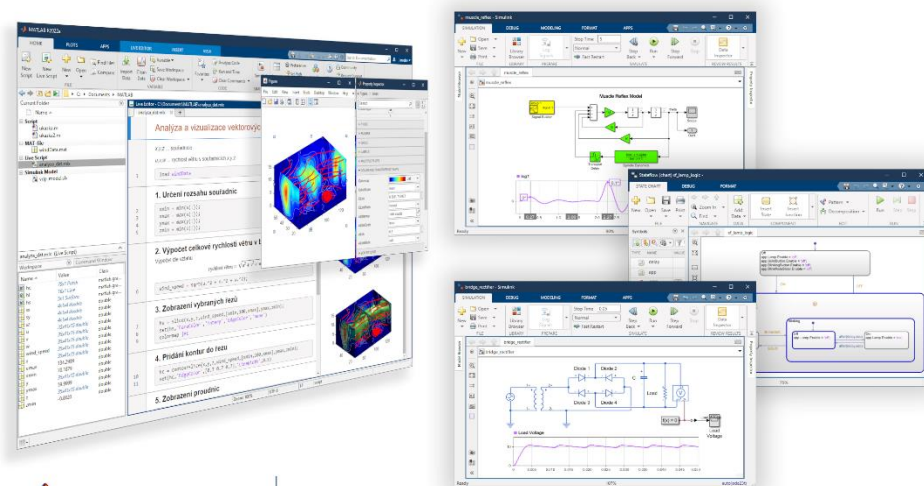


7.9.2023 Technical Computing Camp 2023

Návrh a implementace pokročilých řídicích systémů

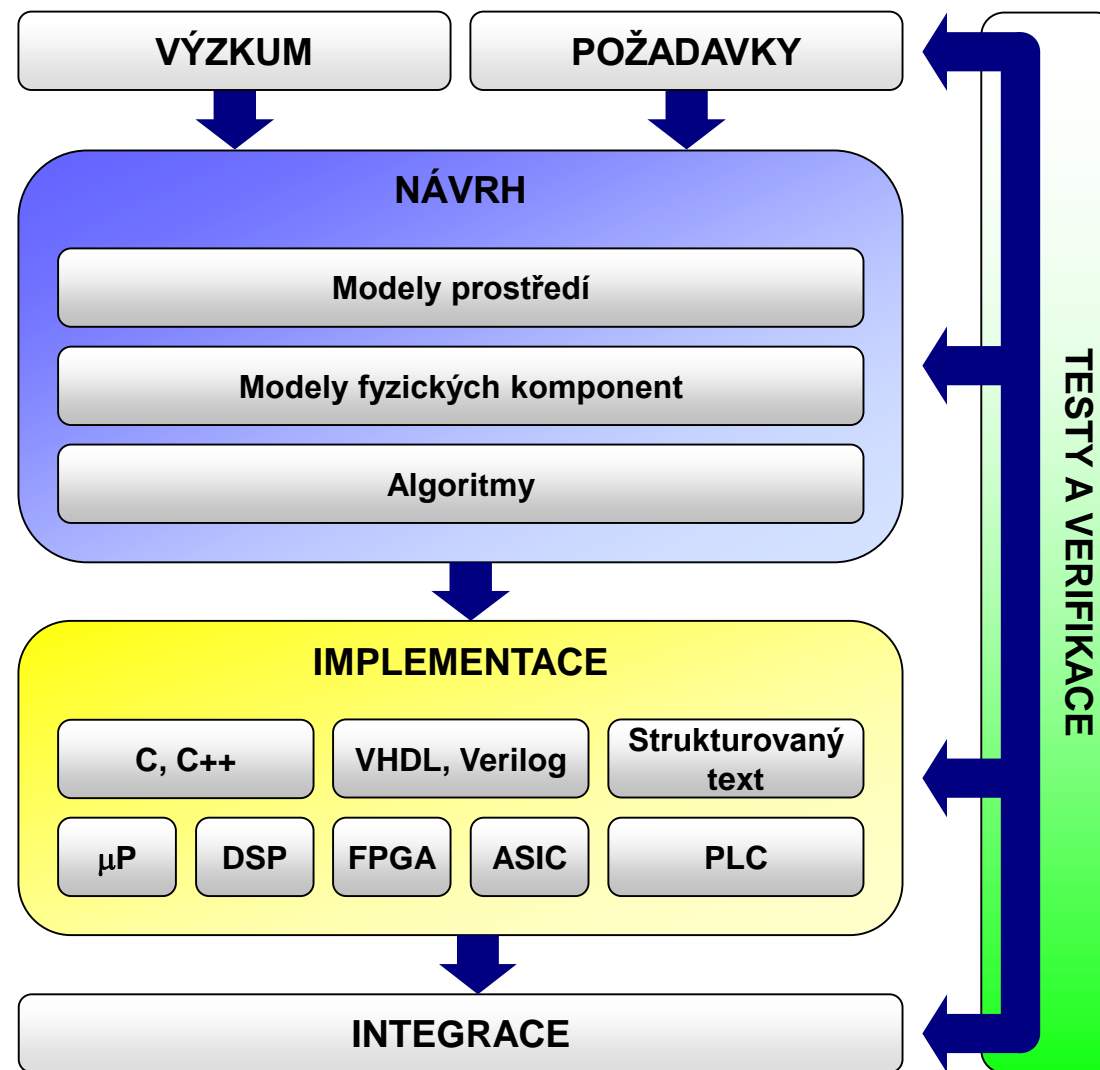


Jaroslav Jirkovský
jirkovsky@humusoft.cz

www.humusoft.cz
info@humusoft.cz

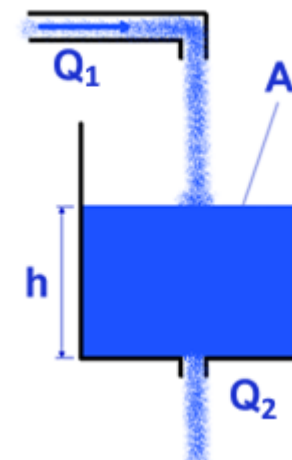
www.mathworks.com

Vývoj metodou Model-Based Design

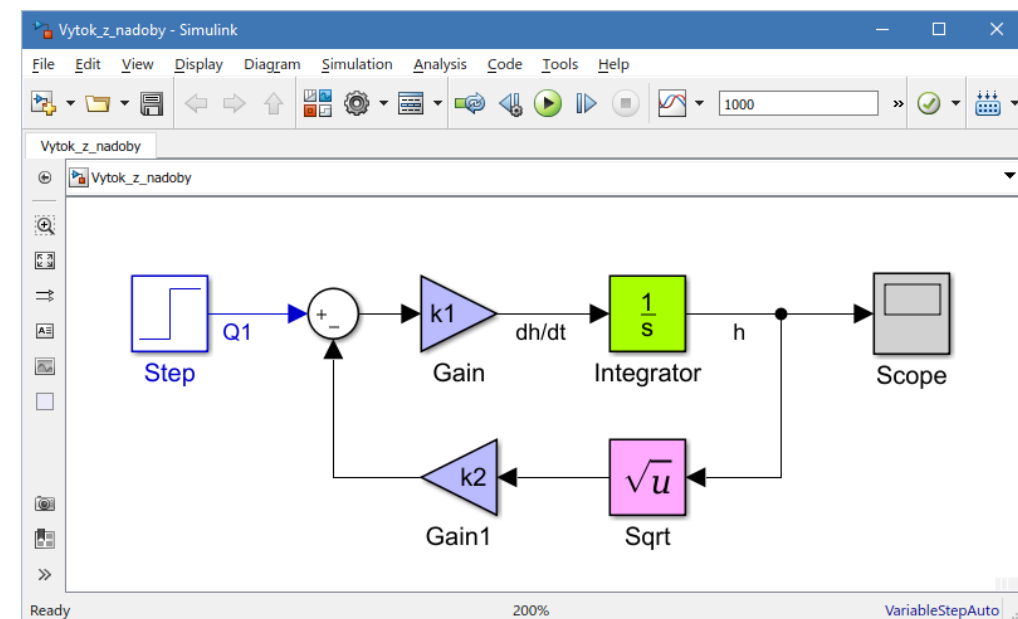


Matematické modelování soustav

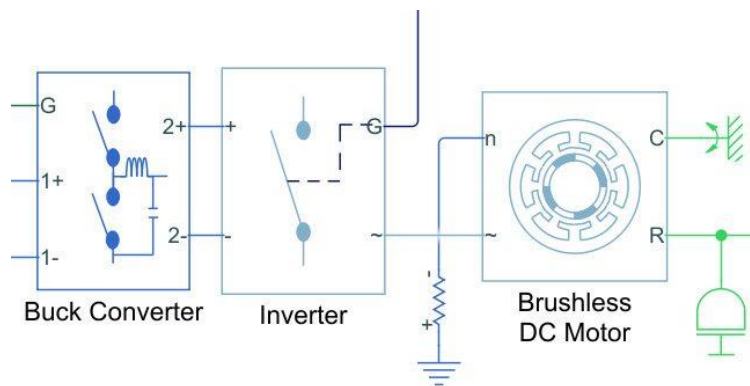
- Popis matematickými rovnicemi
 - matematicko-fyzikální analýza
 - identifikace soustavy z naměřených dat
- Bloková schémata
- Knihovny bloků
 - spojité i diskrétní systémy
 - matematické funkce, nelinearity
 - vstupní signály, grafické výstupy
- Simulink



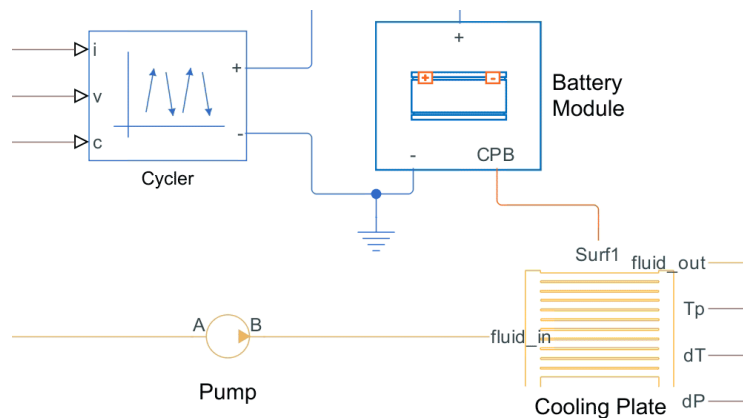
$$\frac{dh}{dt} = k_1(Q_1 - k_2\sqrt{h})$$



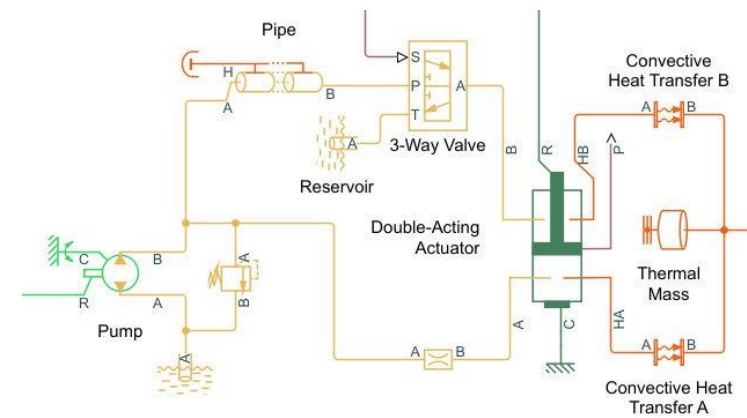
Fyzikální modelování soustav



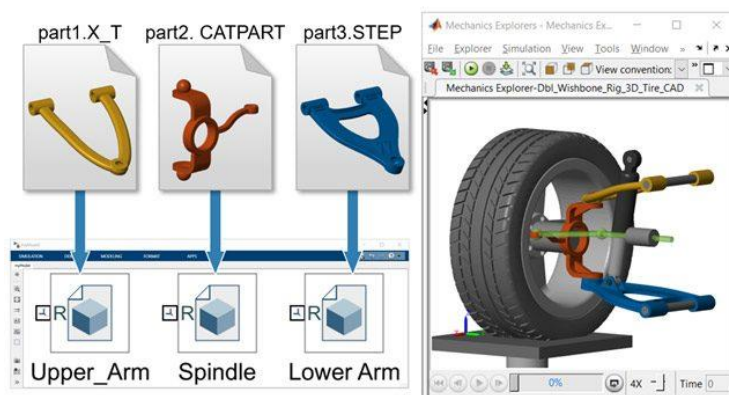
Simscape Electrical



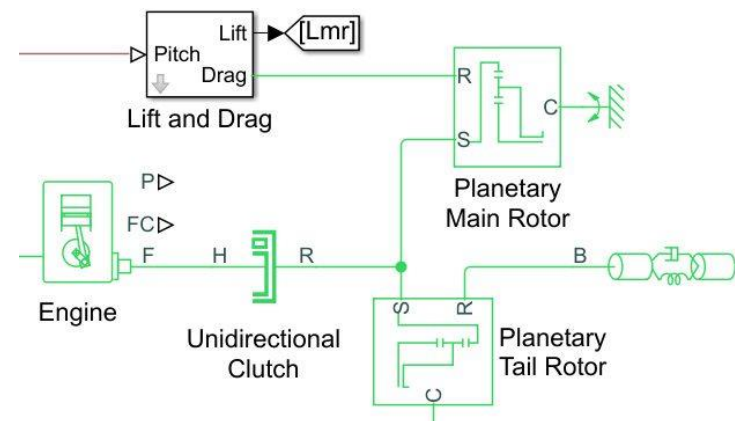
Simscape Battery



Simscape Fluids

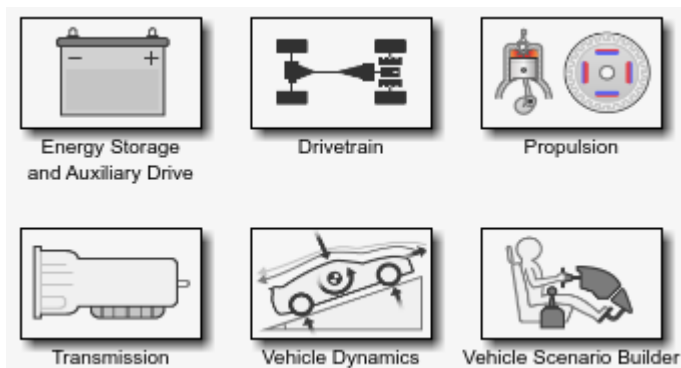


Simscape Multibody

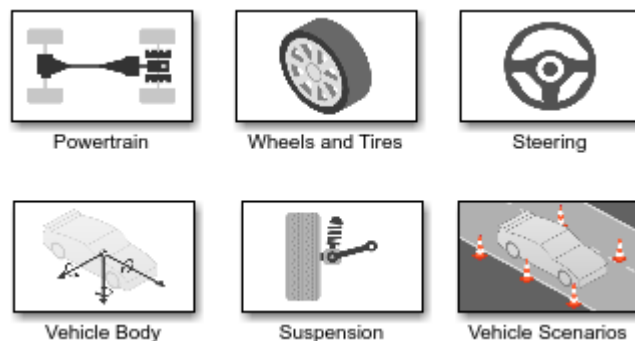


Simscape Driveline

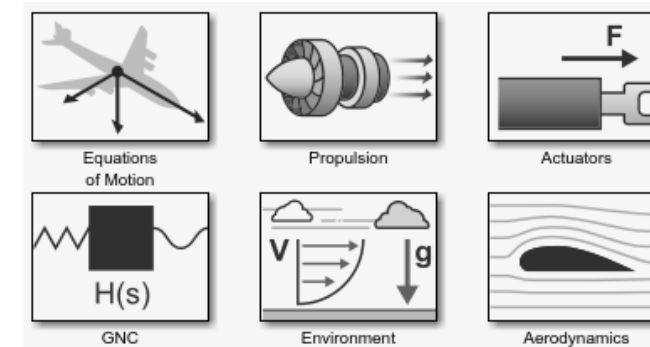
Knihovny pro specifické aplikace



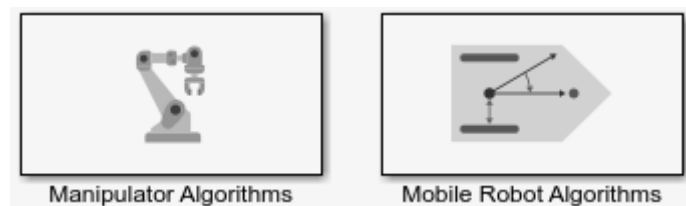
Powertrain Blockset



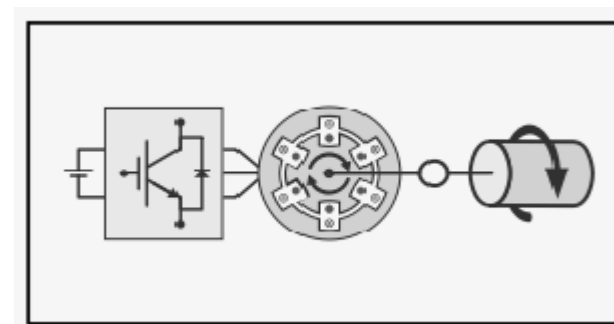
Vehicle Dynamics Blockset



Aerospace Blockset

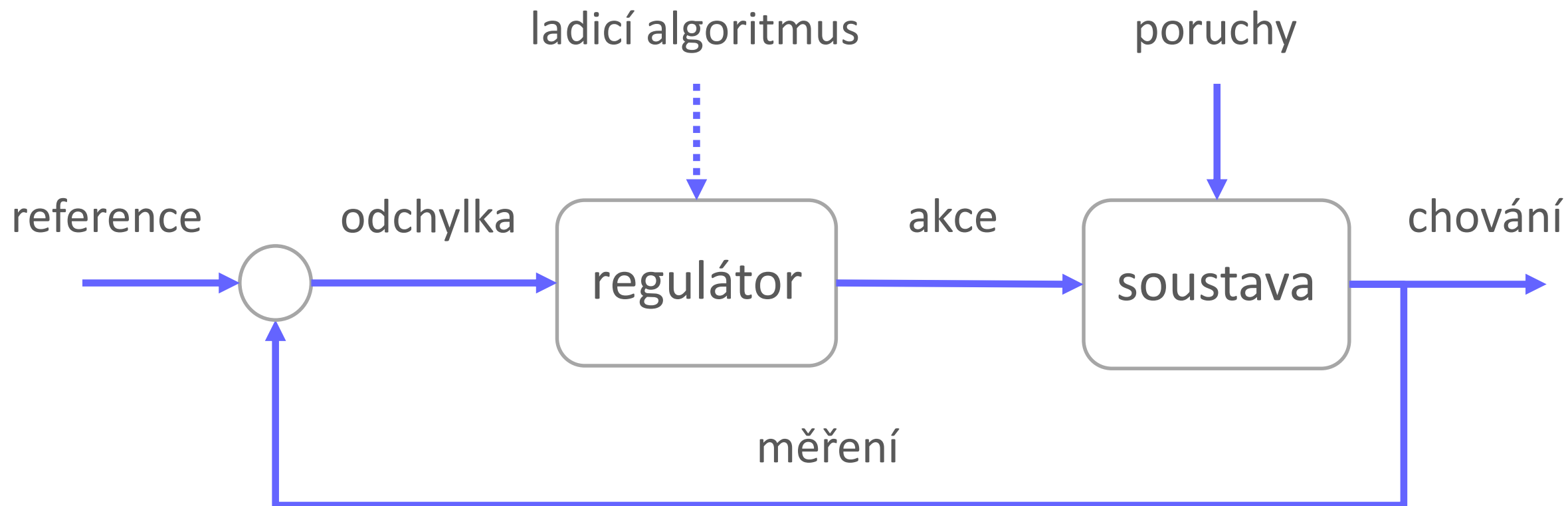


Robotics System Toolbox

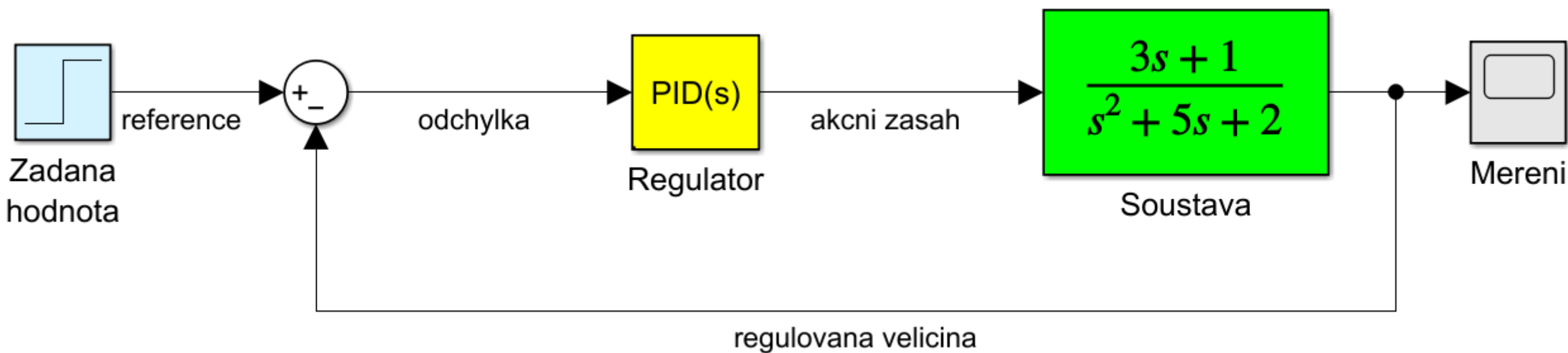


Motor Control Blockset

Základní schéma řídicího systému

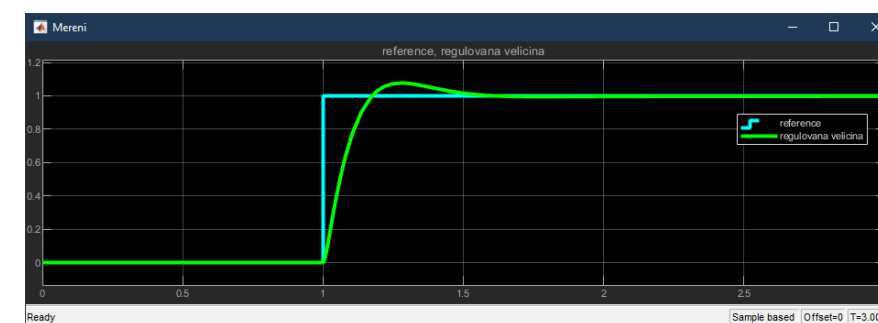
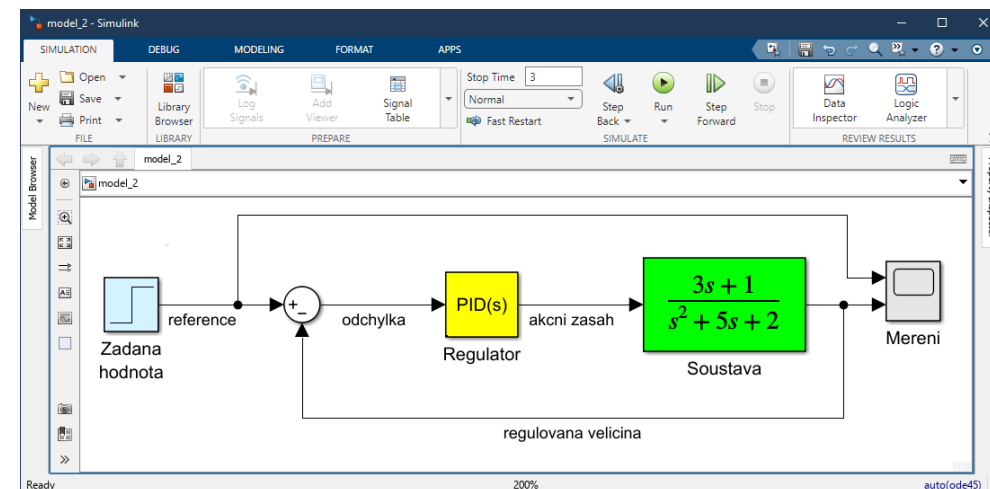


Základní schéma řídicího systému – Simulink



Modelování řídicích systémů

- Propojení modelů soustav s regulátory
 - libovolná architektura řídicích systému
- Návrh a modelování regulátorů
 - spojité, diskrétní, stavové
 - blok PID regulátoru v mnoha variantách
 - vlastní regulátory ze základních prvků
- Spojité a diskrétní prvky v jednom modelu
- Bohaté knihovny vstupních signálů
- Nástroje pro ladění řídicích systémů



Ladění řídicích systémů

- Ladění na základě linearizace

- „know-how“ lineární teorie regulace
 - stabilita systému, metriky, metody ladění
- SISO, MIMO
- ladění v časové i frekvenční oblasti
- metody pro robustní návrh
- není závislé na konkrétním experimentu
- rychlost

- omezeno platností lineárního modelu
- nutno ověřit s nelineárním modelem

- Ladění na základě optimalizace

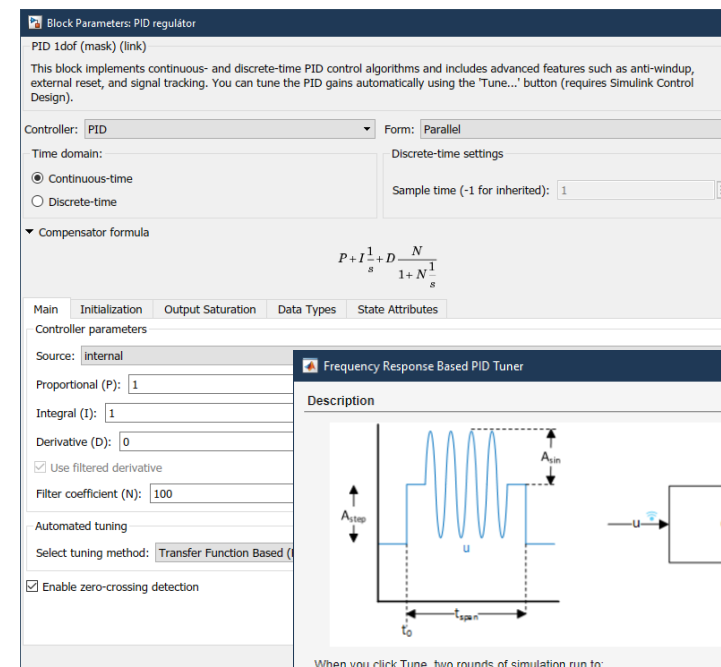
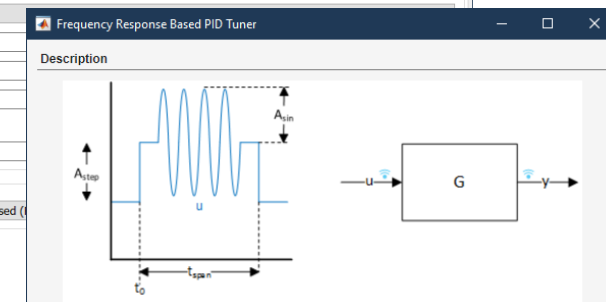
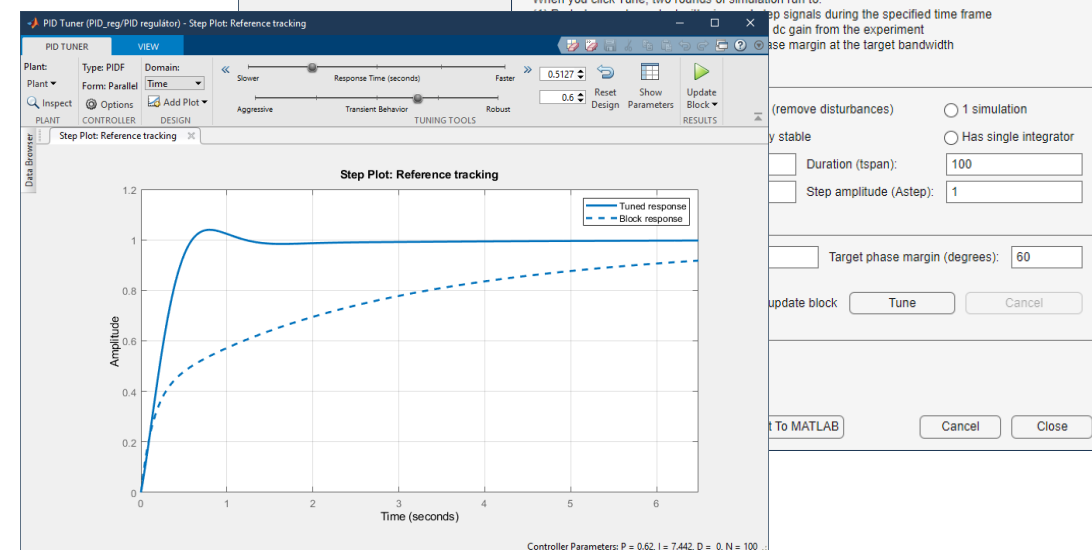
- pracuje s nelineárním modelem
 - optimalizace chování na nonlinearity
- SISO, MIMO
- libovolná uživatelská kritéria

- závislé na konkrétním experimentu
- nejsou k dispozici analytické závěry
- výpočetně náročné

- Možná kombinace obou přístupů

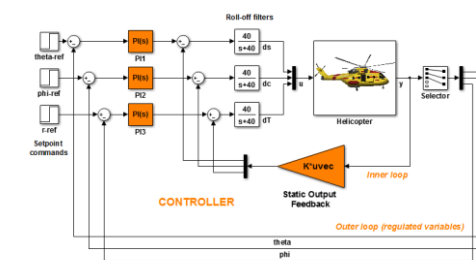
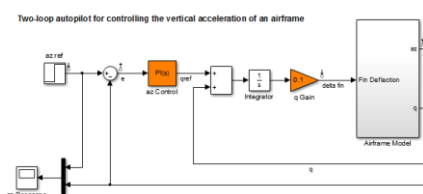
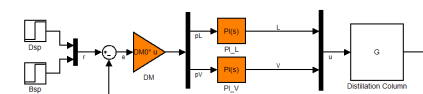
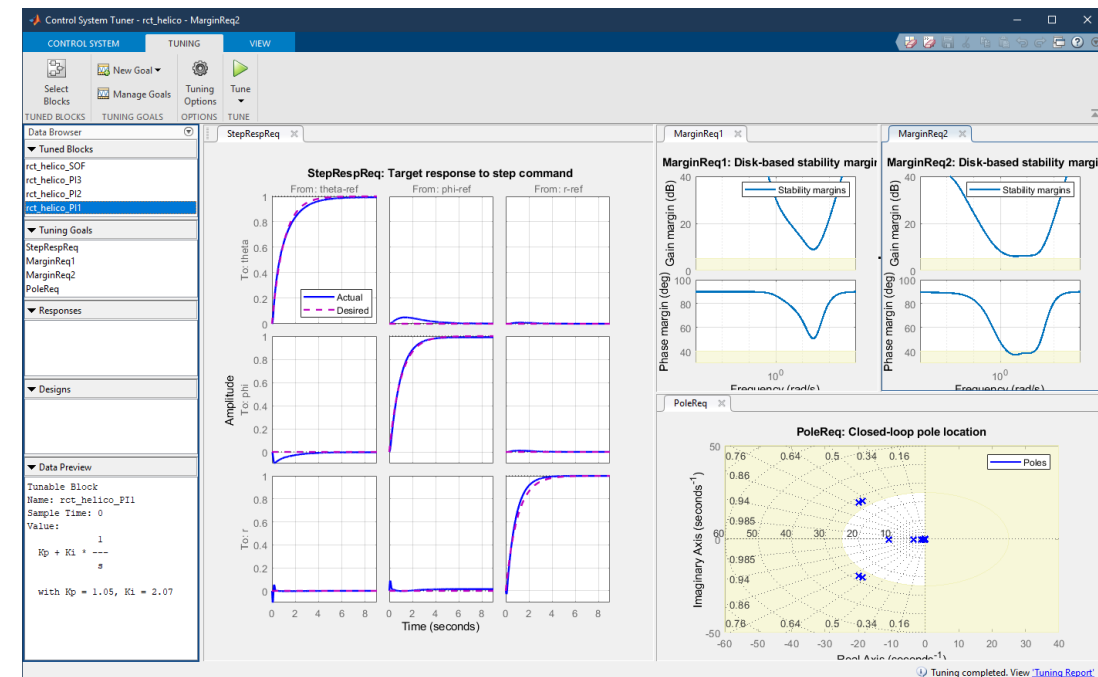
Ladění PID regulace

- Pro jednosmyčkovou PID regulaci
 - více smyček lze ladit jednu po druhé
- Využívá linearizaci soustavy
 - možná volba pracovního bodu
- Grafická aplikace *PID Tuner*
 - ladění na základě přechodové odezvy
- *Frequency Response Based PID Tuner*
 - pro soustavy, které nelze linearizovat

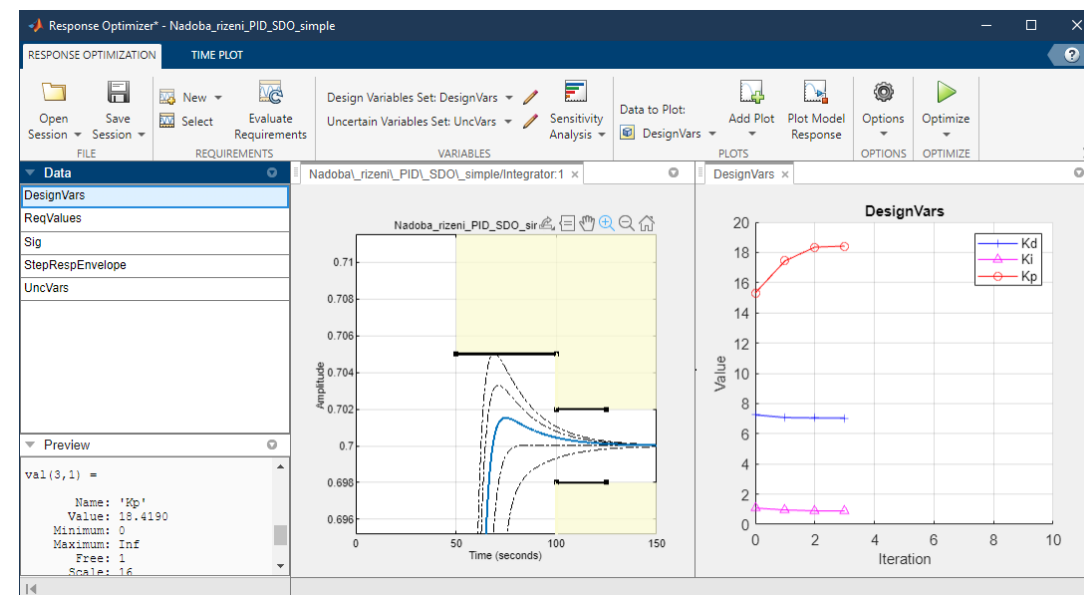
Ladění systémů s více vstupy a výstupy (MIMO)

- Libovolná struktura řídicího systému
 - společné ladění všech prvků
 - linearizace modelu a nehladká optimalizace
- Knihovna nastavitelných kritérií
 - v časové i frekvenční oblasti
 - kritéria stability
- Grafická aplikace
 - Control System Tuner



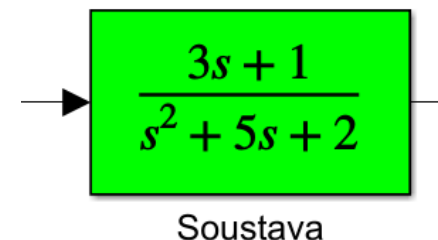
Ladění na základě optimalizace

- Využívá nelineární model v Simulinku
 - nastavení podmínek pro zvolené signály
- Libovolná struktura řídicího systému
 - výběr parametrů pro optimalizaci
- Různé optimalizační algoritmy
- Podpora paralelních výpočtů
- Grafická aplikace
 - Response Optimizer



Robustní ladění řídicích systémů

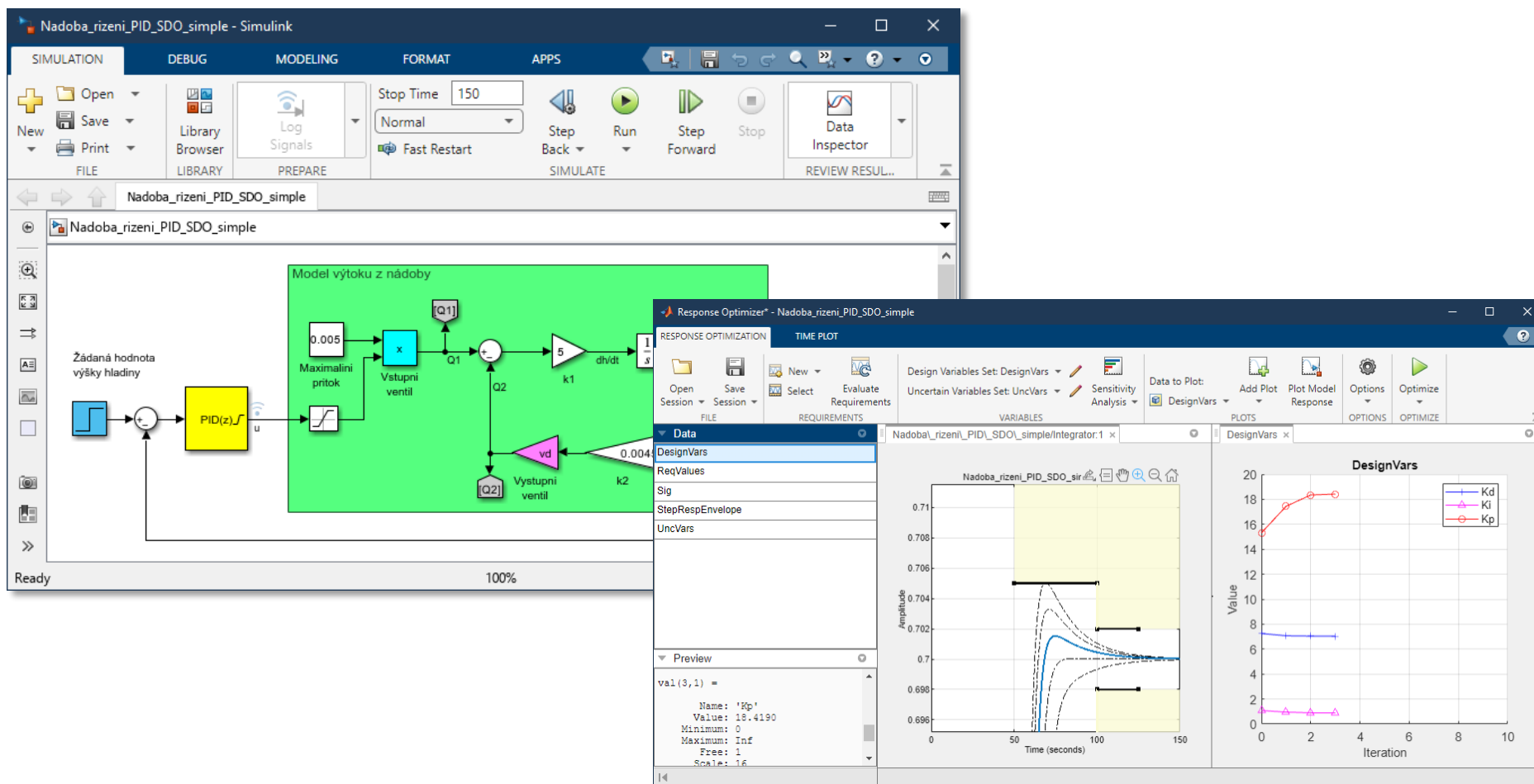
- Model soustavy není přesný
 - aproximace při modelování
 - neznámě vlivy (poruchy)
 - změny v dynamice
- Úkol: aby regulátor fungoval dobře i za těchto podmínek
- Ladění se zahrnutím vlivu nejistých parametrů
 - ladění na základě optimalizace – *Responce Optimizer*
 - ladění na základě linearizace – *Control System Tuner*
- Analýza robustnosti a metody pro robustní návrh řídicího systému
 - Robust Control Toolbox



\neq



Ukázka: Ladění se zahrnutím vlivu nejistých parametrů



Adaptivní řídicí systémy

- Cílem je přizpůsobení se změnám soustavy
 - nepředvídané vlivy okolí
 - poruchy
 - změna dynamiky
- Ladění PID za běhu systému
 - bloky Open-Loop PID Autotuner, Closed-Loop PID Autotuner
- Speciální metody
 - Extremum Seeking Control
 - Model Reference Adaptive Control
 - Active Disturbance Rejection Control

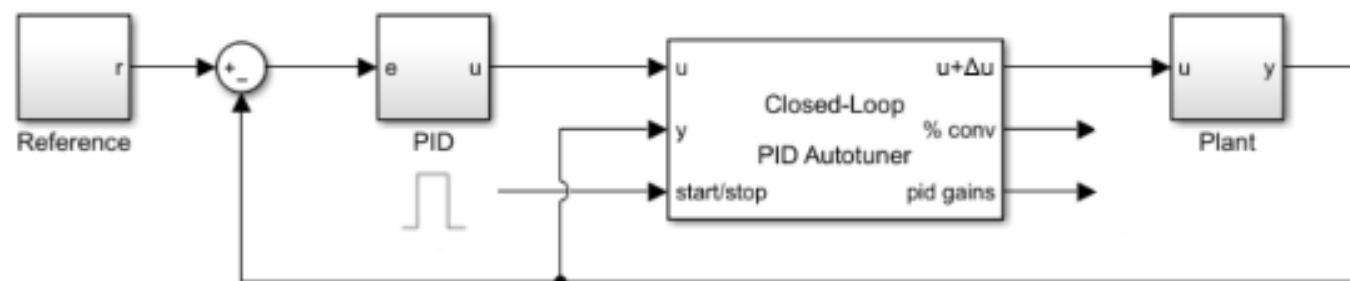
Adaptivní řídicí systémy

- Adaptivní řídicí systémy mohou řešit náročné problémy nelineárního řízení, které jsou pro tradiční techniky obtížně řešitelné

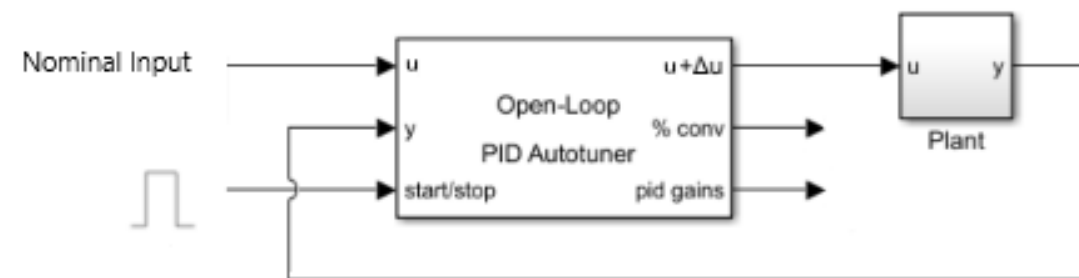


Ladění PID za běhu systému

- Automatické ladění PID v reálném čase
 - na základě experimentálního odhadu frekvenční odezvy soustavy
- Experiment v uzavřené smyčce
 - blok Closed-Loop PID Autotuner

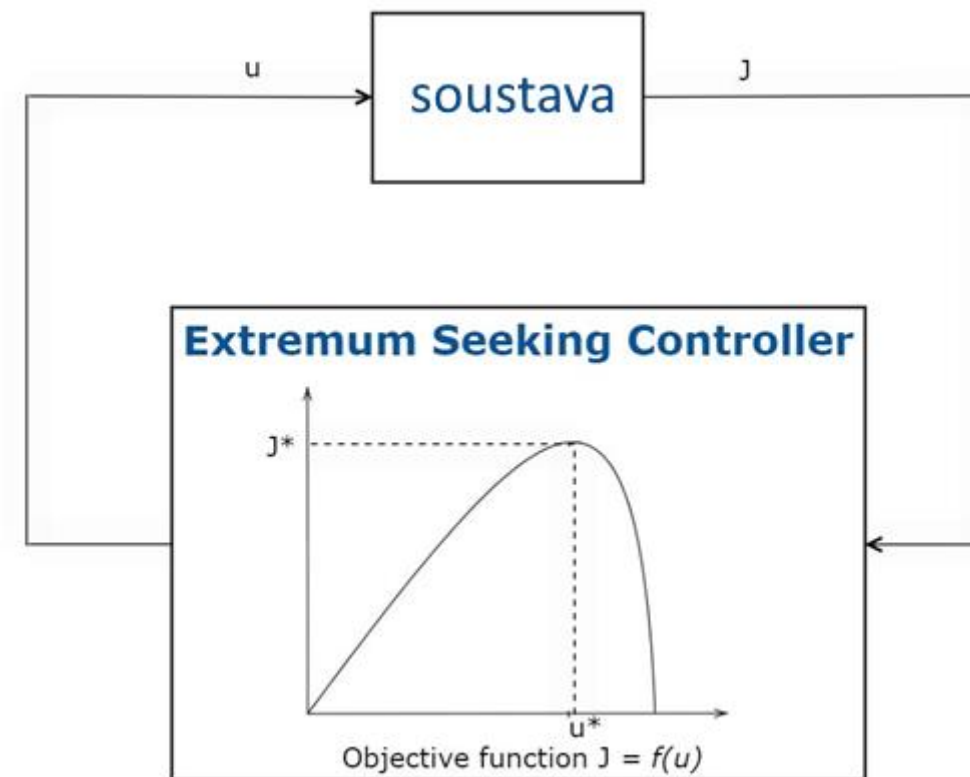


- Experiment v otevřené smyčce
 - blok Open-Loop PID Autotuner



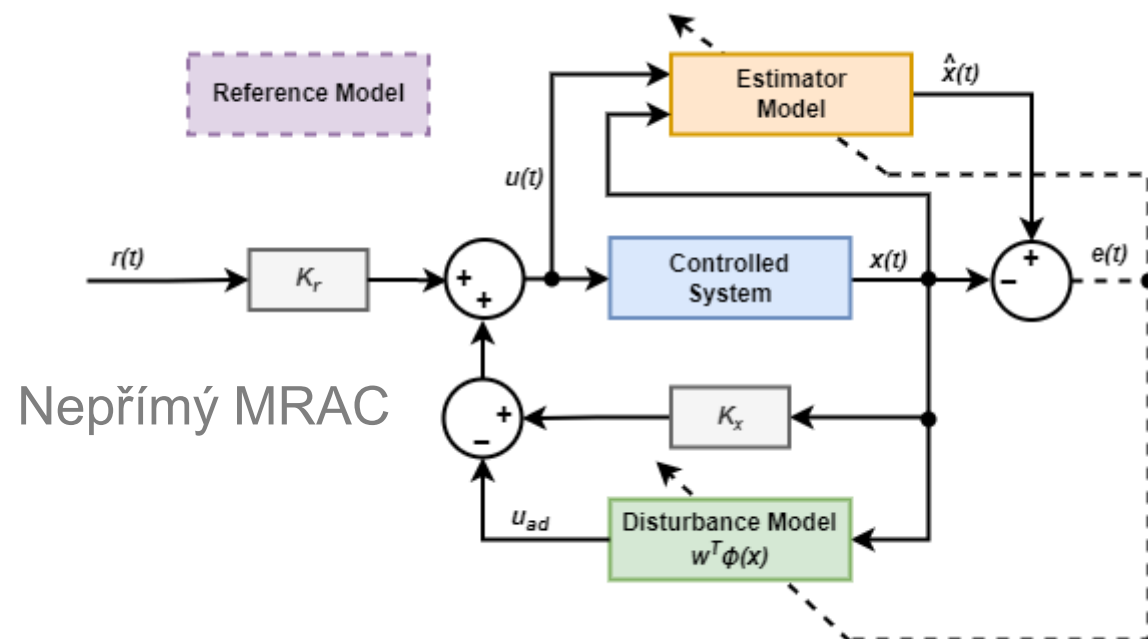
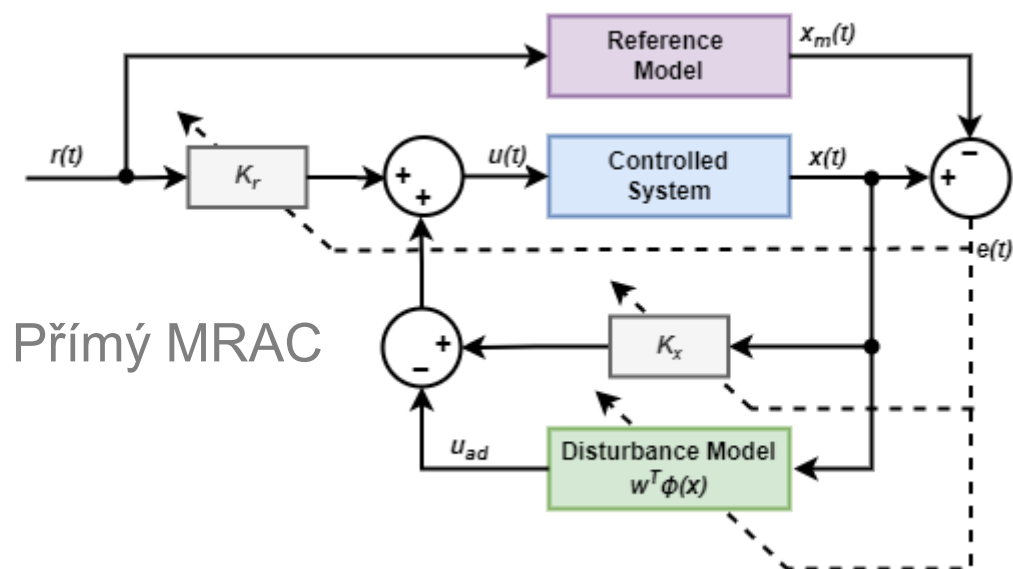
Speciální metody pro adaptivní řídicí systémy

- Extremum Seeking Control
 - optimální řízení soustav se změnami chování



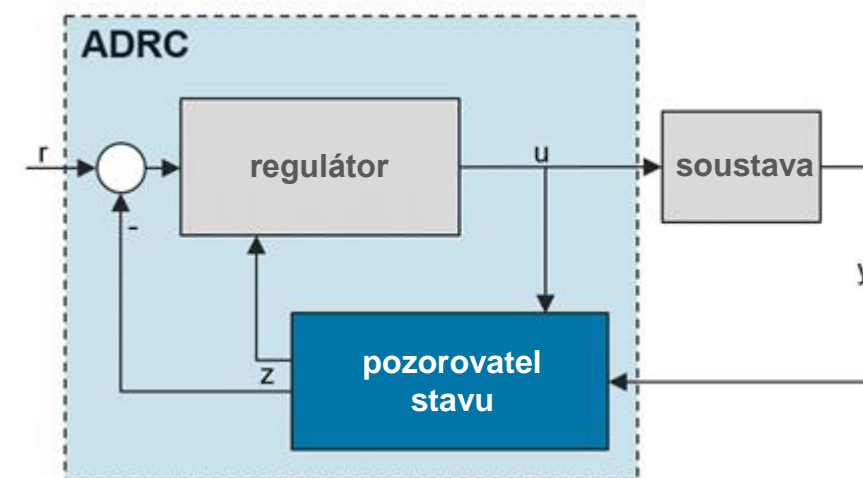
Speciální metody pro adaptivní řídicí systémy

- Extremum Seeking Control
 - optimální řízení soustav se změnami chování
- Model Reference Adaptive Control
 - umožní řízení systémů v případě neočekávaných změn

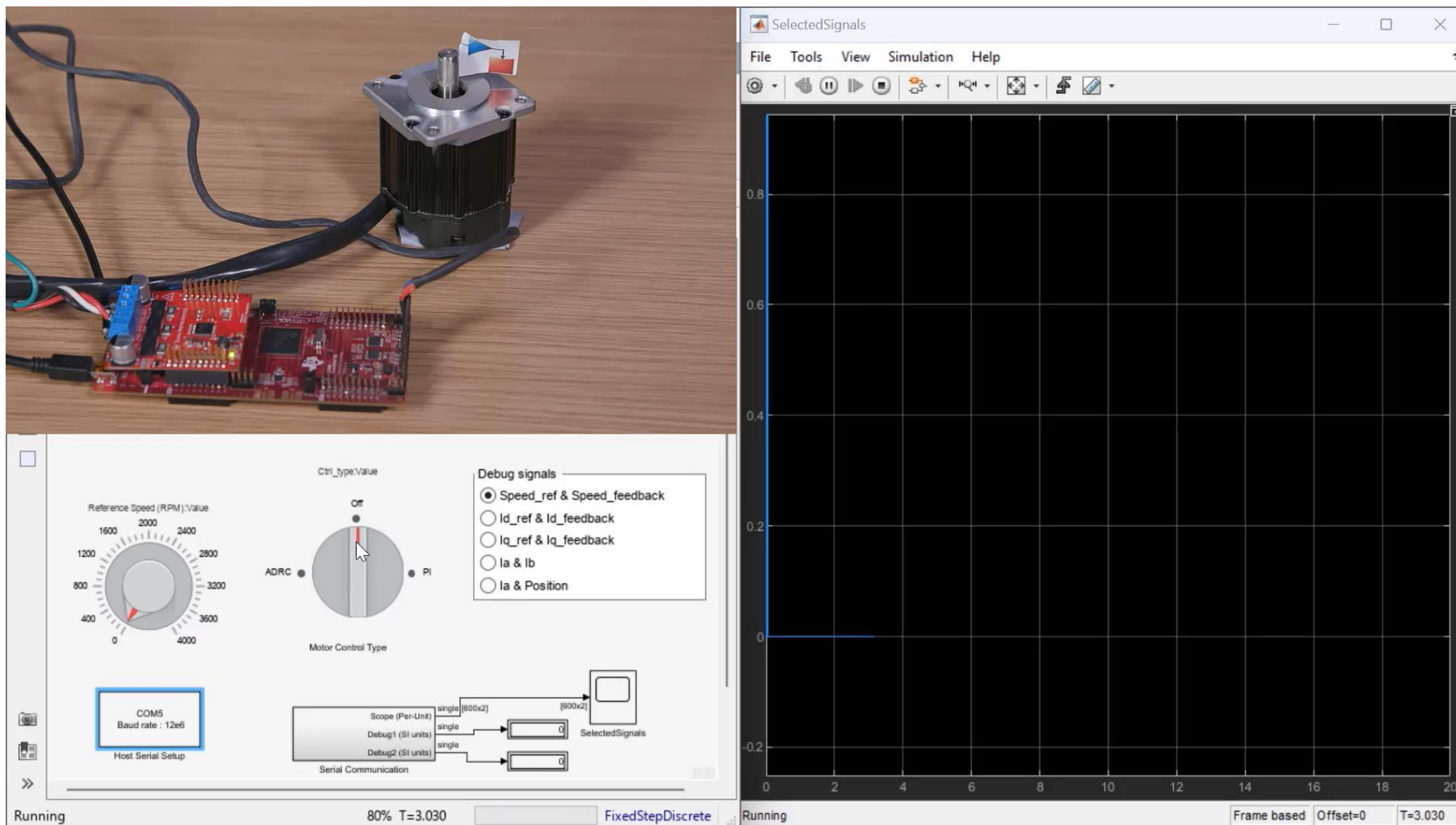


Speciální metody pro adaptivní řídicí systémy

- Extremum Seeking Control
 - optimální řízení soustav se změnami chování
- Model Reference Adaptive Control
 - umožní řízení systémů v případě neočekávaných změn
- Active Disturbance Rejection Control
 - řízení soustav s neznámou dynamikou a vnitřními a vnějšími poruchami
 - může sloužit jako alternativa PID regulace

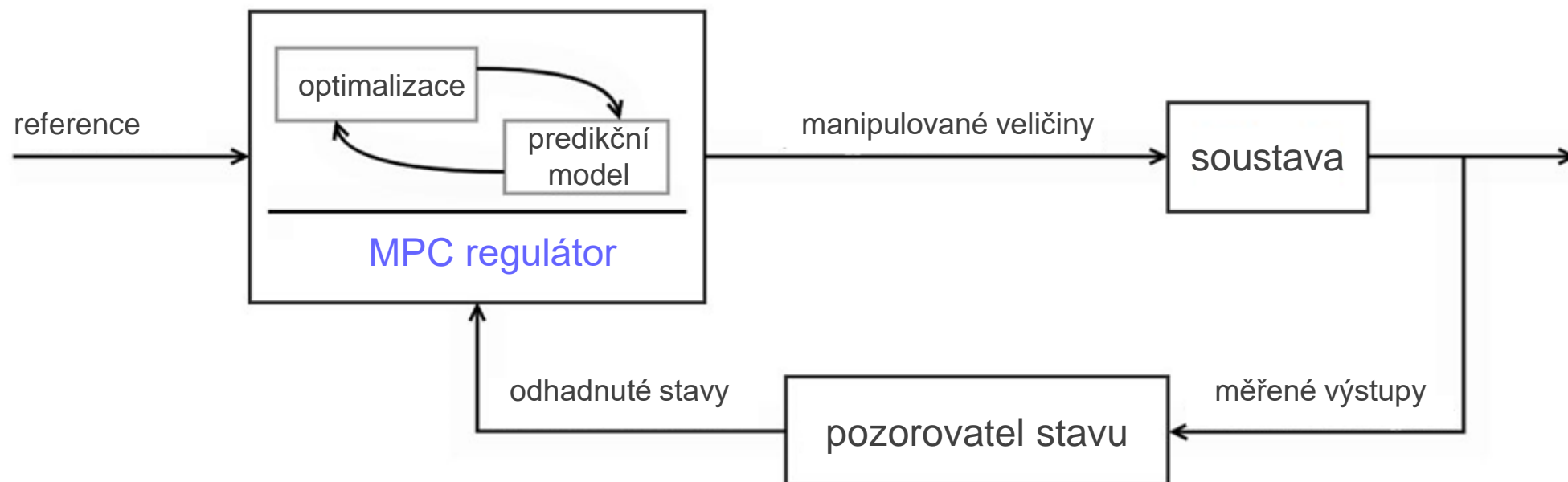


Ukázka: Využití ADRC pro řízení pohonu



Model Predictive Control (MPC)

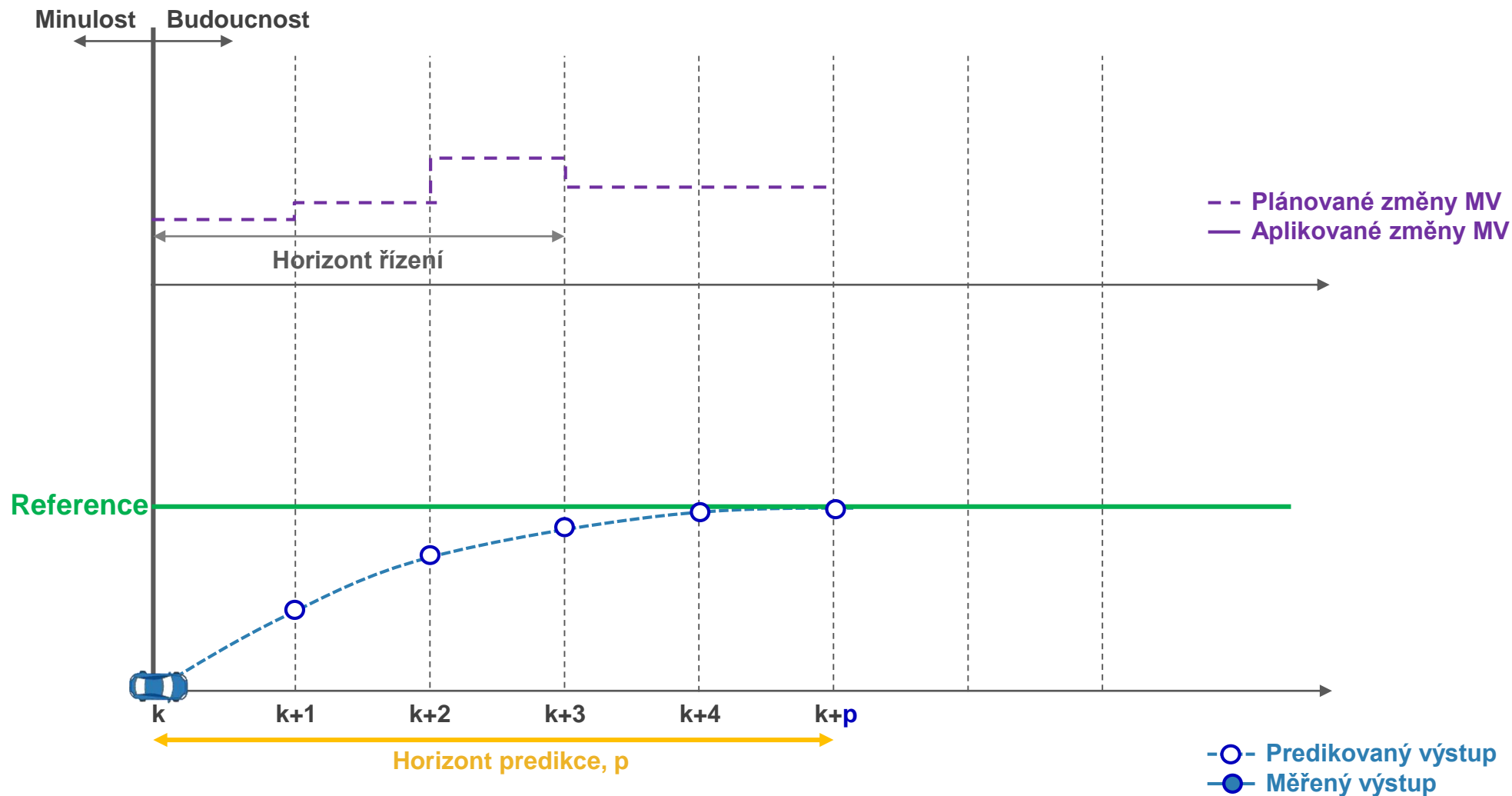
- Prediktivní řízení založené na modelu systému a optimalizaci v reálném čase
 - minimalizace účelové funkce MIMO systému podmíněná omezeními na vstupech a výstupech



- Model Predictive Control Toolbox

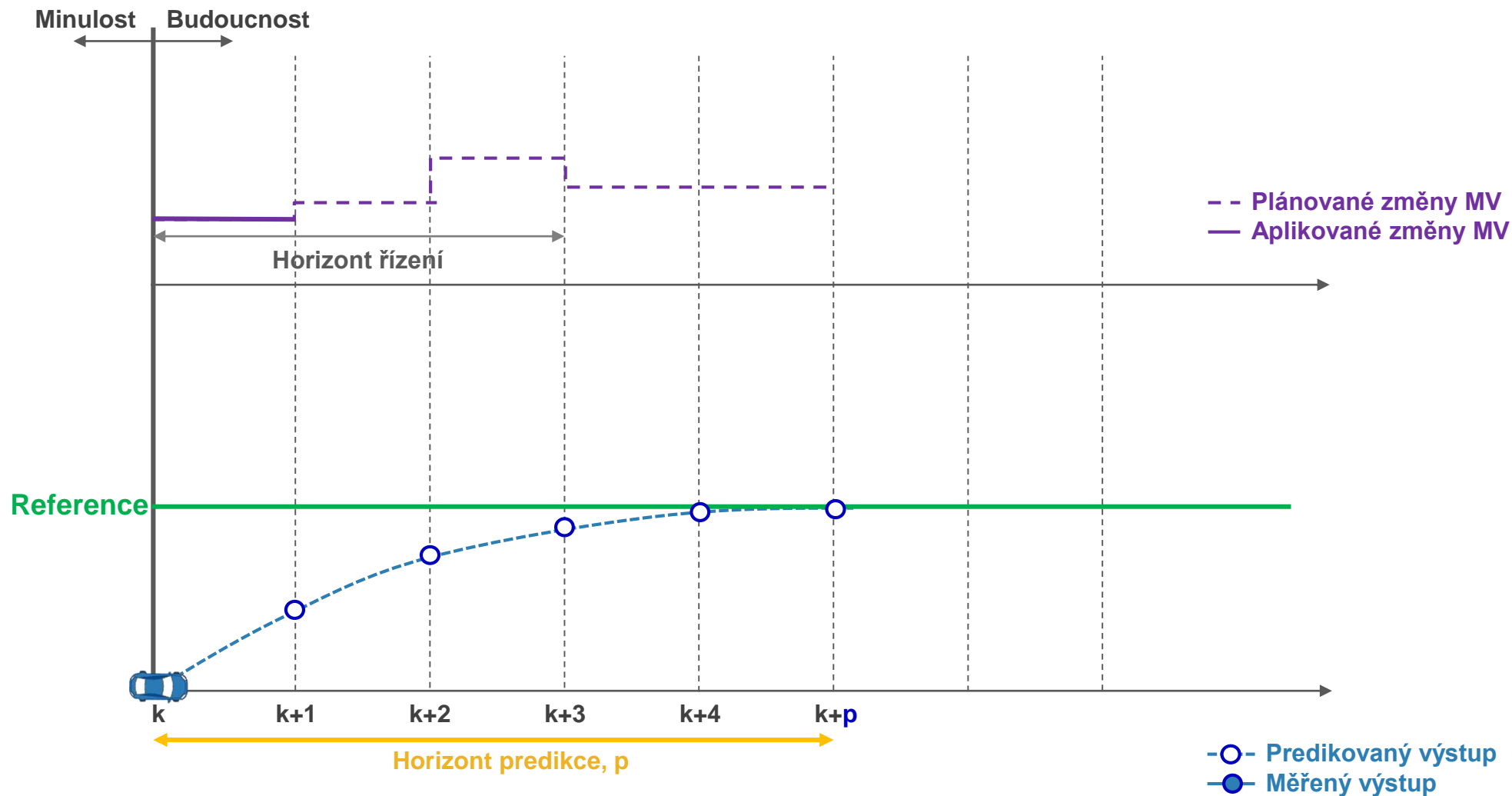
Jak MPC funguje

- Řeší optimalizační úlohu v kroku k



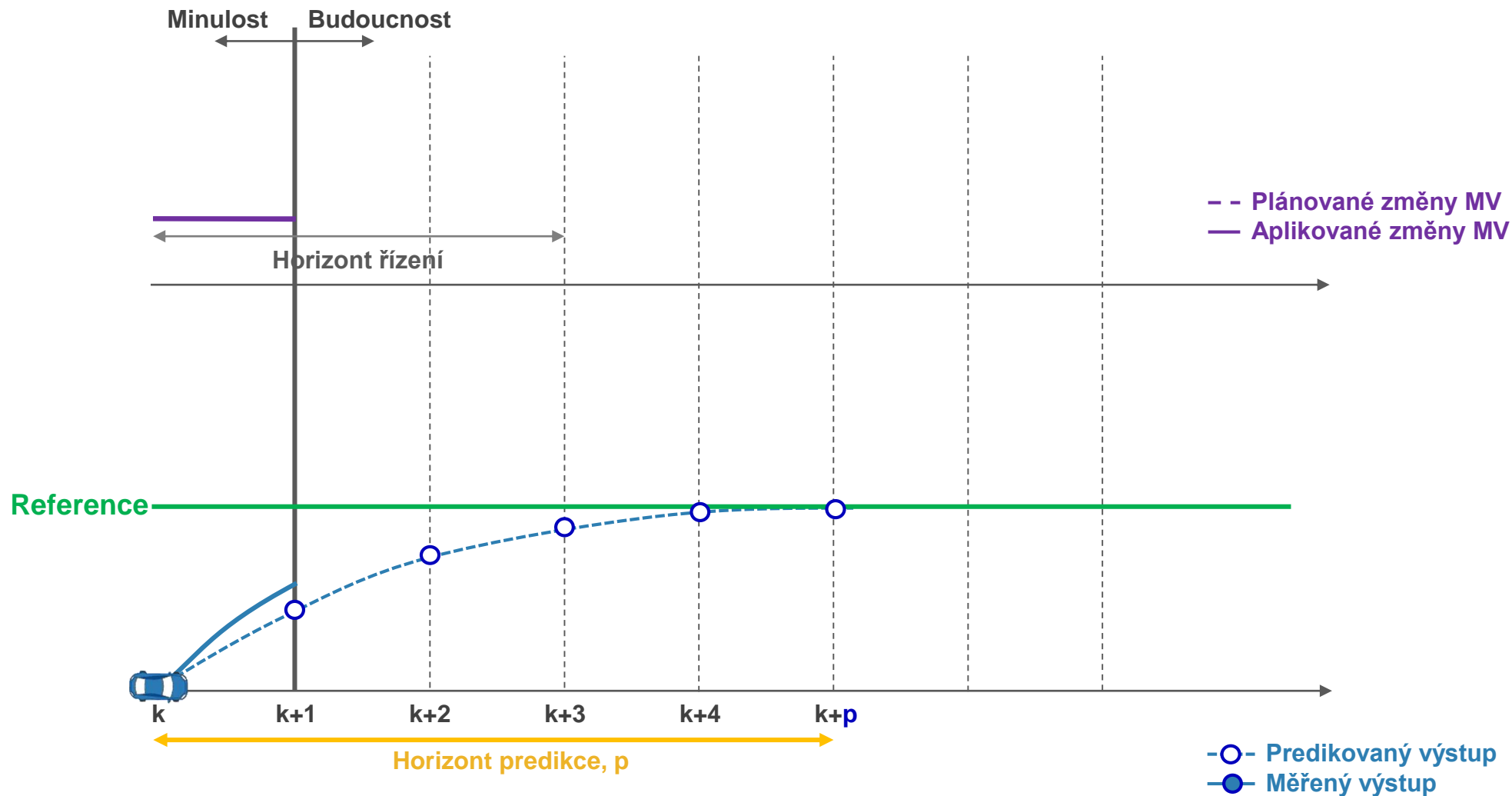
Jak MPC funguje

- Proveďte první krok řízení (otevřená smyčka), vyřadí zbytek



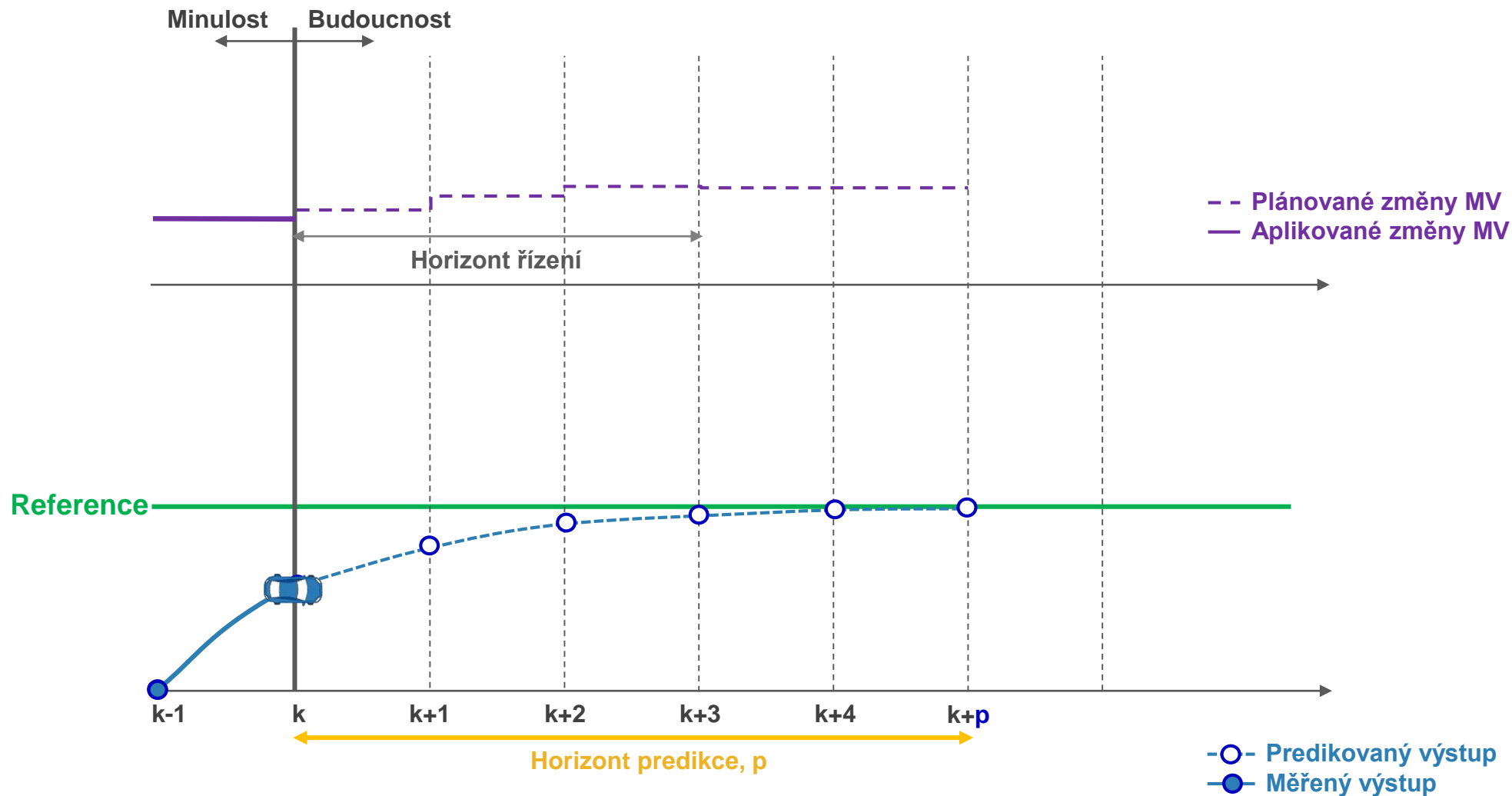
Jak MPC funguje

- Proveďte první krok řízení (otevřená smyčka), vyřadí zbytek



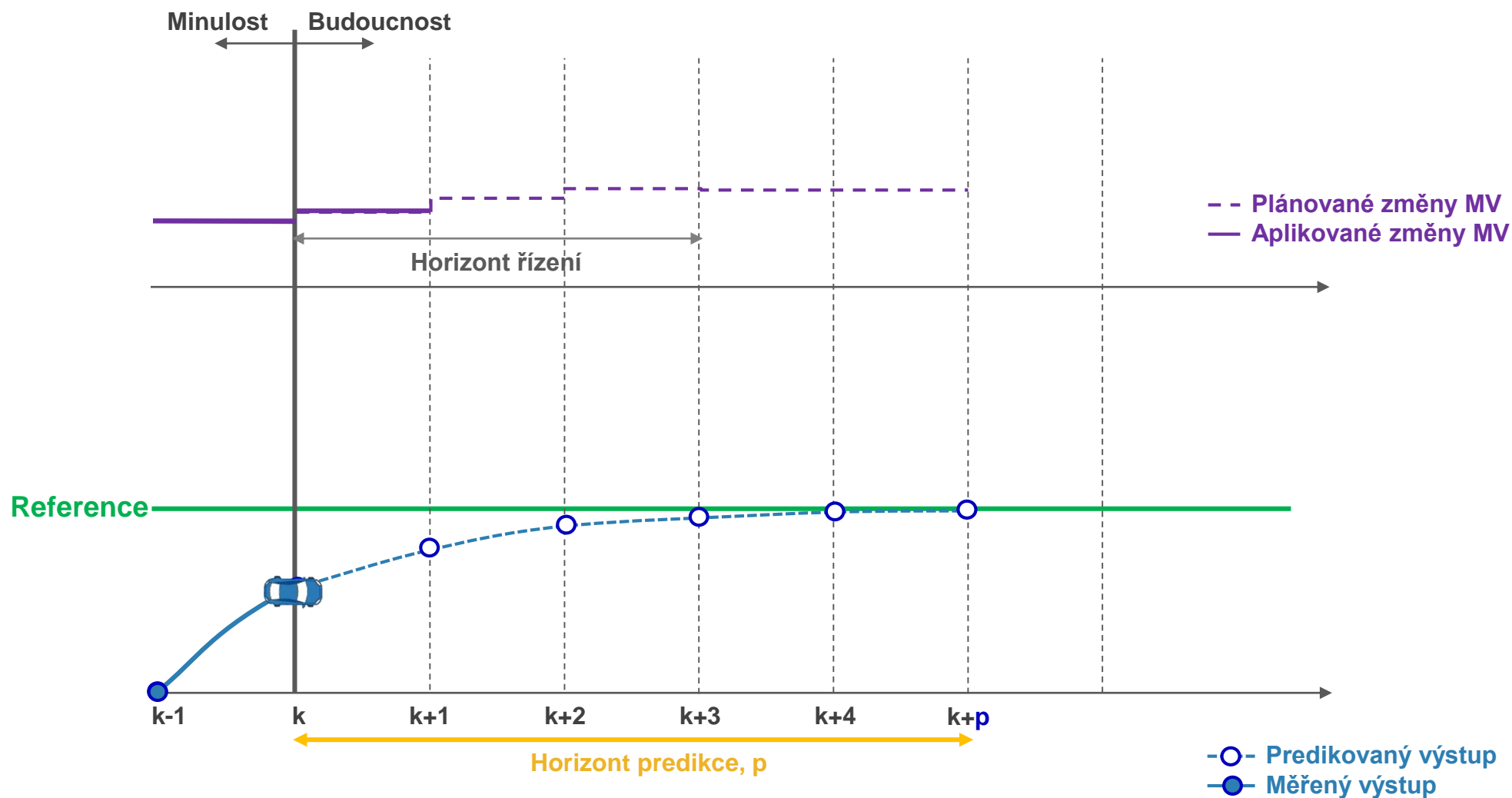
Jak MPC funguje

- Posune časový horizont, změří aktualizované výstupy, řeší optimalizační úlohy v kroku k



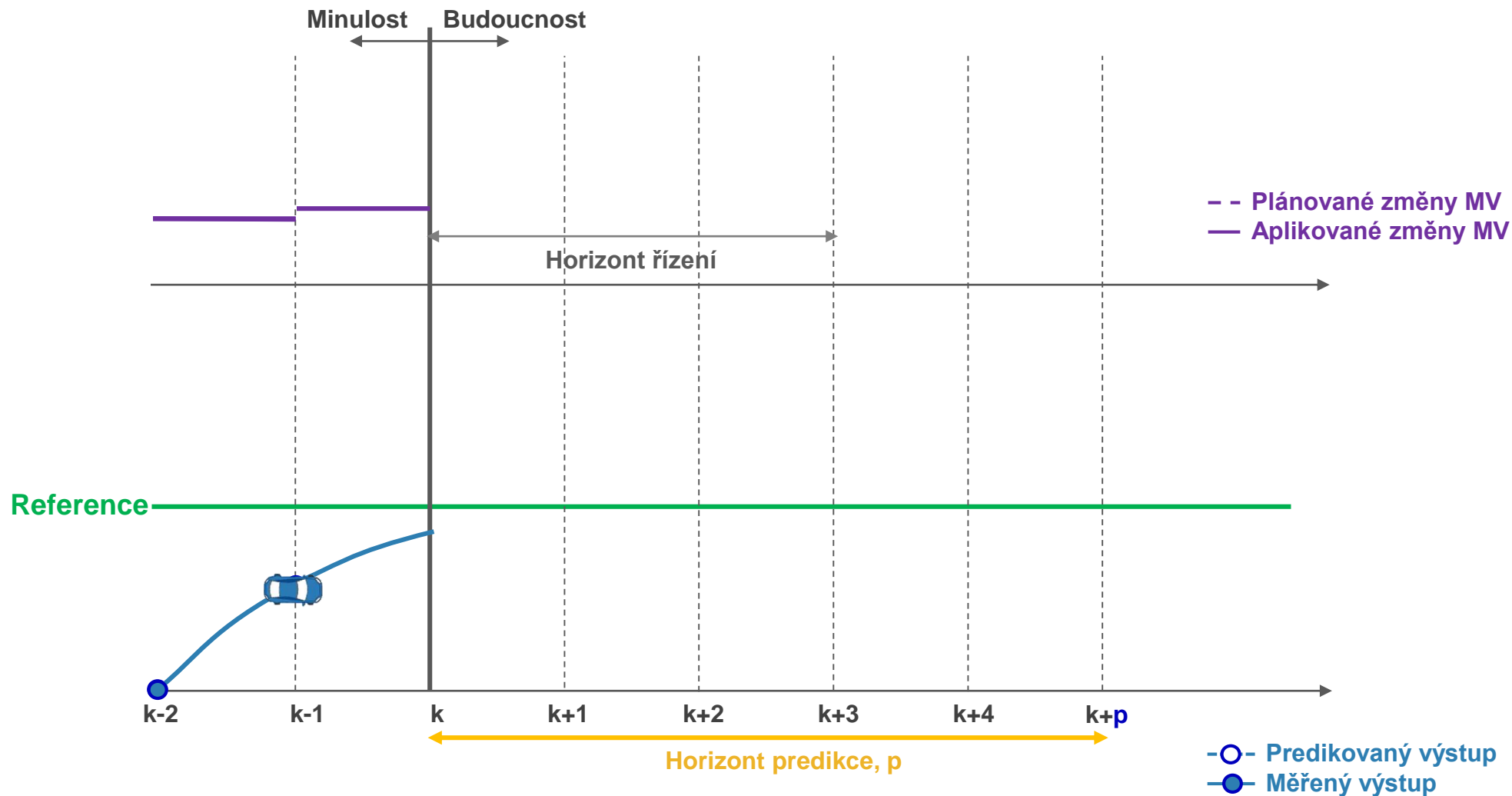
Jak MPC funguje

- Proveďte první krok řízení (otevřená smyčka), vyřadí zbytek



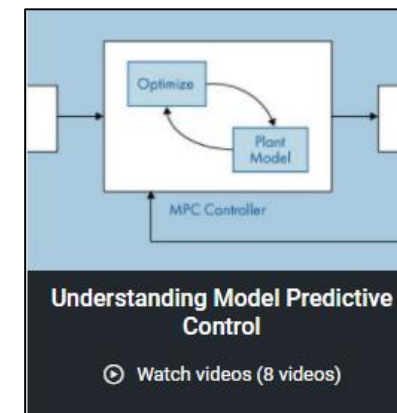
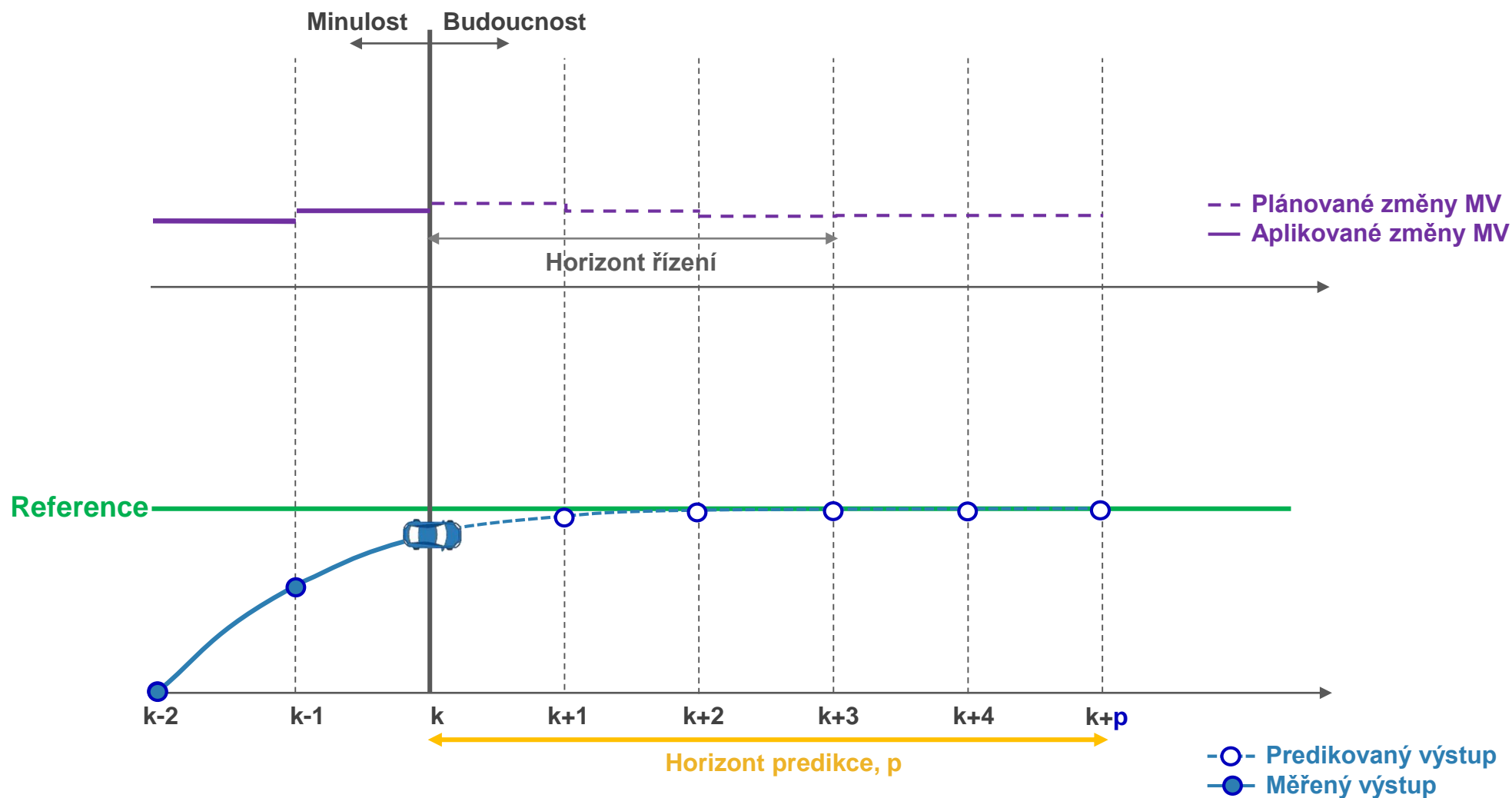
Jak MPC funguje

- Posune časový horizont, změří aktualizované výstupy, řeší optimalizační úlohy v kroku k



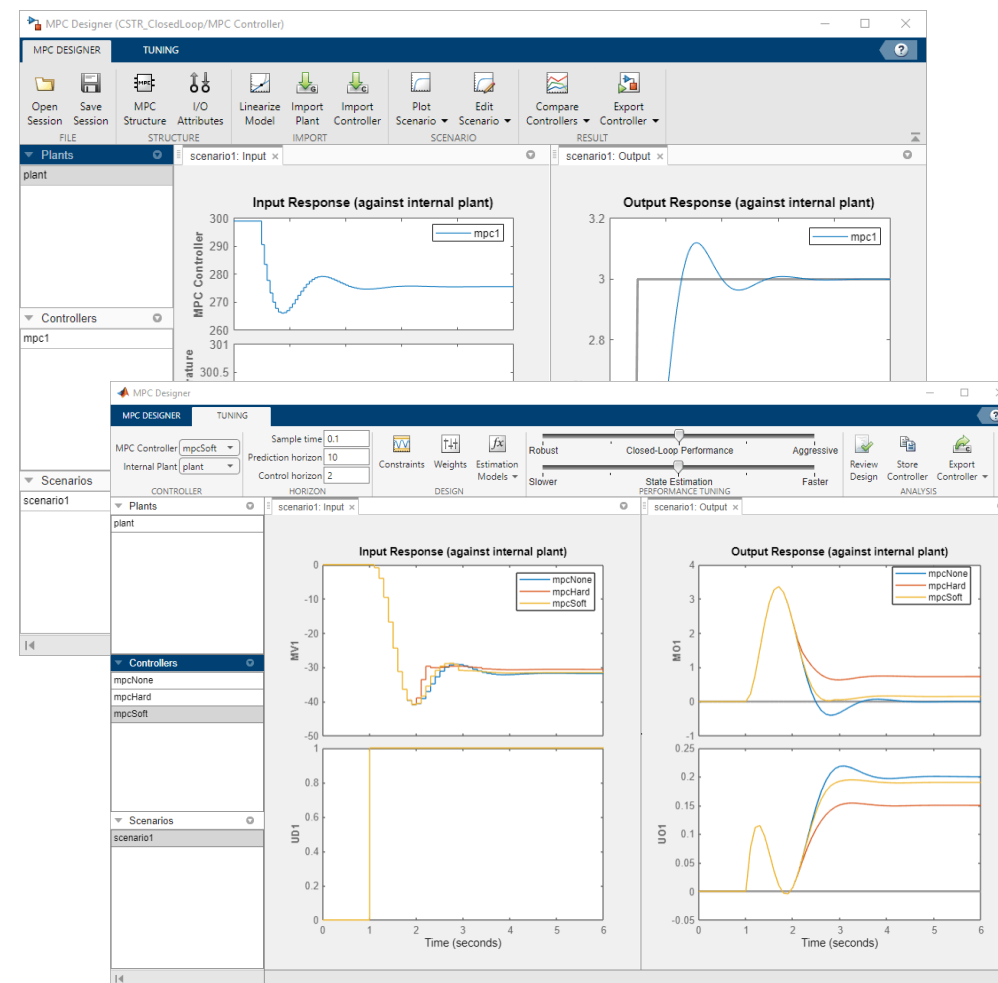
Jak MPC funguje

- Řeší optimalizační úlohu v kroku k



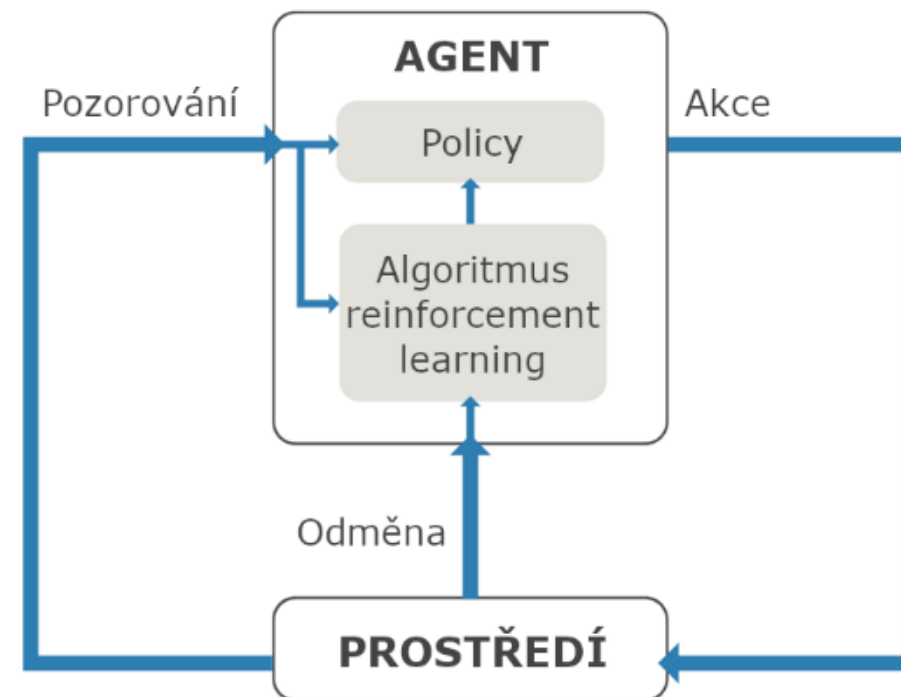
Tvorba MPC

- Připravené funkce
 - pro různé typy MPC
- Grafická aplikace MPC Designer
 - pro lineární implicitní MPC
- Bloky v prostředí Simulink
 - obecné MPC různých typů
 - specializované pro konkrétní úlohy



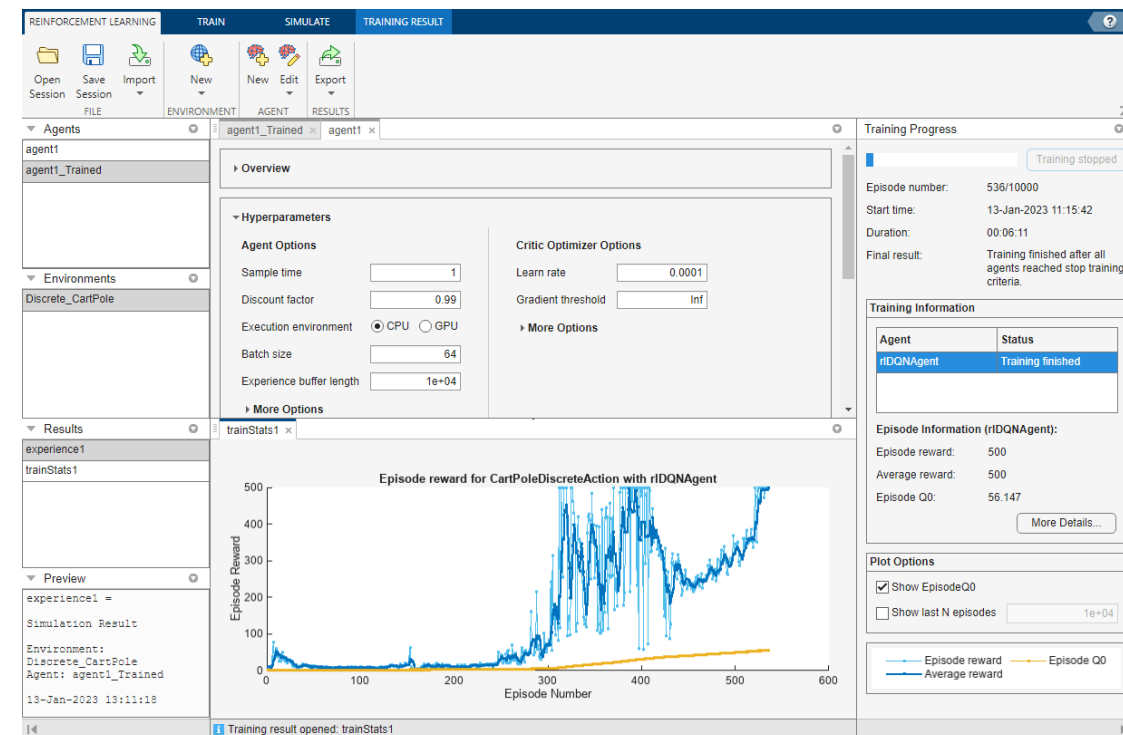
Reinforcement learning (RL)

- Metoda strojového učení
 - počítačový agent se učí optimálnímu chování opakovanou interakcí s dynamickým prostředím
- Cíl: maximalizovat odměnu v dlouhodobém časovém horizontu
- Algoritmus policy
 - hluboká neuronová síť (nejčastěji)
 - implementuje: regulátory, rozhodovací algoritmy
- Pro komplexní systémy
 - kde jsou tradiční metody obtížně formulovatelné



Nástroje pro reinforcement learning

- RL „prostředí“
 - vytvořené v MATLABu
 - model systému v Simulinku
- Návrh, učení a simulace agenta
 - připravené funkce
 - Reinforcement Learning Designer app
- Simulink: připravené bloky
 - RL Agent – simulace a učení agenta
 - Policy – simulace a nasazení naučené funkce policy
- Reinforcement Learning Toolbox



Automatické generování kódu pro aplikace v reálném čase

- Prototypování a testování systému – PC s měřicí kartou, real-time simulátor
- Generování optimalizovaného embedded kódu pro zvolenou cílovou platformu



Otázky