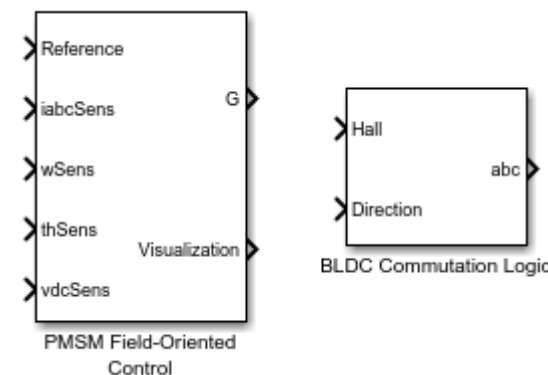
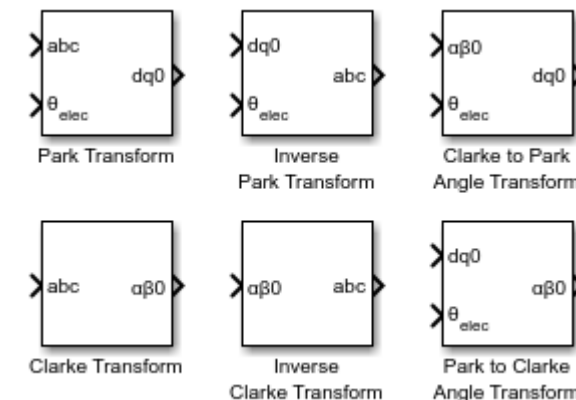
řízení rychlosti

řízení proudů



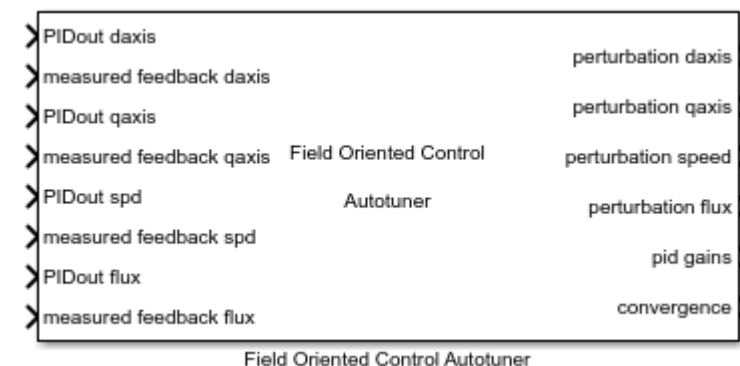
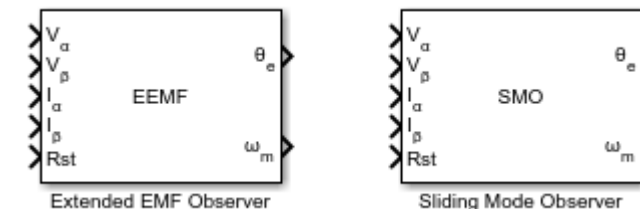
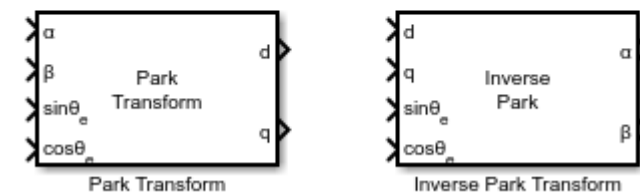
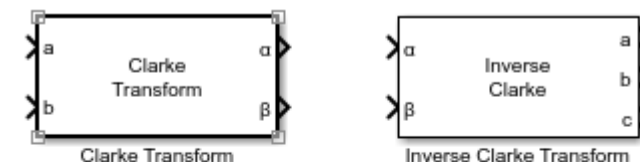
Návrh řízení pohonu v prostředí Simulink

- 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



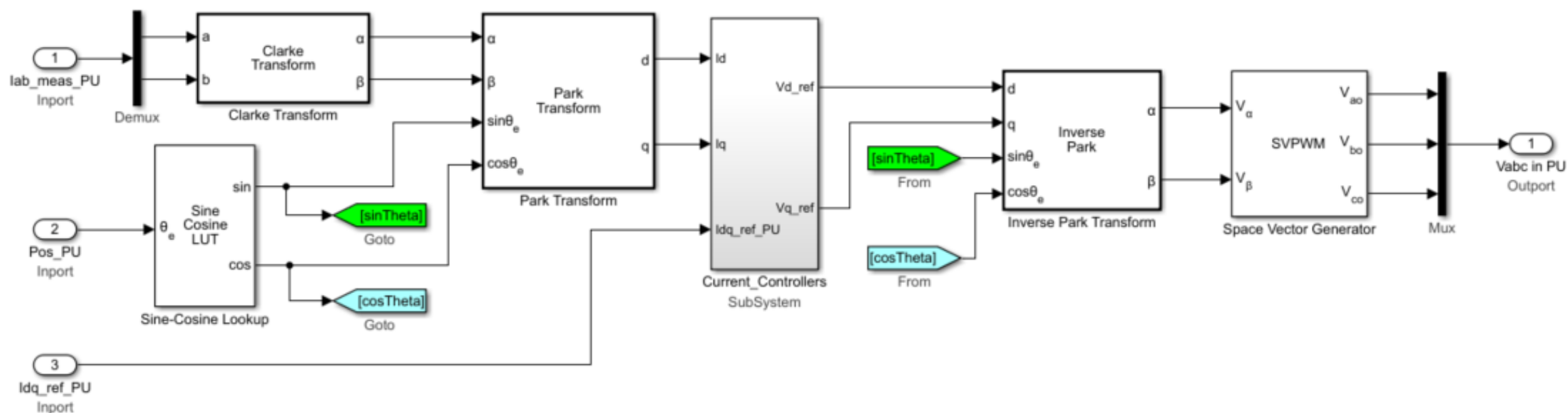
Návrh řízení pohonu v prostředí Simulink

- 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

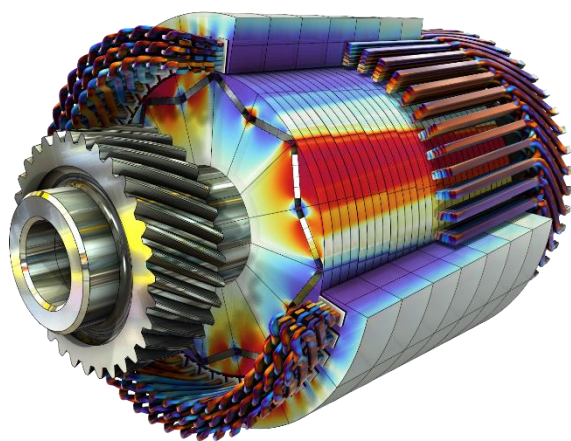
- Příklad zapojení FOC řízení
- Bloky z knihovny Motor Control Blockset



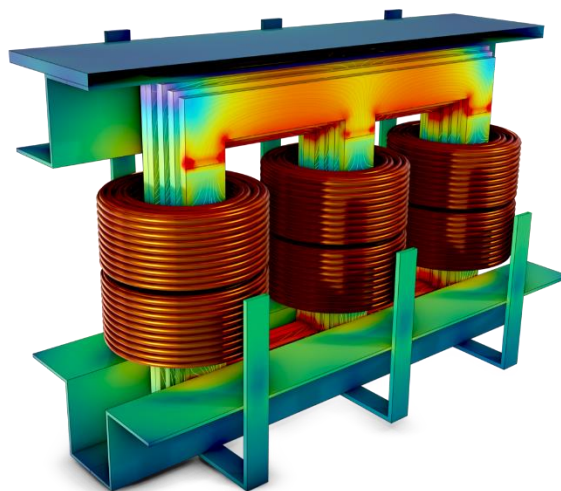
FEM simulace v COMSOL Multiphysics

- Příklady využití FEM v oblasti elektrických pohonů a výkonové elektroniky

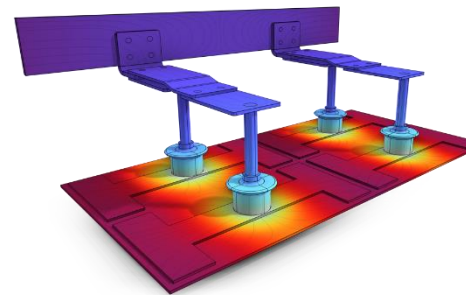
Simulace elektromotoru



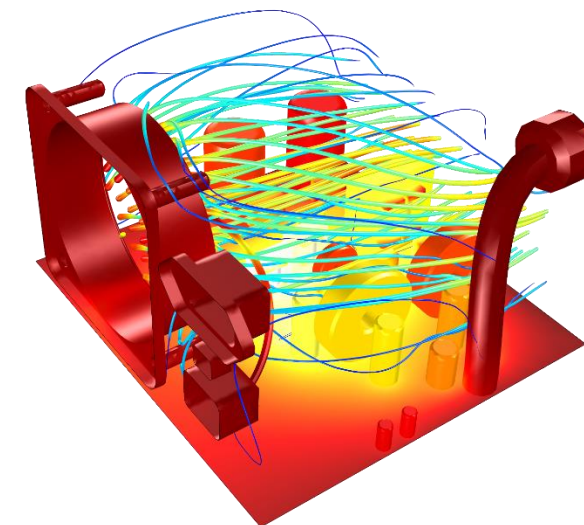
Simulace transformátoru
(vč. například hučení)



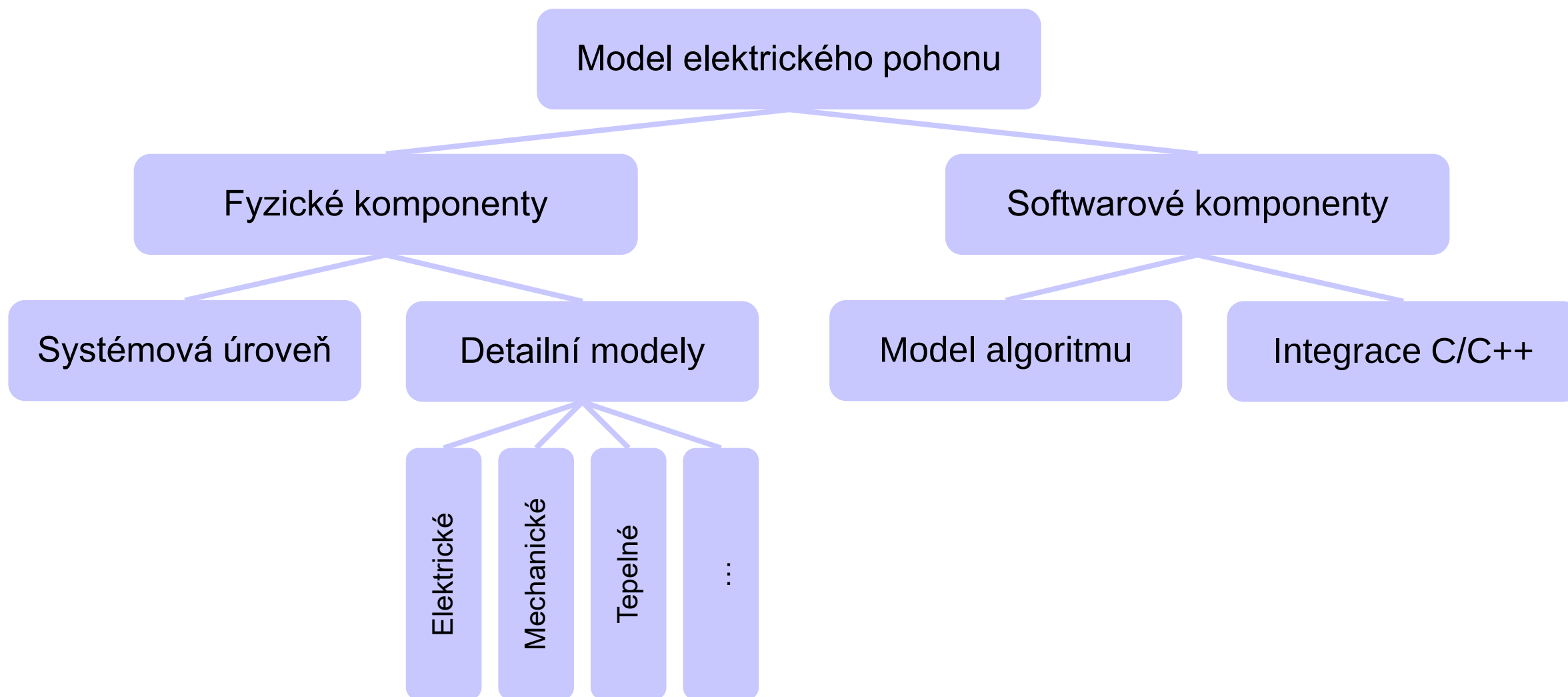
Simulace svorkovnice



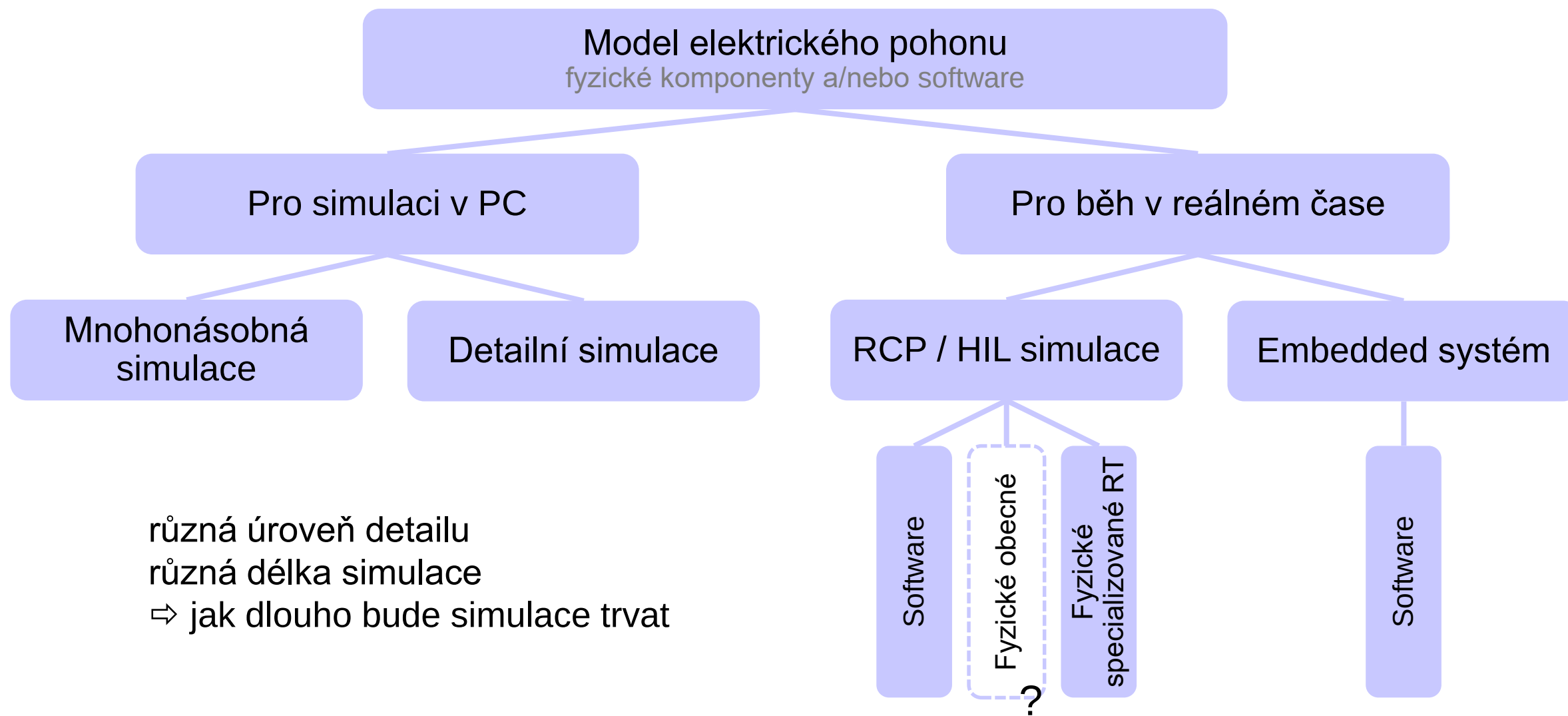
Simulace chlazení
elektroniky



Modelování elektrického pohonu z hlediska komponent



Modelování elektrického pohonu z hlediska simulace/nasazení

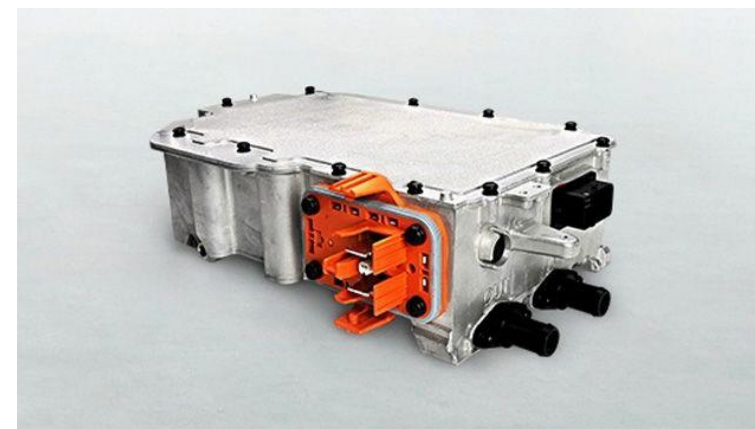


Uživatelská reference

LG Electronics Develops ISO 26262–Compliant Power Inverter Control Software with Model-Based Design

Automotive manufacturers are increasingly asking tier-one suppliers to deliver components developed in compliance with ISO 26262, the international functional safety standard for road vehicles. This standard covers functional safety aspects of the complete development process, including design, implementation, and verification. Many manufacturers also want their suppliers to comply with AUTOSAR standards for ECU software architectures.

LG Electronics develops ISO 26262– and AUTOSAR-compliant software for the inverter systems used to drive electric and hybrid vehicle motors using Model-Based Design with MATLAB® and Simulink®.



[Více informací zde](#)

Další informace

- Video-série z cyklu 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>

Děkuji za pozornost.

Otázky?