

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA KYBERNETIKY A UMELEJ INTELIGENCIE

**MODELOVANIE, ANALÝZA, RIADENIE A SIMULÁCIA
HYBRIDNÝCH SYSTÉMOV**

Bakalárska práca 22. 6. 2017

Autor:

Dominik Grigľák

Školiteľ:

doc. Ing. Anna Jadlovská, PhD.

Konzultant:

Ing. Dominik Vošček



Obsah

- 1. Všeobecný popis hybridného systému**
- 2. Modelovanie hybridného hydraulického systému**
- 3. Analýza HHS**
- 4. Návrh riadenia pre HHS – optimálne stavové riadenie**
- 5. Návrh riadenia pre HHS – prediktívne riadenie**
- 6. Modelová aplikácia výťahu (MAV)**
- 7. Zhodnotenie výsledkov a prínosov bakalárskej práce**

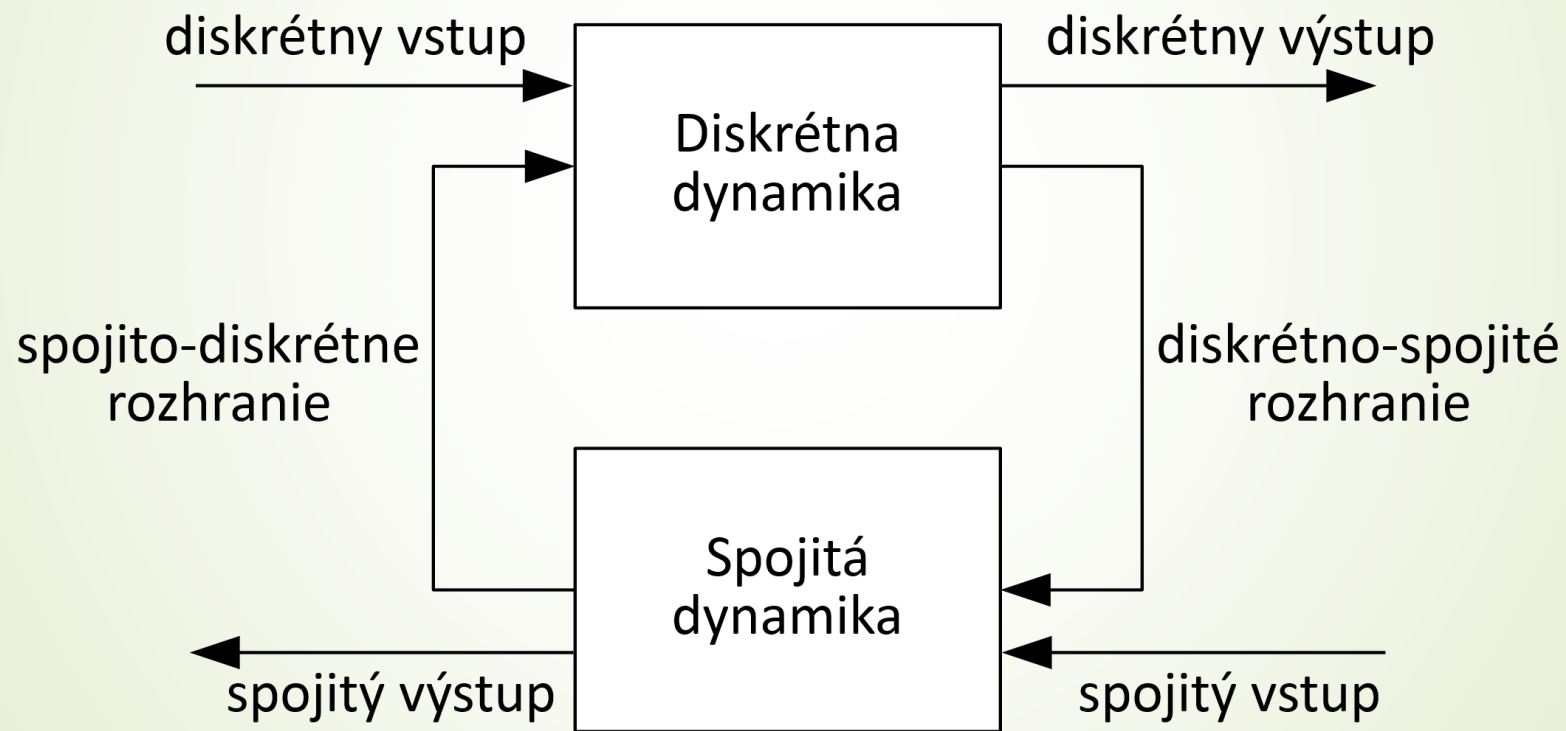
1. Všeobecný popis hybridného systému

1. Hybridné systémy

- Dynamické systémy
- Majú spojitú aj diskretnu dynamiku
- Spojitá dynamika – popísaná diferenciálnymi/diferenčnými rovnicami stavových premenných
- Diskretná dynamika – popísaná konečnými stavovými automatmi/Petriho sieťami, tvoria ju módy systému

- Zvolené hybridné systémy:
 - Hybridný hydraulický systém (HHS) dvoch nádob v interakcii
 - Modelová aplikácia výťahu (MAV)

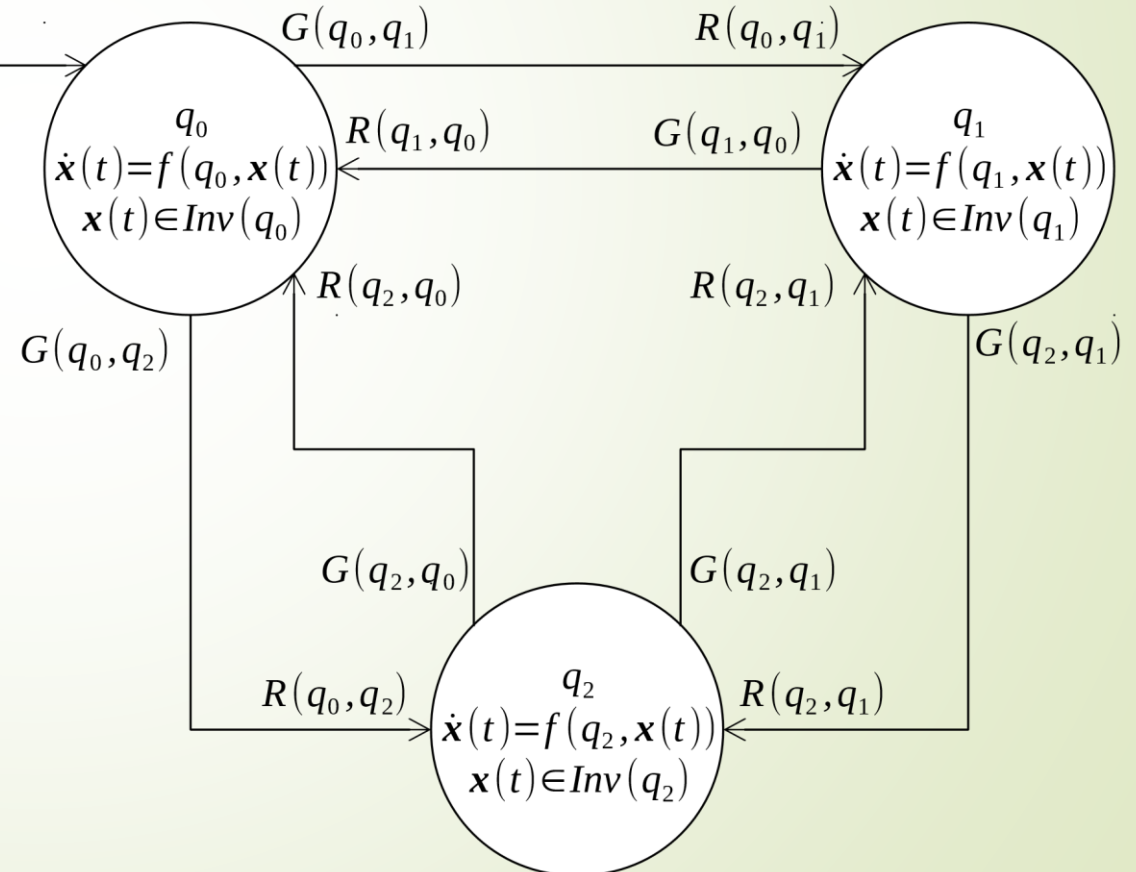
1. Základná schéma všeobecného hybridného systému



1. Popis všeobecného hybridného systému s grafom prechodov

- Hybridný automat je n -tica $\{Q, X, f, Init, Inv, E, G, R\}$, kde
 - $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ - stavy systému
 - stavový priestor stavových premenných
 - funkcia pre stavové premenné q analytické vektorové pole
 - $Init$ – počiatočný stav systému
 - Inv – reprezentuje podmienky zotrvania v danom móde
 - E – množina prechodov
 - G – podmienky prechodu
 - R – akcie pri prechode

$(q_0, x_0) \in Init$ ➤ Zobrazenie príkladného grafu prechodov pre hybridný systém s 3 módmi

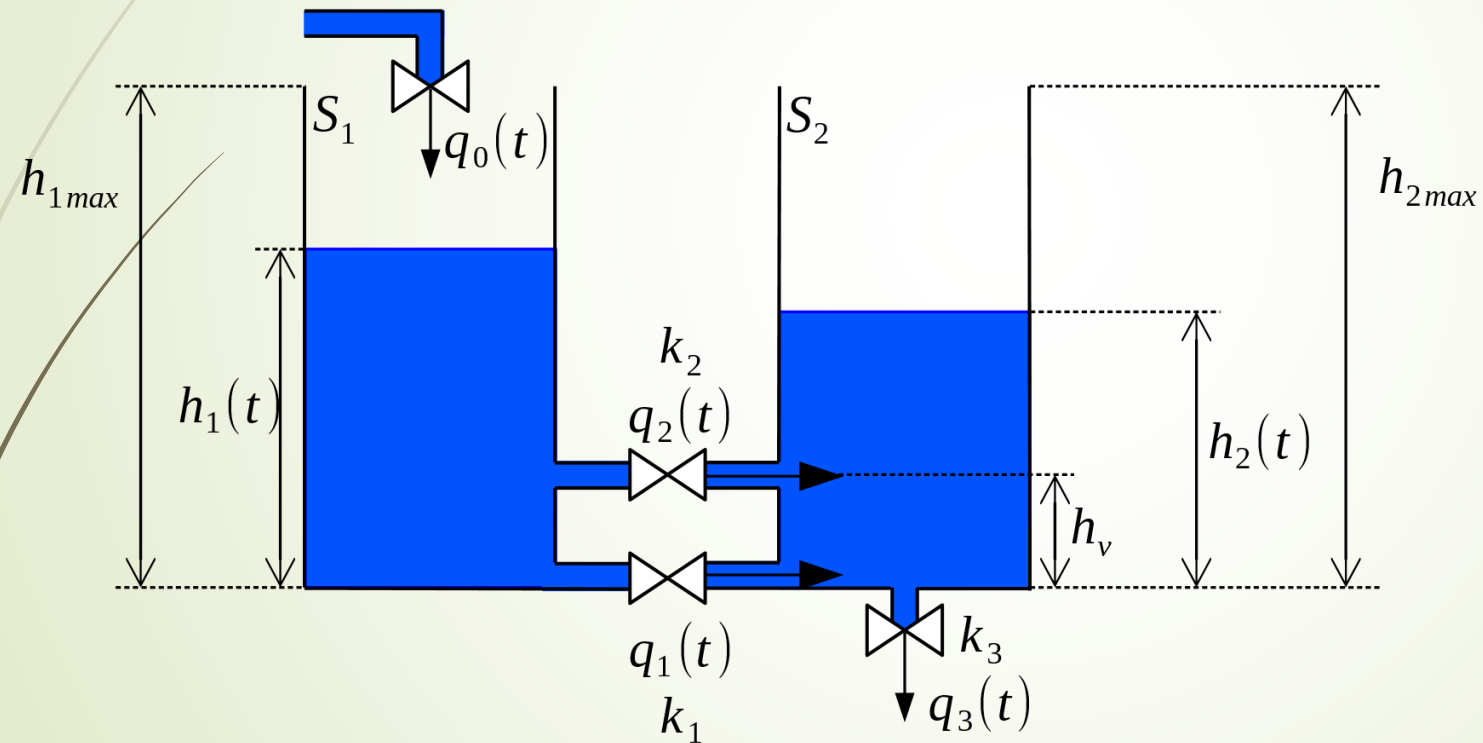




2. Modelovanie hybridného hydraulického systému



2. Zvolený hybridný hydraulický systém (HHS) dvoch nádob v interakcii

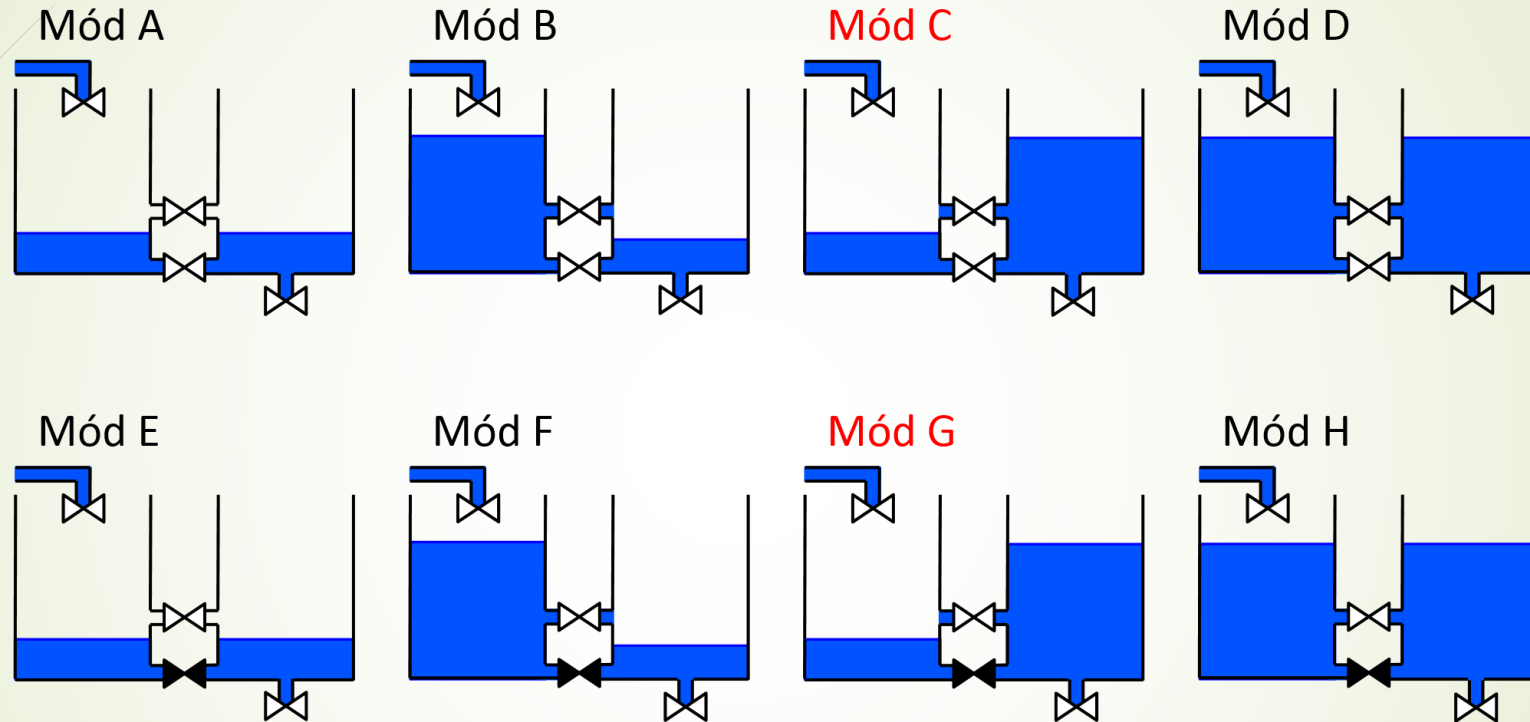


- Spodný ventil k_1 je uzatvoriteľný
- Módy sa menia
 - výškou $h_1(t)$ a $h_2(t)$
 - uzatvorením ventila (označenie $v_{op}(t)$)

2. Mógy HHS

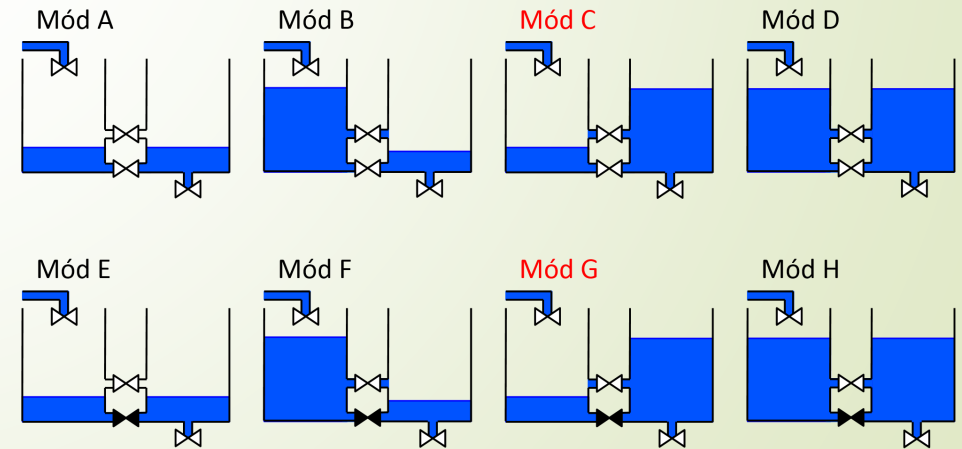
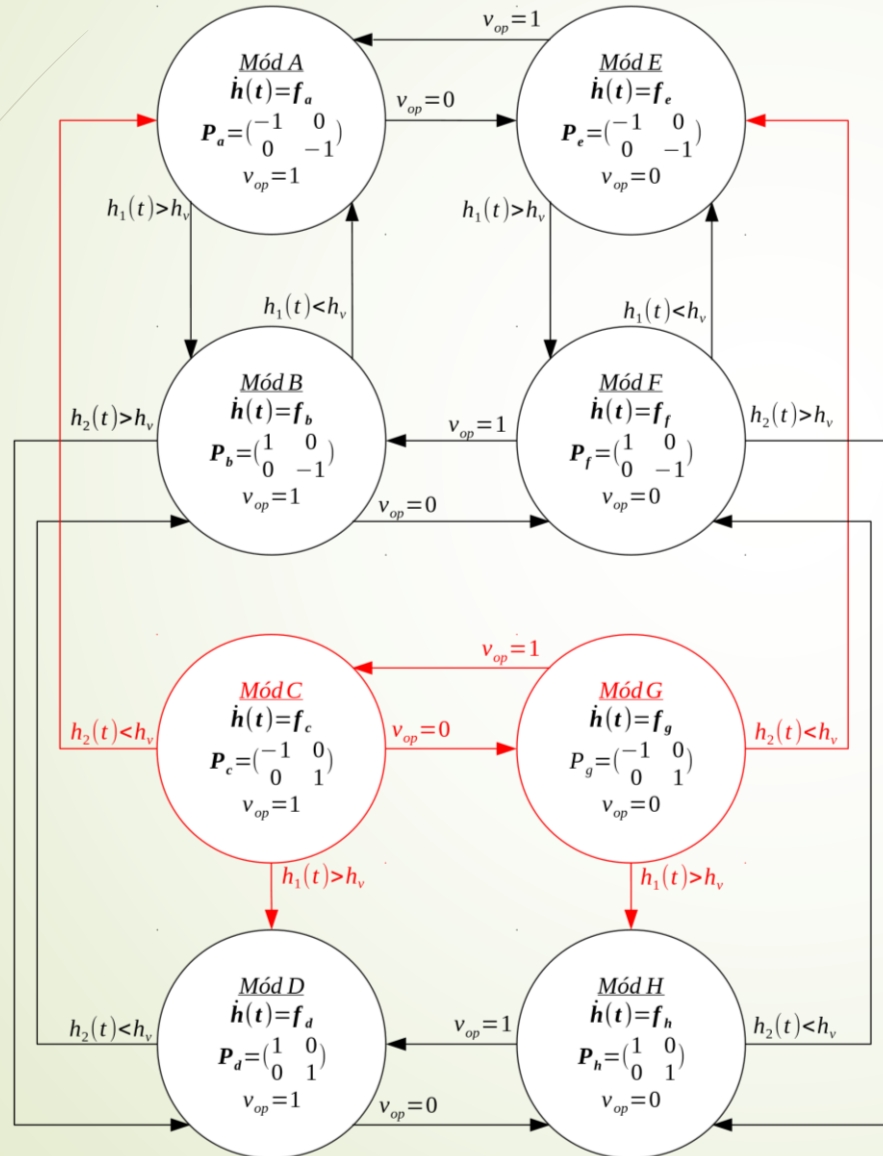
Mód	Hladina v prvej nádobe $h_1(t)$	Hladina v prvej nádobe $h_2(t)$	Otvorenie ventilu
A	Pod ventilom ($h_1(t) \leq h_v$)	Pod ventilom ($h_2(t) \leq h_v$)	Otvorený
B	Nad ventilom ($h_1(t) > h_v$)	Pod ventilom ($h_2(t) \leq h_v$)	Otvorený
C	Pod ventilom ($h_1(t) \leq h_v$)	Nad ventilom ($h_2(t) > h_v$)	Otvorený
D	Nad ventilom ($h_1(t) > h_v$)	Nad ventilom ($h_2(t) > h_v$)	Otvorený
E	Pod ventilom ($h_1(t) \leq h_v$)	Pod ventilom ($h_2(t) \leq h_v$)	Zatvorený
F	Nad ventilom ($h_1(t) > h_v$)	Pod ventilom ($h_2(t) \leq h_v$)	Zatvorený
G	Pod ventilom ($h_1(t) \leq h_v$)	Nad ventilom ($h_2(t) > h_v$)	Zatvorený
H	Nad ventilom ($h_1(t) > h_v$)	Nad ventilom ($h_2(t) > h_v$)	Zatvorený

2. Módy HHS znázornené graficky

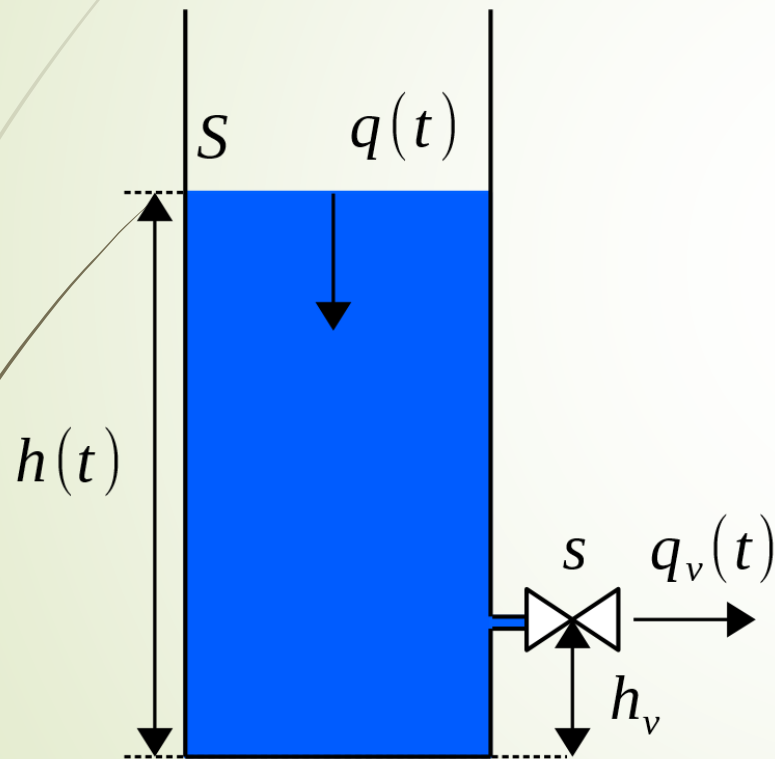


- Mód C a G sú bez pôsobenia poruchy nedosiahnuteľné z iných módov
- Čierny ventil znázorňuje zatvorenie ventilu

2. Graf prechodov medzi módmí HHS



2. Princípy modelovania hydraulických systémov s hybridnou dynamikou



- Torricelliho zákon

$$\frac{\rho v(t)^2}{2} + \rho g h(t) + p = \text{constant}$$

- Rýchlosť vytekania kvapaliny cez ventil

$$v_v(t) = \sqrt{2g(h(t) - h_v)}$$

- Zákon zachovania hmotnosti (objemu)

$$q(t) = q_v(t)$$

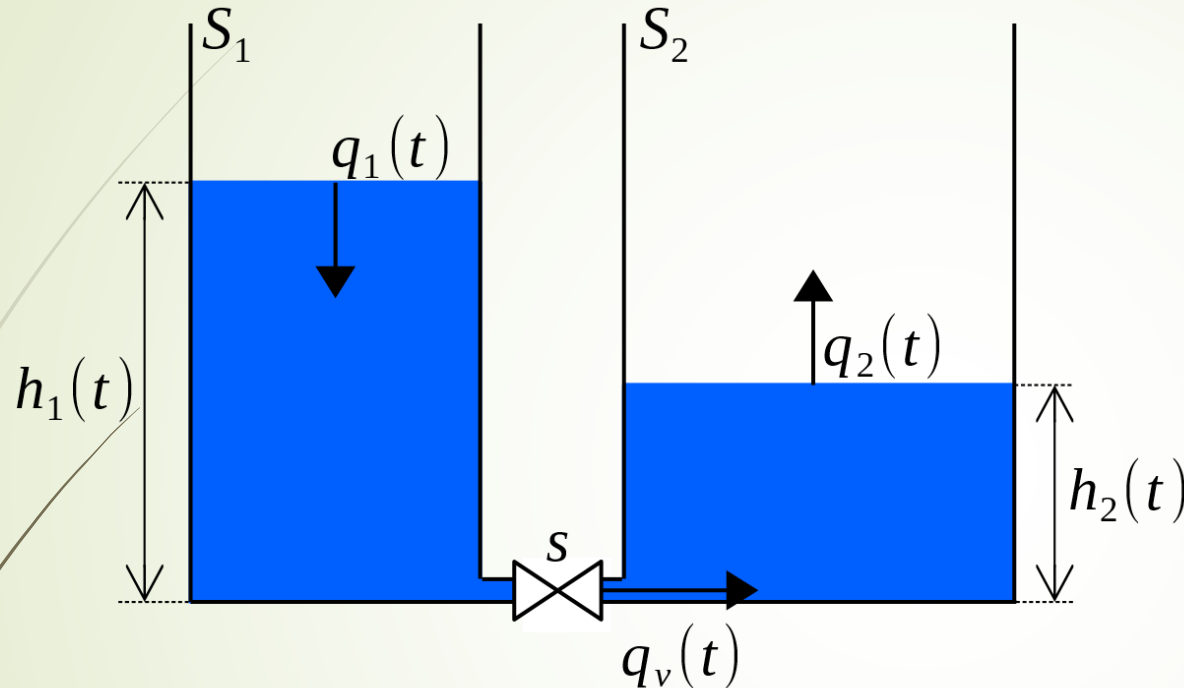
- Substitučný vzťah pre prierez ventilu

$$k_v = s\sqrt{2g}$$

- Výsledný vzťah pre zmenu výšky hladiny v nádobe

$$\frac{dh(t)}{dt} = -\frac{k_v\sqrt{(h(t) - h_v)}}{S}$$

2. Odvodenie modelu pre nádoby v interakcii



Zmeny výšok hladín v nádobách pre $h_1(t) \lesseqgtr h_2(t)$:

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = -\text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \frac{k\sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|}}{S_1}$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \frac{k\sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|}}{S_2}$$

- Rýchlosť vytekania kvapaliny cez ventil nádob v interakcii pre $h_1(t) > h_2(t)$:

$$v_v(t) = \sqrt{2g(h_1(t) - h_2(t))}$$

- Zmeny výšok hladín v nádobách pre $h_1(t) > h_2(t)$:

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = -\frac{k\sqrt{h_1(t) - h_2(t)}}{S_1}$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{k\sqrt{h_1(t) - h_2(t)}}{S_2}$$

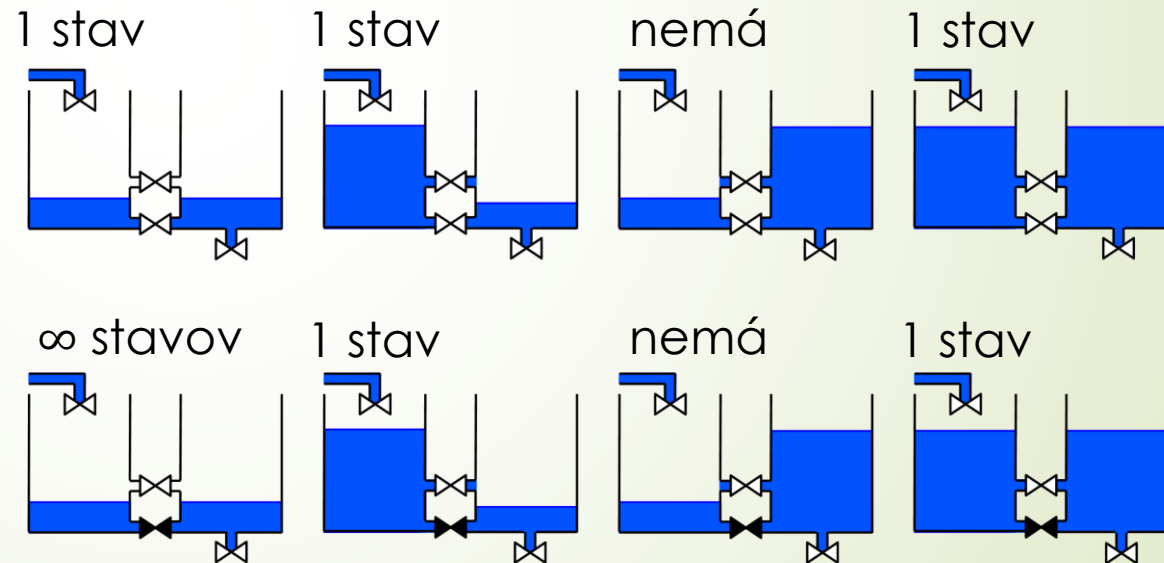
2. Výpočet hodnôt v ustálených stavoch

- Hľadanie riešenia rovníc pri zvolenej hodnote h_{2si} ustáleného stavu:

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = 0$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = 0$$

- Počet ustálených stavov v jednotlivých módoch pri zvolenej hodnote h_{2si} :



2. Spôsob vytvorenia lineárnej aproximácie

- v módoch s ustáleným stavom:

- pomocou jakobiánov

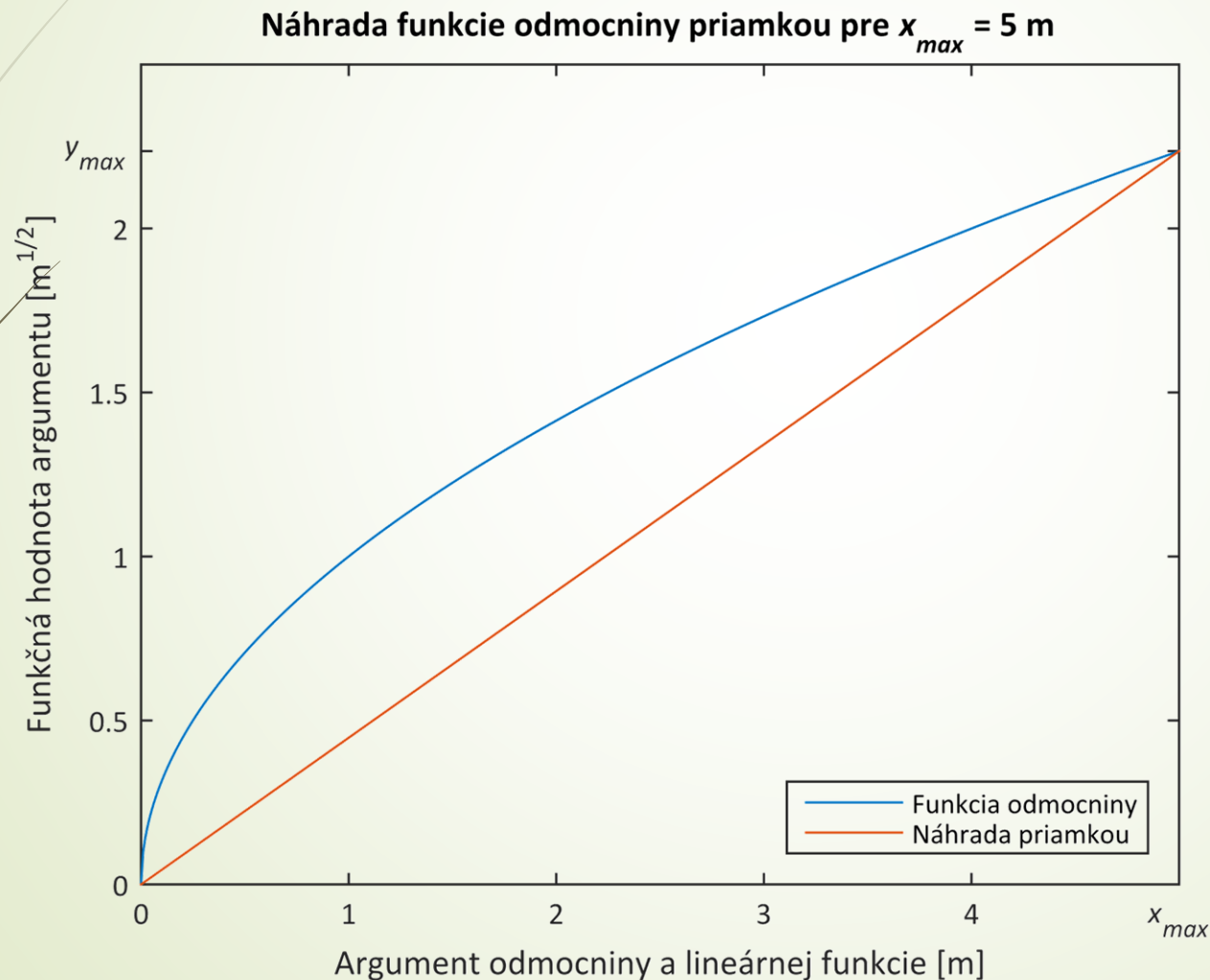
$$\mathbf{A}_n = \left(\begin{array}{cc} \frac{\partial f_{1n}}{\partial h_1(t)} & \frac{\partial f_{1n}}{\partial h_2(t)} \\ \frac{\partial f_{2n}}{\partial h_1(t)} & \frac{\partial f_{2n}}{\partial h_2(t)} \end{array} \right) \Bigg|_{h_1(t)=h_{1sn}, h_2(t)=h_{2sn}} \quad \mathbf{B}_n = \left(\begin{array}{c} \frac{\partial f_{1n}}{\partial q_0(t)} \\ \frac{\partial f_{2n}}{\partial q_0(t)} \end{array} \right) \Bigg|_{q_0(t)=q_{0sn}}$$

- lineárna aproximácia módu E sa nedala vytvoriť (delenie nulou)

- v módoch bez ustáleného stavu a v móde E

- pomocou náhrady funkcie odmocniny priamkou

2. Spôsob vytvorenia lineárnej aproximácie – náhrada funkcie odmocniny priamkou



- Vzťah pre náhradu odmocniny priamkou pre daný argument

$$\sqrt{X - Y} = \frac{\sqrt{x_{max}}}{x_{max}} (X - Y)$$

2. Vytvorenie modelu HHS diskretného v čase

- ▶ Model vytvorený z lineárnej aproximácie nelineárneho modelu HHS
- ▶ Vzťah pre zápis derivácie výškok hladín v diskretnom čase

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \frac{\mathbf{h}(k+1) - \mathbf{h}(k)}{T}$$

- ▶ Náhrada premenných závislých od času t premennými závislými od diskretného času k

$$\begin{aligned}\mathbf{h}(t) &\rightarrow \mathbf{h}(k) \\ q_0(t) &\rightarrow q_0(k)\end{aligned}$$

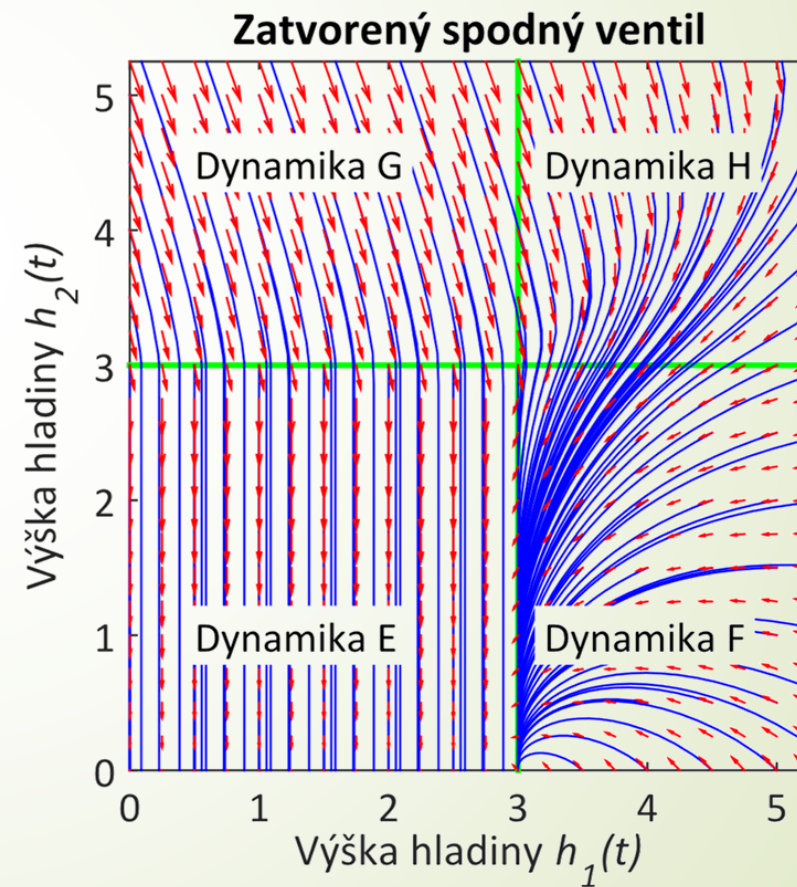
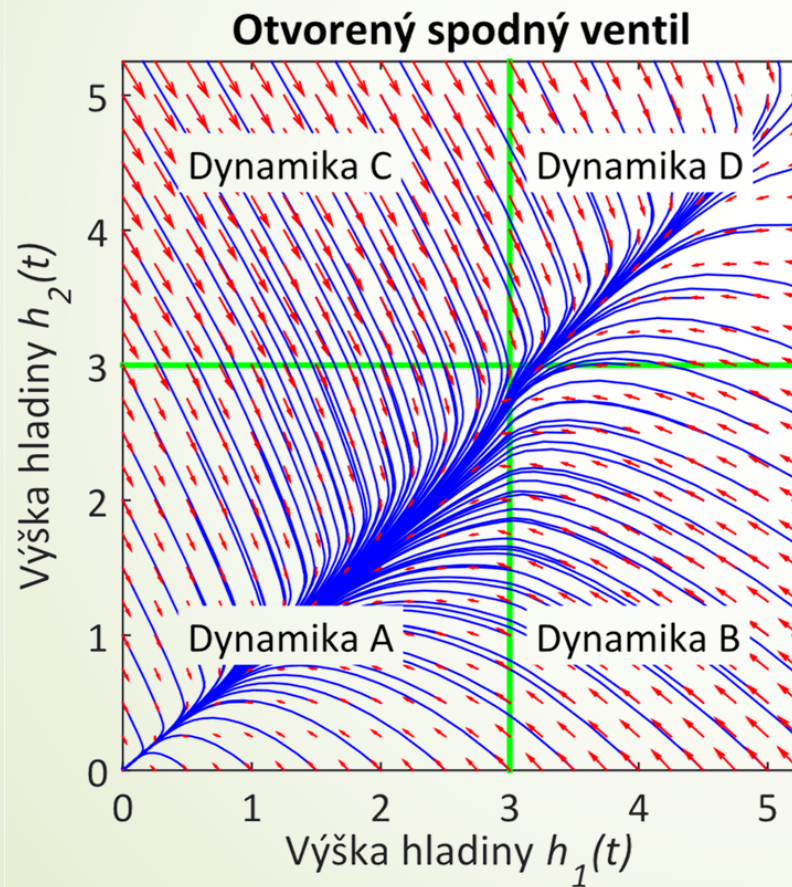
2. Implementácia modelov do vývojového prostredia a ich význam

- Nelineárny systém
 - Implementácia – S-funkcia
 - Základ pre vytvorenie lineárnej aproximácie a modelu diskretného v čase
 - Aplikovanie navrhnutých riadení na tento model
- Lineárna aproximácia
 - Implementácia – S-funkcia
 - Návrh optimálneho stavového riadenia
- Model diskretný v čase
 - Implementácia – HYSDEL
 - Návrh prediktívneho riadenia na báze modelu

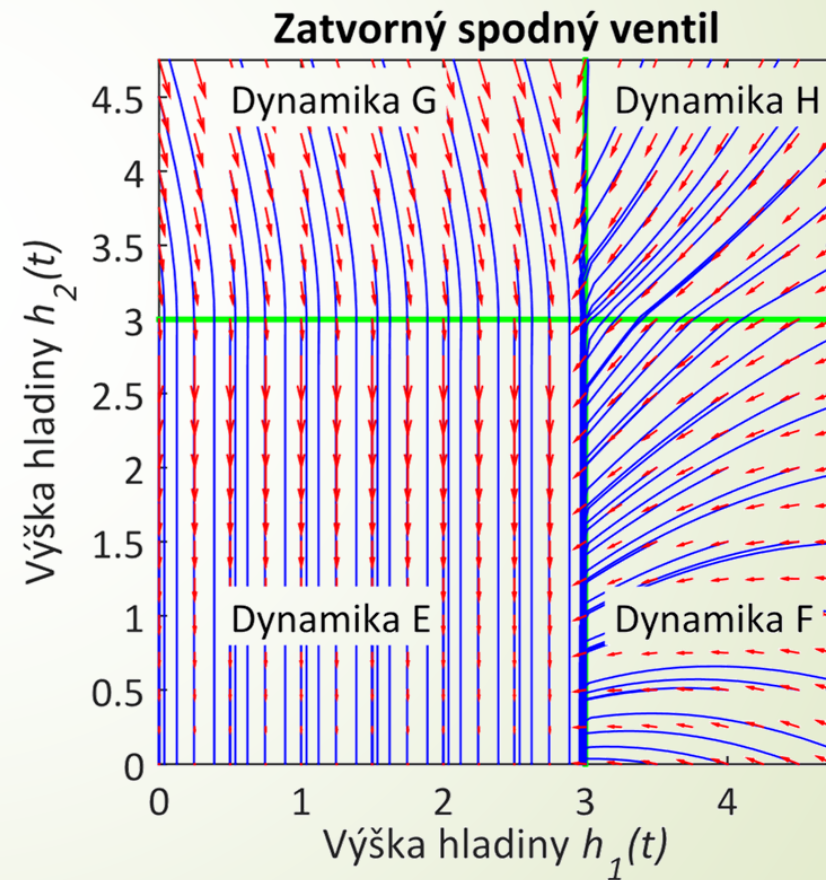
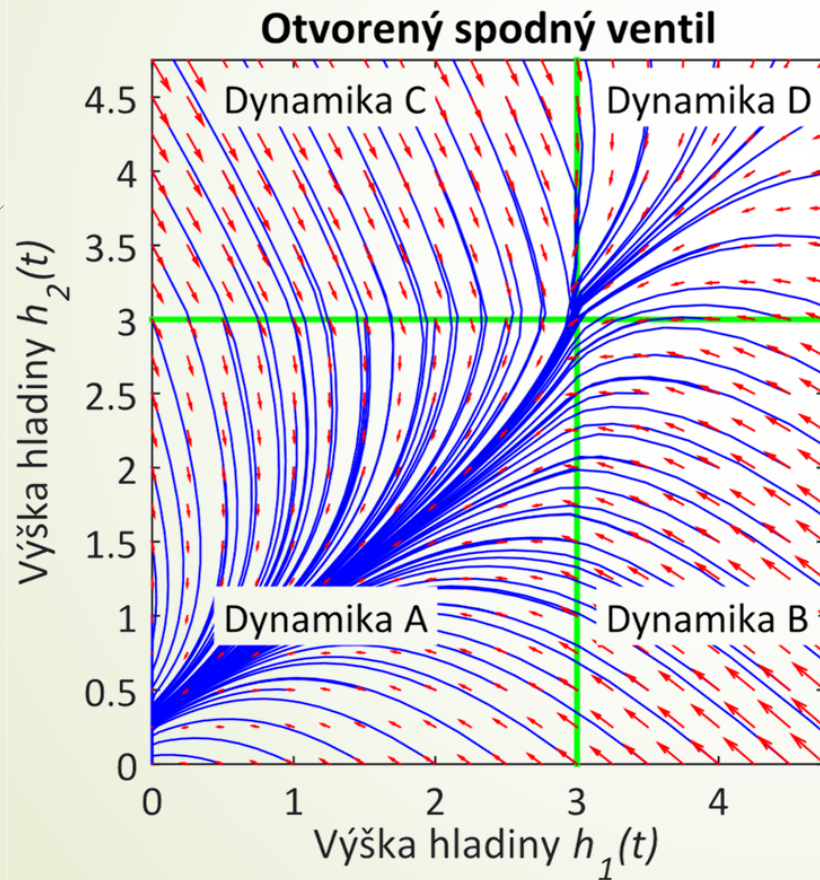


3. Analýza HHS

3. Analýza HHS fázovými portrétmi - nelineárny systém (bez vstupu)

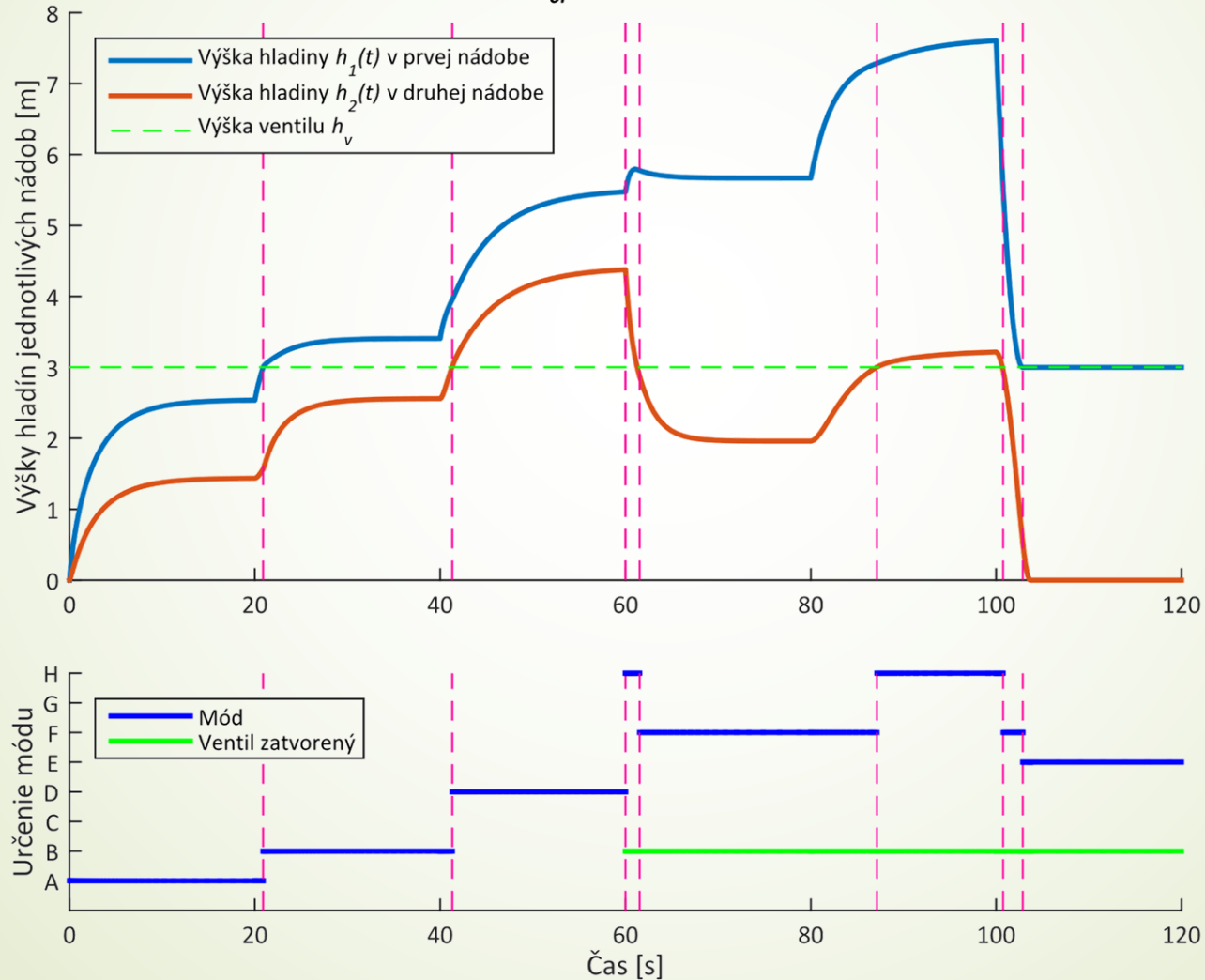


3. Analýza HHS fázovými portrétmi - lineárna aproximácia HHS

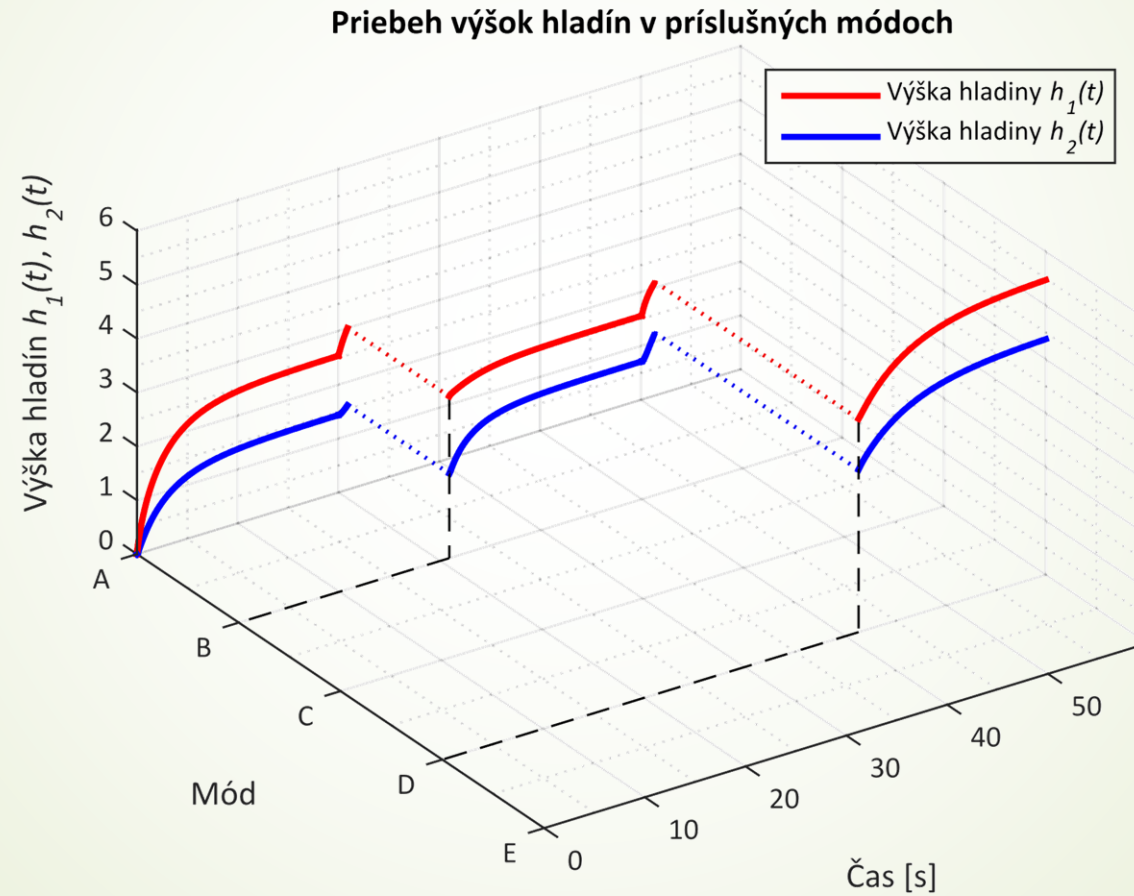


3. Analýza HHS pôsobením vstupu

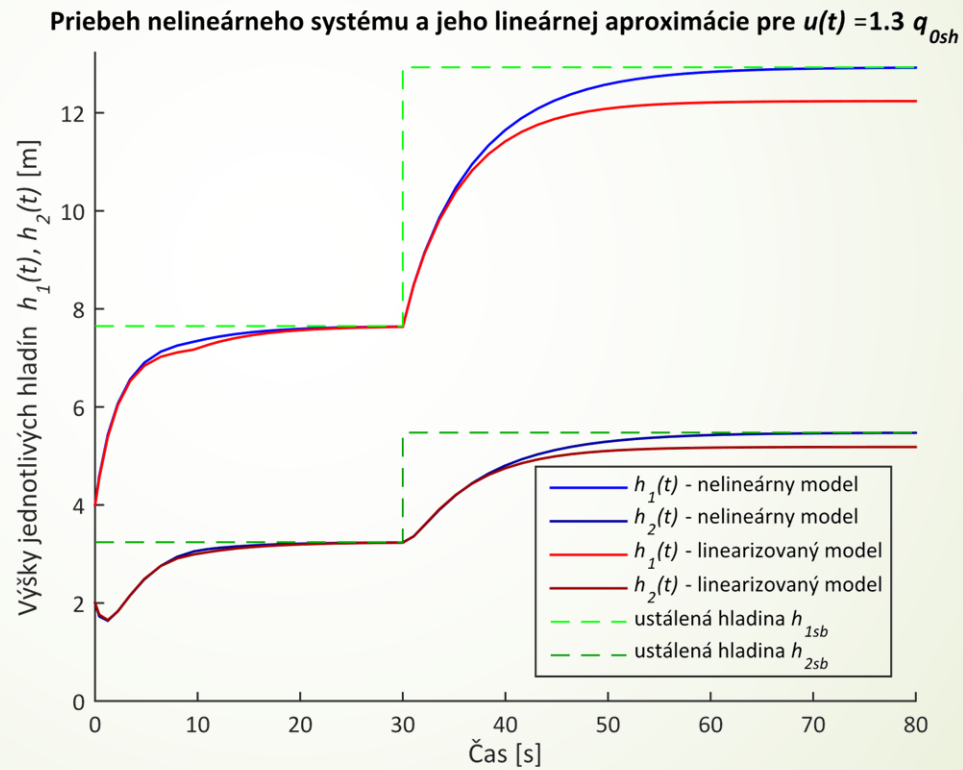
Zobrazenie prechodov medzi módi hybridného hydraulického systému pri ustálených prítokoch $q_{oi}(t)$ jednotlivých módov



3. Analýza HHS pôsobením vstupu - 3D graf



3. Porovnanie výšok hladín HHS a jeho lineárnej aproximácie



4. Návrh riadenia pre HHS

Optimálne stavové riadenie

4. Návrh optimálneho stavového riadenia

- Cieľ riadenia HHS – sledovanie referenčnej trajektórie a minimalizovanie funkcionálu

- $$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} (\langle \Delta \mathbf{x}(t), \mathbf{Q}(t) \Delta \mathbf{x}(t) \rangle + \langle \Delta \mathbf{u}(t), \mathbf{R}(t) \Delta \mathbf{u}(t) \rangle) dt$$

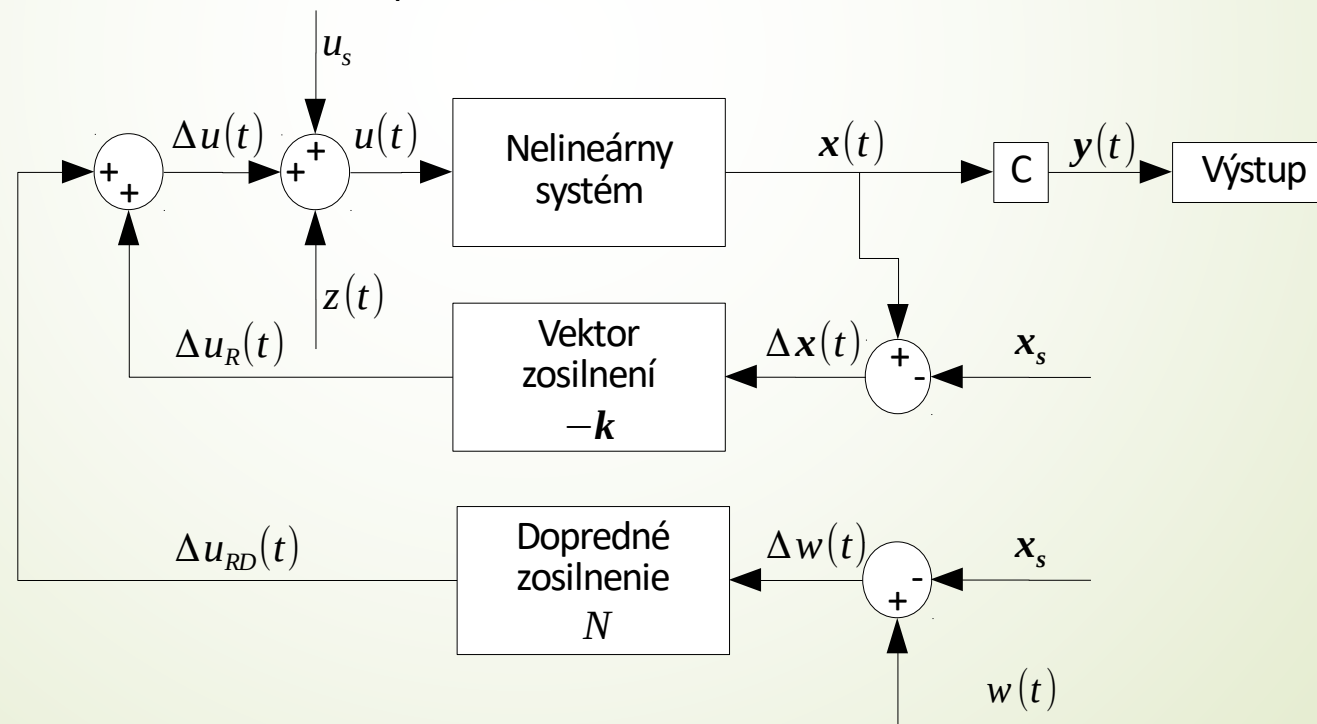
- Návrh pomocou lineárnej aproximácie HHS (odchýlkový model)
- Riešenie Riccatiho algebraických rovníc

$$0 = -\mathbf{Q} - \mathbf{A}^T \mathbf{S} - \mathbf{S} \mathbf{A} + \mathbf{S} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{S}$$

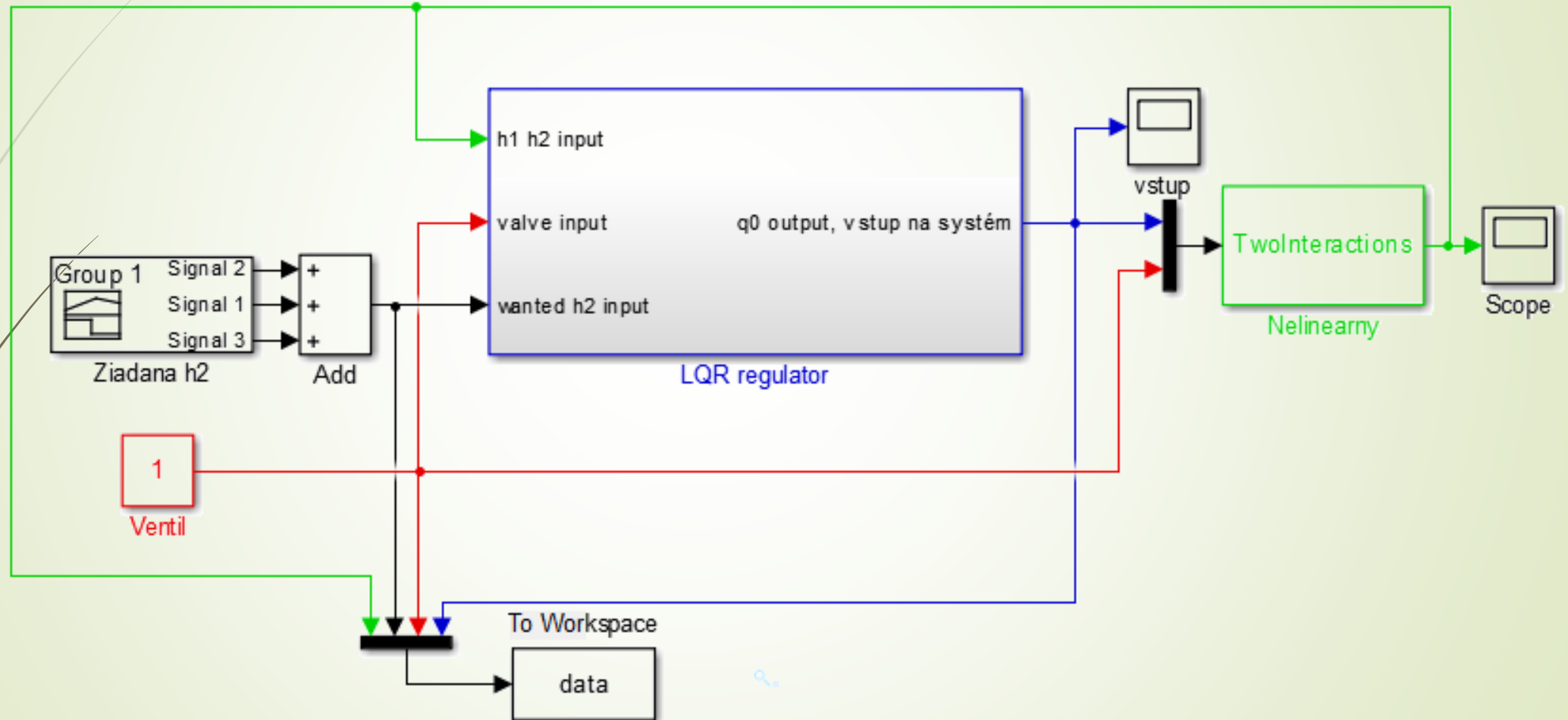
- v Matlabe pomocou funkcie ***lqr(A,B,Q,R)***;
- Výpočet dopredného zosilnenia:
$$N = \frac{-1}{\mathbf{C}[\mathbf{A} - \mathbf{B}k]^{-1} \mathbf{B}}$$
- Výsledný vstup na systém:
$$\Delta \mathbf{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{S} \Delta \mathbf{x}(t) + N \Delta w(t)$$
- V módoch bez ustáleného stavu – riadenie konštantným prítokom

4. Návrh optimálneho stavového riadenia - riadiaca štruktúra

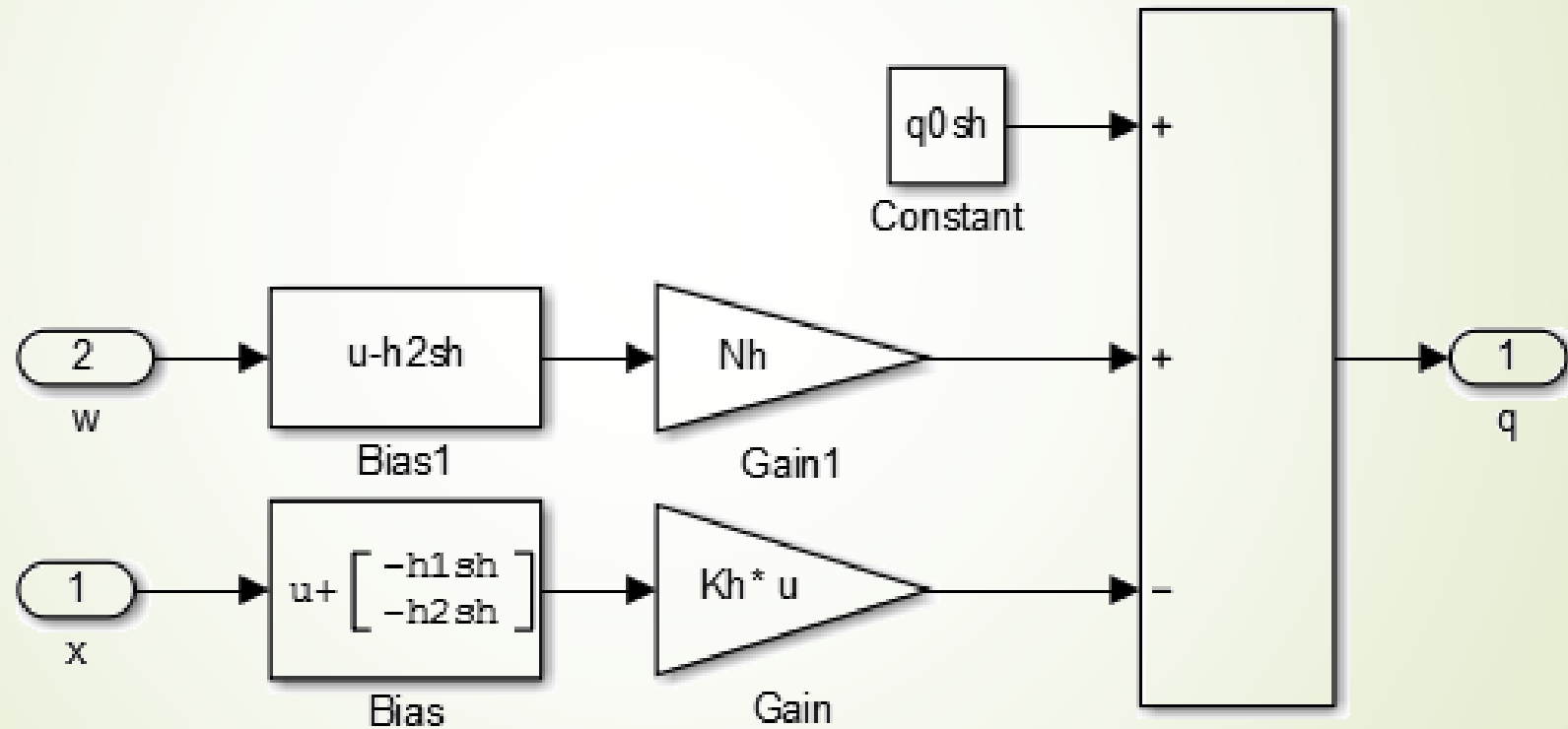
- Aplikovanie riadenia na nelineárny systém
- Odčítanie hodnôt premenných v ustálených stavoch
- Pripočítanie ustáleného prítoku



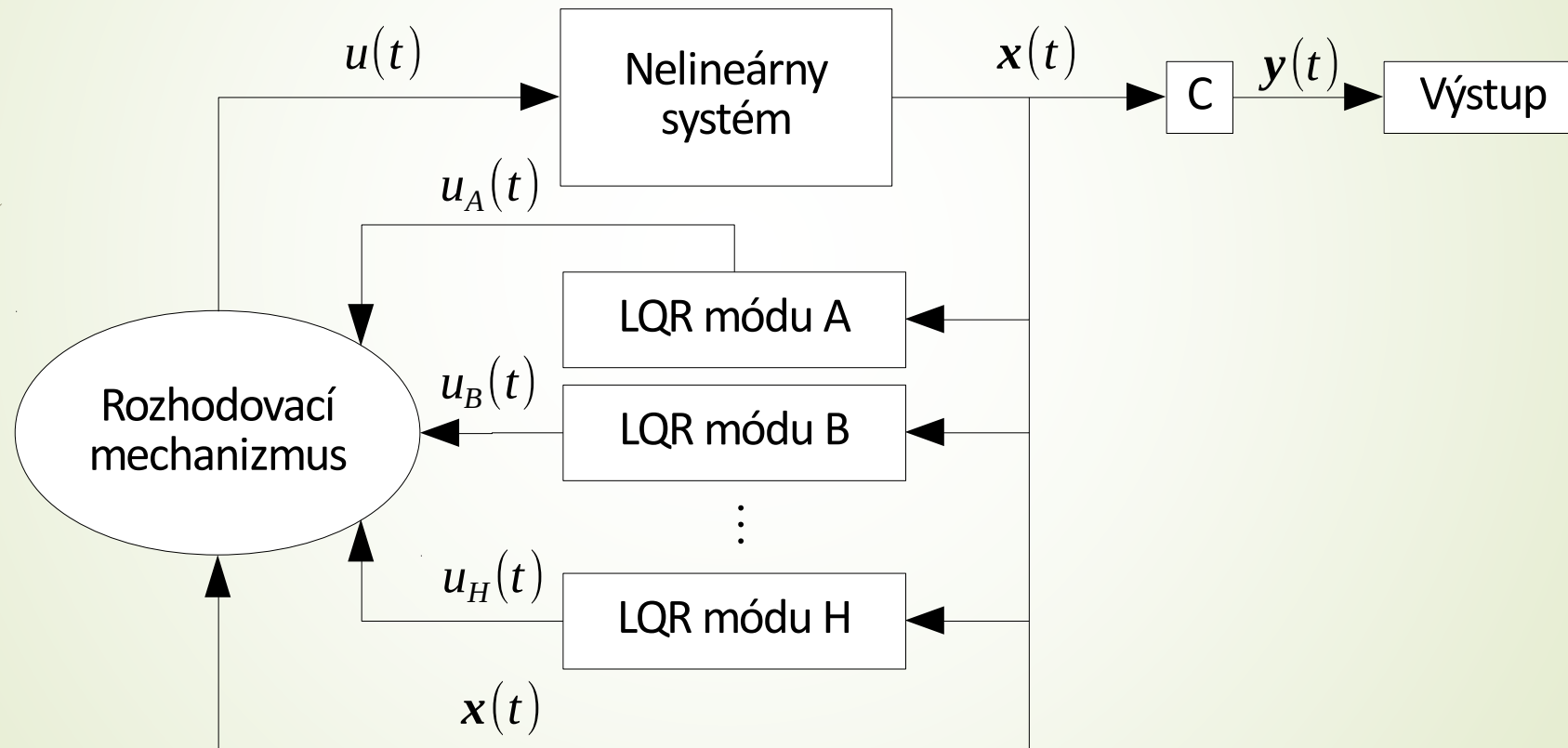
4. Riadiaca štruktúra - MATLAB/Simulink



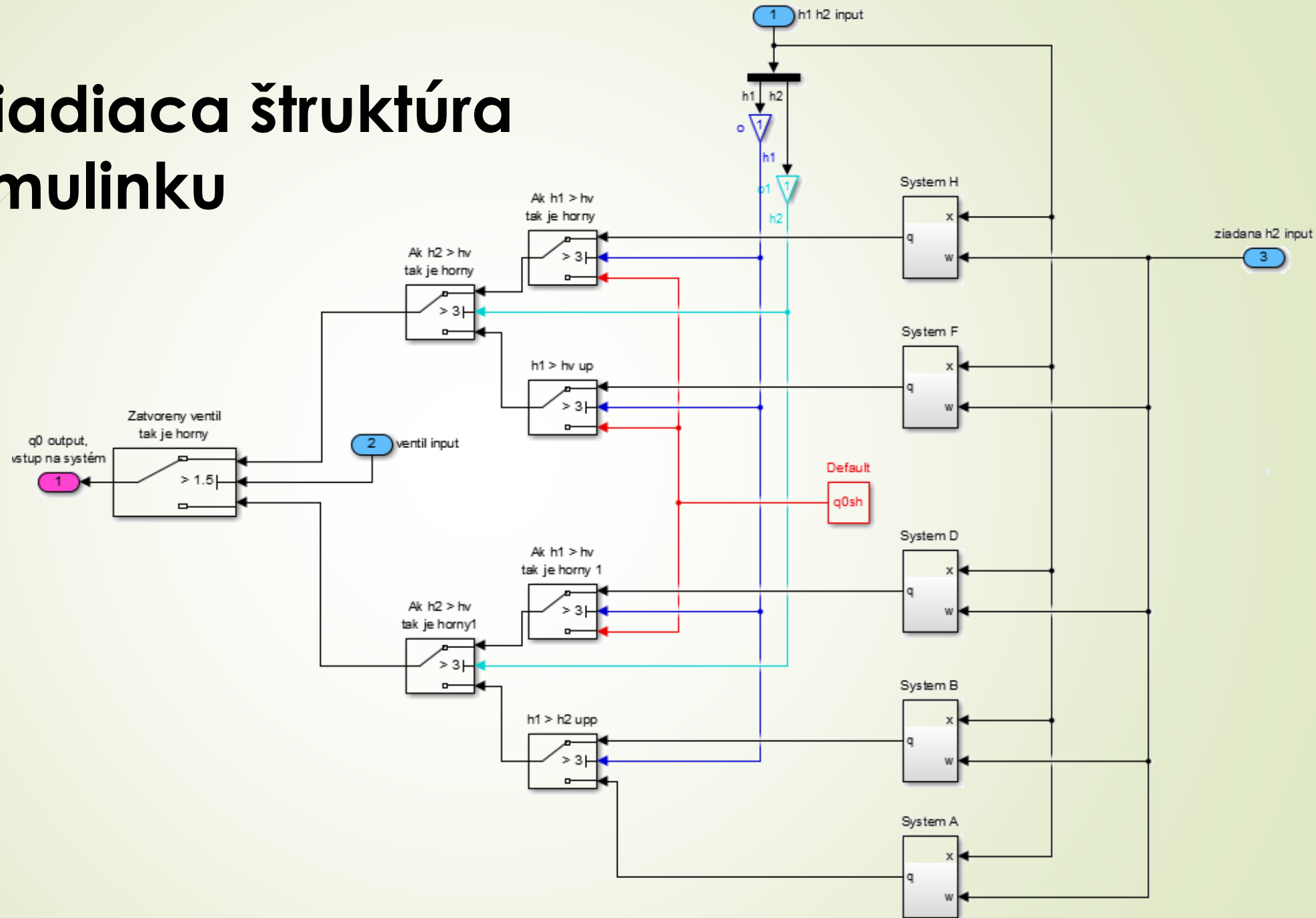
4. Riadiaca štruktúra v MATLAB/Simulinku - aplikovanie riadenia na nelineárny systém



4. Riadiaca štruktúra optimálneho stavového riadenia pre hybridný systém



4. Riadiaca štruktúra v Simulinku



4. Výsledky optimálneho stavového riadenia

➤ Zvolené matice:

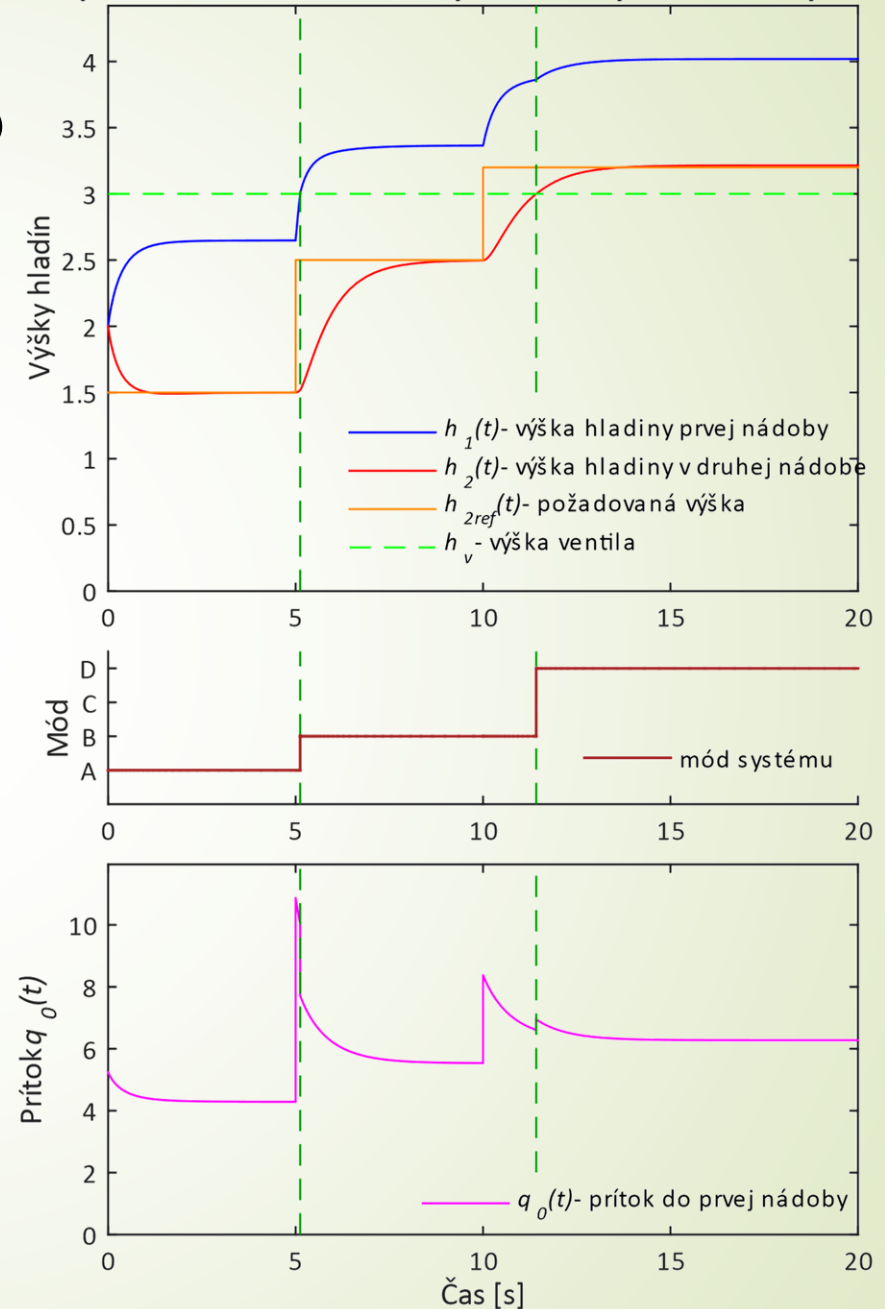
➤ $Q = \begin{pmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{pmatrix}$

➤ $R = 1$

➤ Zhodnotenie:

- Optimálne riadenie riadi výšku hladiny $h_2(t)$ HHS na požadovanú hodnotu s minimálnou odchýlkou
- Riadenie nedokáže meniť otvorenie a zatvorenie ventilu

Optimálne stavové riadenie hybridného hydraulického systému



4. Vplyv zmeny matice Q na priebeh výšok hladín HHS

➤ Zvolené matice Q :

➤ $Q_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

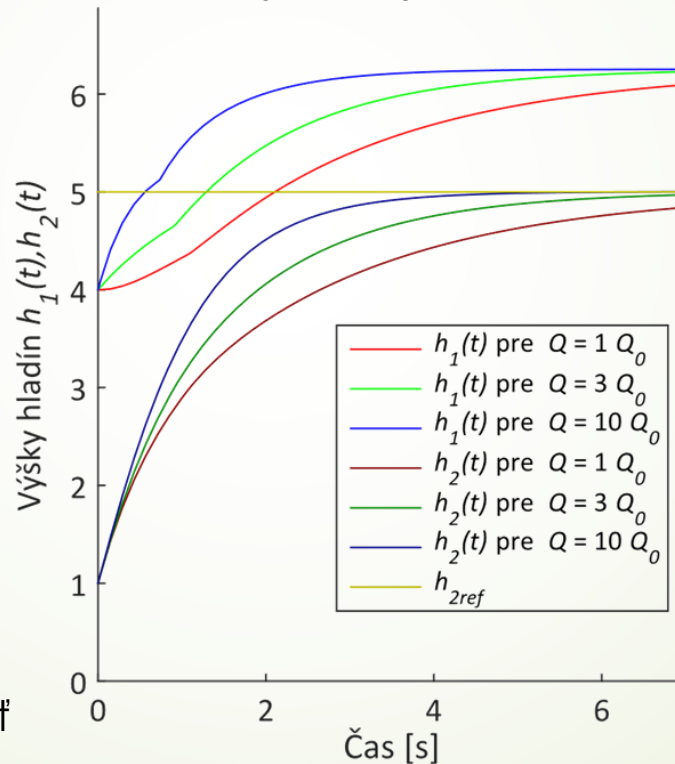
➤ $Q_2 = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$

➤ $Q_3 = \begin{pmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{pmatrix}$

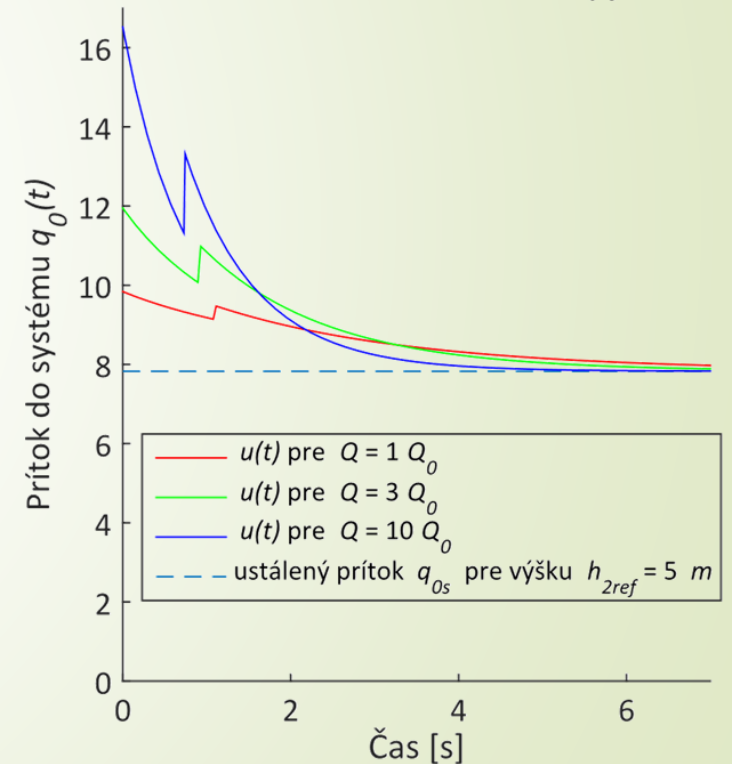
➤ Zhodnotenie:

- Zväčšovanie hodnôt matice Q na jej diagonále zlepšuje kvalitu riadenia
- Veľmi veľké hodnoty matice Q môžu spôsobovať prekmity

Vplyv váhovej matice Q na priebeh výšok hladín



Priebeh akčného zásahu $u(t)$





5. Návrh riadenia pre HHS

Optimálne prediktívne riadenie



5. Návrh prediktívneho riadenia

- ▶ Druhy prediktívneho riadenia
 - ▶ Explicitné – len na jednu zvolenú hodnotu
 - ▶ Online (s využitím lineárneho prediktora) – na sledovanie referenčnej trajektórie
- ▶ Cieľ riadenia – sledovanie referenčnej trajektórie/riadenie na konkrétnu hodnotu pri minimalizovaní funkcionálu

$$J(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) = \sum_{k=0}^{N_p-1} (\mathbf{x}_p(k) - \mathbf{w}(k))^T \mathbf{Q} (\mathbf{x}_p(k) - \mathbf{w}(k)) + \mathbf{u}^T(k) \mathbf{R} \mathbf{u}(k)$$

- ▶ Návrh pomocou modelu diskretného v čase, aplikované na nelineárny model HHS
- ▶ Využitie toolboxov a nástrojov
 - ▶ Jazyk HYSDEL na zápis modelu diskretného v čase
 - ▶ Multi-Parametric Toolbox (MPT) na návrh riadenia

5. Prediktívne riadenie – explicitné

➤ Zvolené parametre riadenia

➤ Váhové matice

$$\text{➤ } \mathbf{R}_e = \begin{pmatrix} 10^{-4} & 0 \\ 0 & 10^{-4} \end{pmatrix}$$

$$\text{➤ } \mathbf{Q}_e = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

➤ Perióda vzorkovania

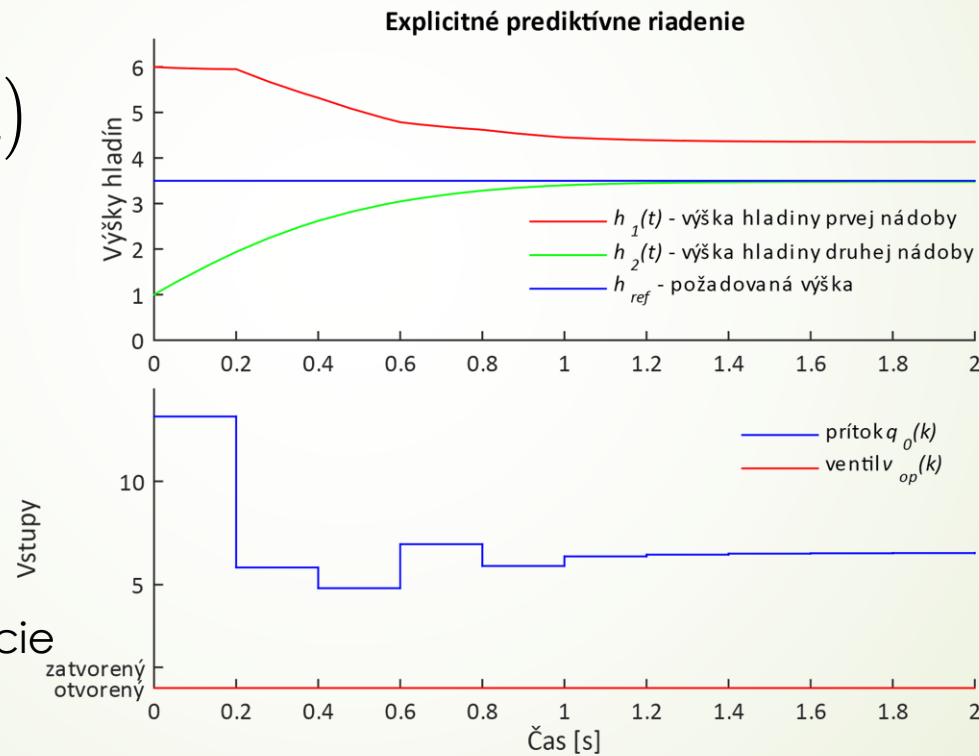
$$\text{➤ } T_{Re} = 0.2 \text{ s}$$

➤ Predikčný horizont

$$\text{➤ } N_e = 3$$

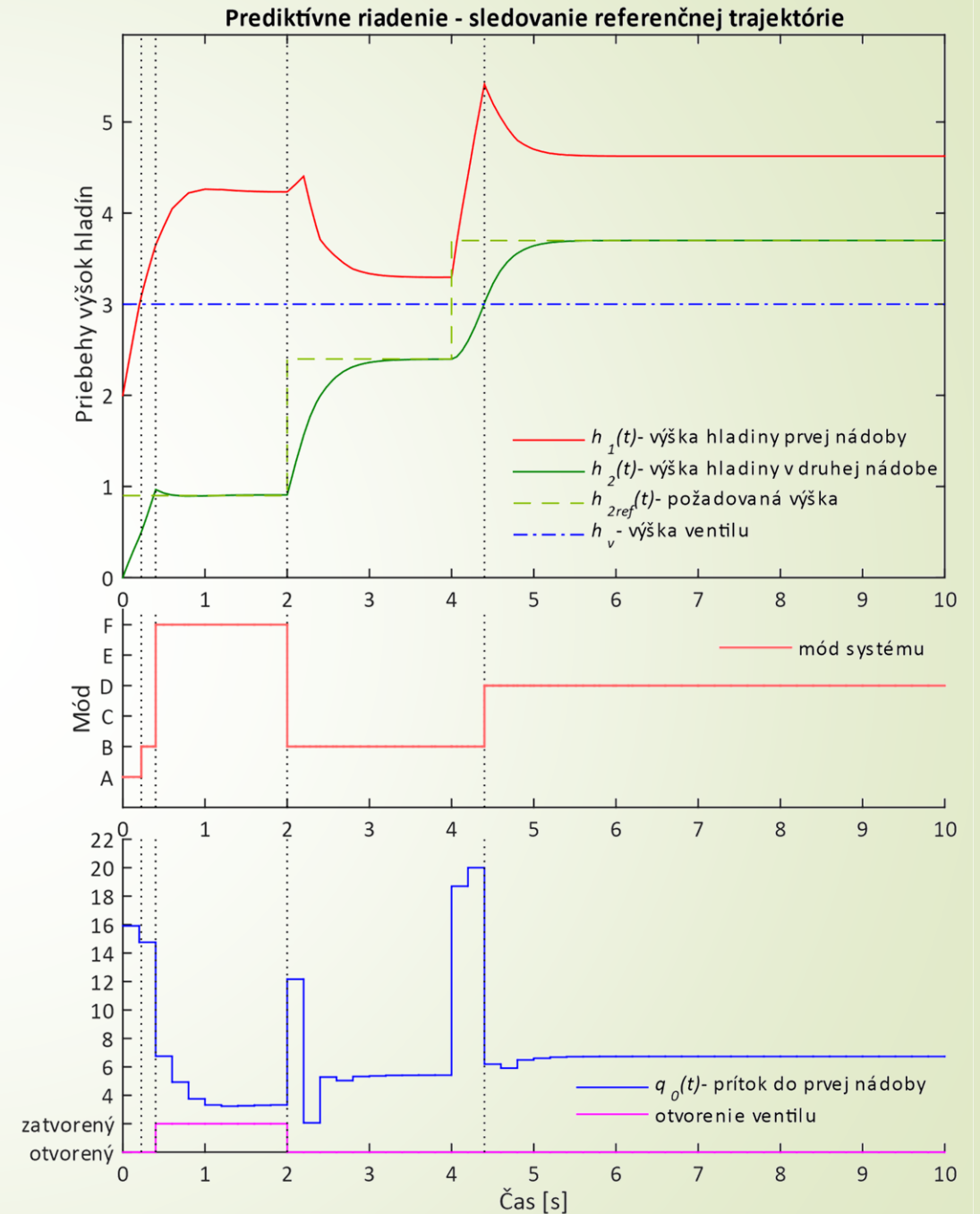
➤ Norma cenovej funkcie

➤ Kvadratická



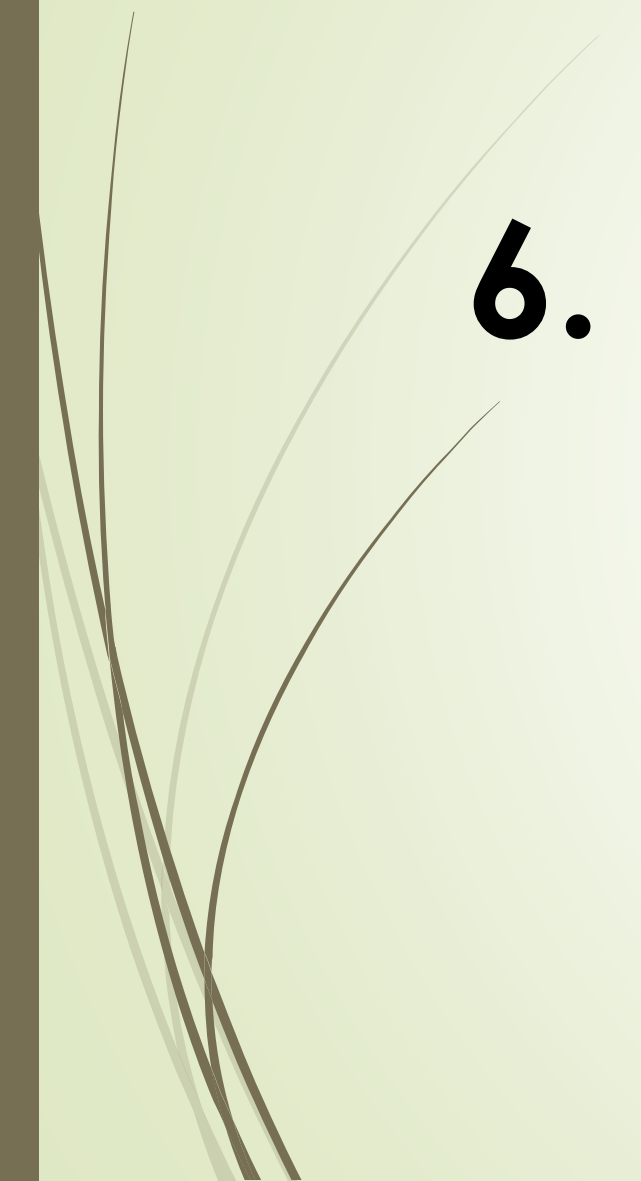

5. Prediktívne riadenie s lineárnym prediktorom

- Zvolené parametre riadenia
 - Váhové matice
 - $R_e = \begin{pmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{pmatrix}$
 - $Q_e = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
 - Perióda vzorkovania
 - $T_{Re} = 0.2 \text{ s}$
 - Predikčný horizont
 - $N_e = 4$
 - Norma cenovej funkcie
 - Lineárna



5. Výsledky prediktívneho riadenia

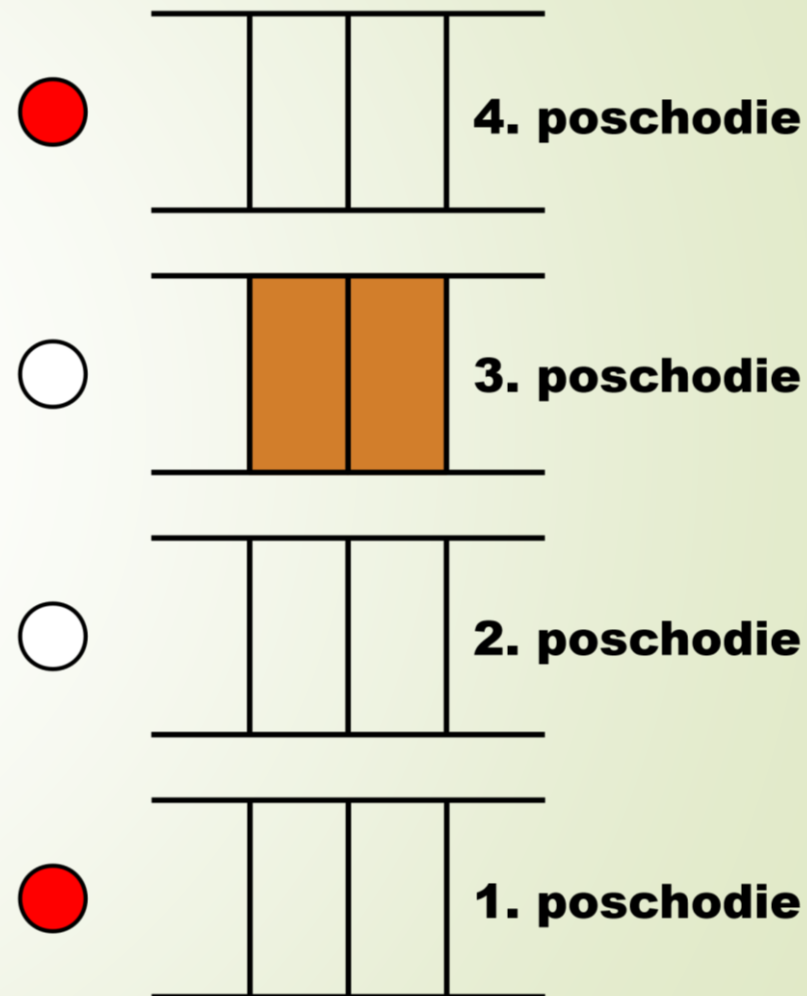
- ▶ Dokáže riadiť výšku hladiny $h_2(t)$ HHS na požadovanú hodnotu pri
 - ▶ vhodne zvolených váhových maticiach
 - ▶ perióde vzorkovania
 - ▶ obmedzeniach na vstupy a stavové premenné
 - ▶ vyriešení optimalizačného problému
- ▶ Dokáže meniť uzatvorenie ventilu (stavové riadenie nedokáže)



6. Modelová aplikácia výťahu (MAV)

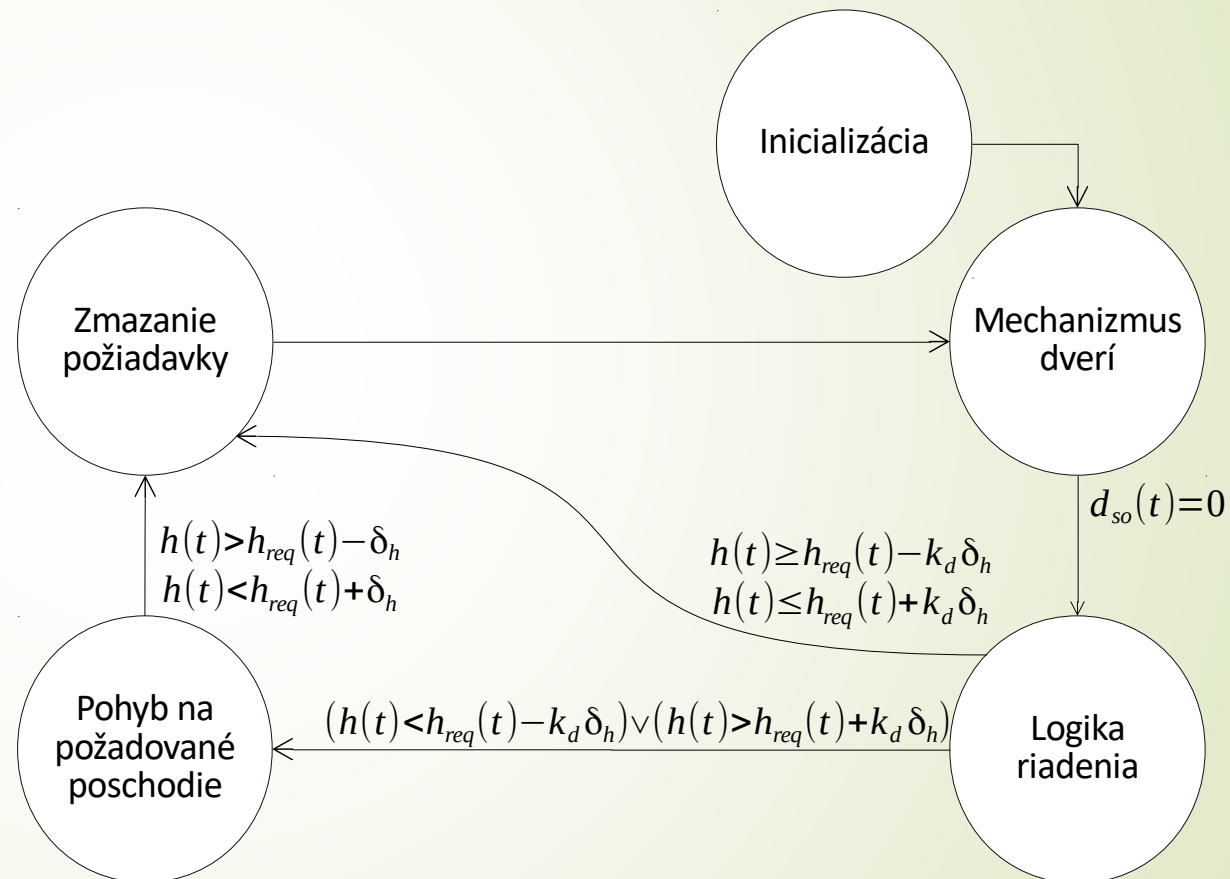
6. Modelová aplikácia výťahu (MAV)

- Navrhnutá podľa reálneho modelu výťahu
- Cieľ – vytvoriť model výťahu s požadovanou funkcionalitou
- Podstata modelu - konečný stavový automat
- Simulačná aplikácia
- Výťah so 4 poschodiami
- Ovládanie výťahu 4 tlačidlami – požiadavka príchodu na poschodie
- Dvere výťahu – otvorenie pri príchode na požadované poschodie
 - Dvere sa nezatvoria, ak sa v dverách nachádza prekážka
- Logika výťahu – výťah so zberom zhora nadol

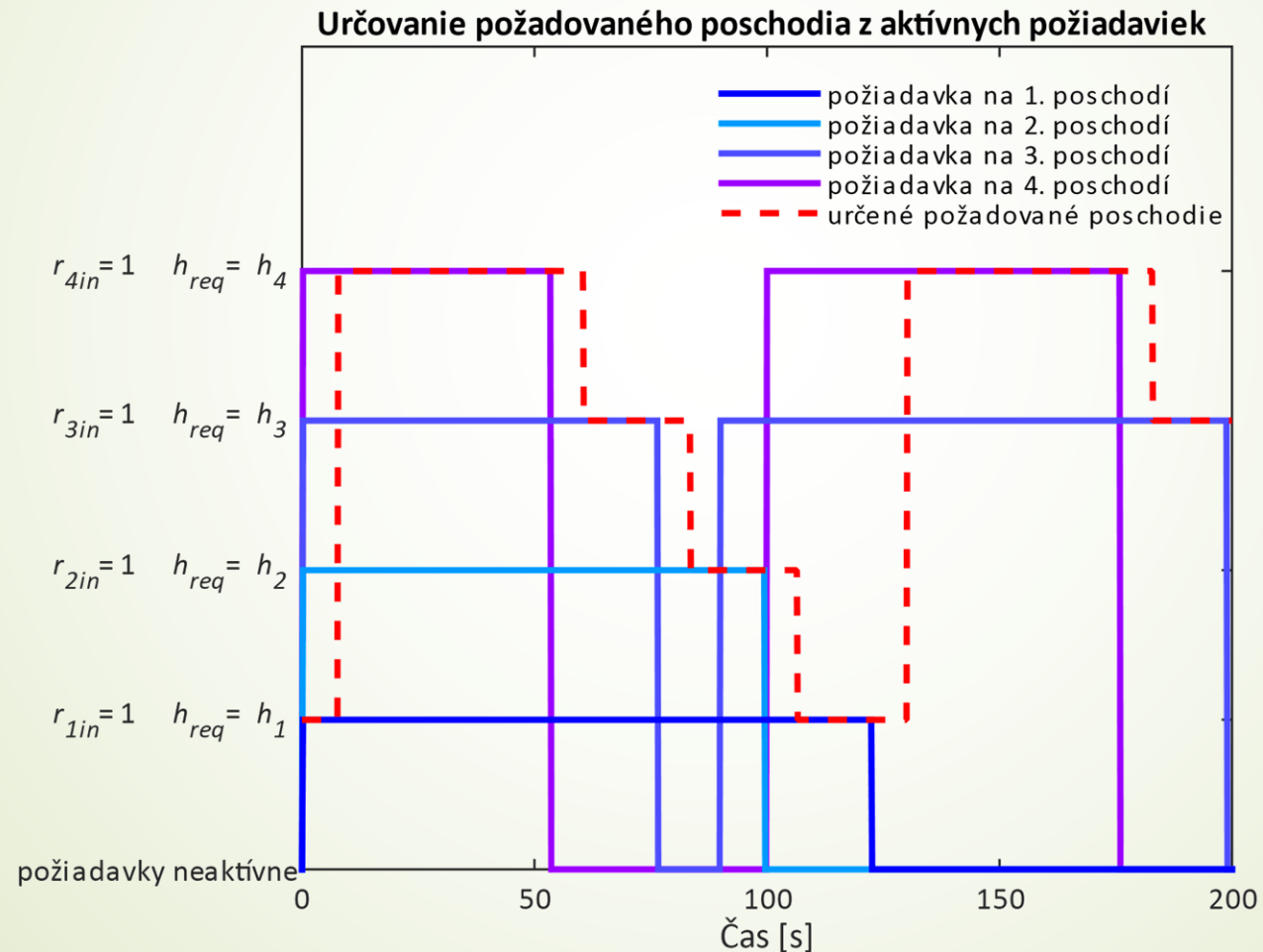


6. Graf prechodov medzi módmi MAV

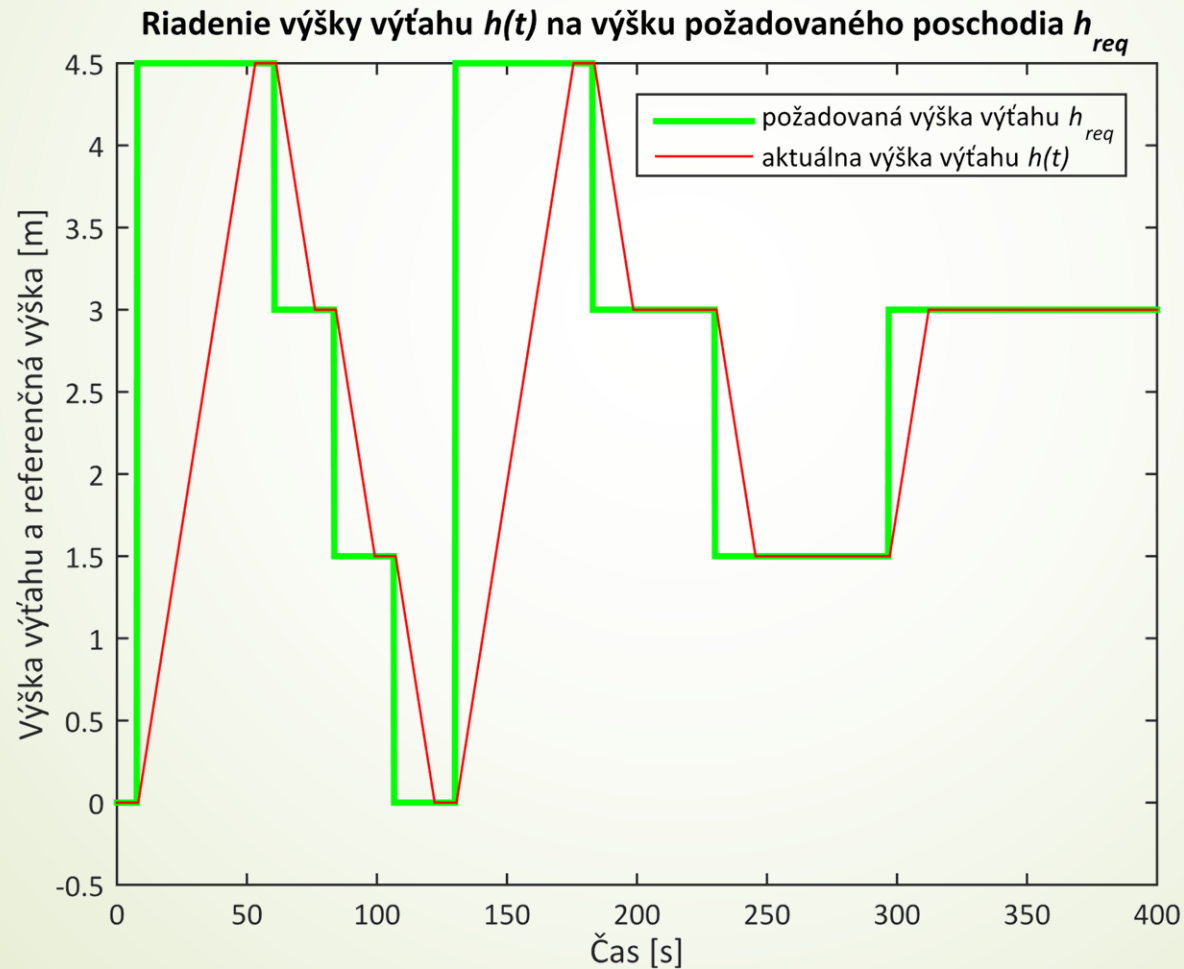
- Mechanizmus dverí
 - Otváranie a zatváranie dverí v závislosti od prekážky
- Logika riadenia
 - Zvolenie nasledujúceho požadovaného poschodia
- Pohyb na požadované poschodie
- Zmazanie požiadavky



6. Overenie funkcionality MAV – zvolenie nasledujúceho poschodia

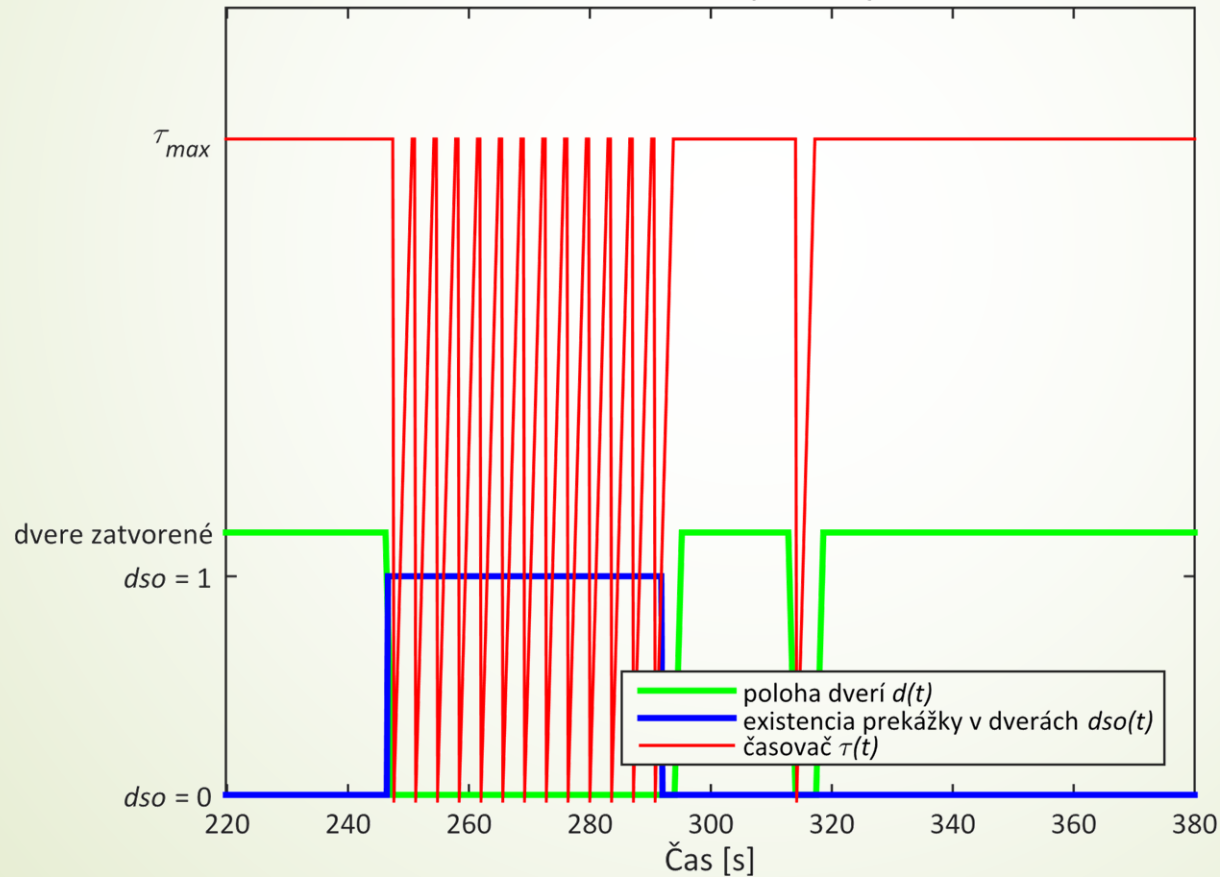


6. Overenie funkcionality MAV – požadovaná výška výtahu



6. Overenie funkcionality MAV – funkcionalita dverí

Časový priebeh polohy dverí výťahu $d(t)$ a časovača $\tau(t)$
v závislosti od existencie prekážky v dverách





7. Zhodnotenie výsledkov a prínosov bakalárskej práce

7. Zhodnotenie výsledkov a prínosov bakalárskej práce

- Vytvorenie matematických modelov HHS
- Vytvorenie grafu prechodov HHS a MAV
- Programové moduly
 - Hybridného hydraulického systému dvoch nádob v interakcii
 - Modelová aplikácia výťahu
- Implementácia navrhnutého optimálneho stavového a prediktívneho riadenia na HHS
- Vytvorenie modelovej aplikácie výťahu, ktorá môže poslúžiť pre ďalší rozvoj reálneho modelu výťahu
- Vytvorenie tutoriálu pre modelovanie hybridného hydraulického systému a pre návrh optimálneho stavového a prediktívneho riadenia v Matlabe



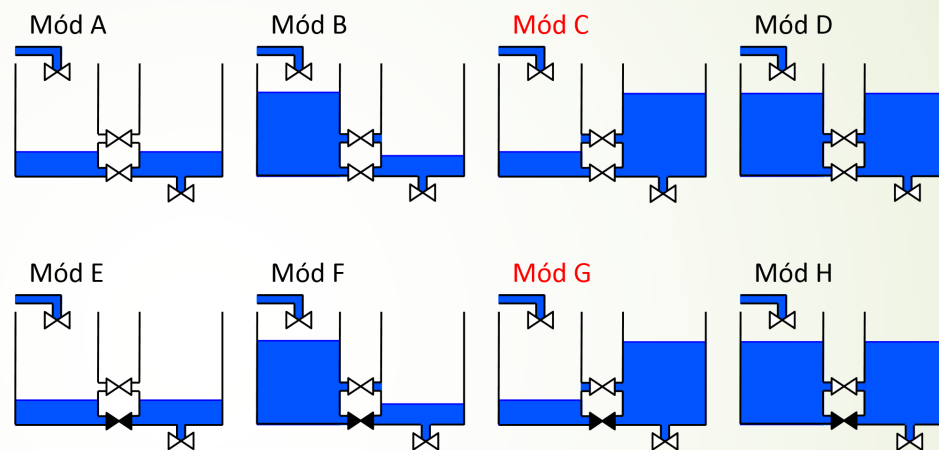
Ďakujem za pozornosť



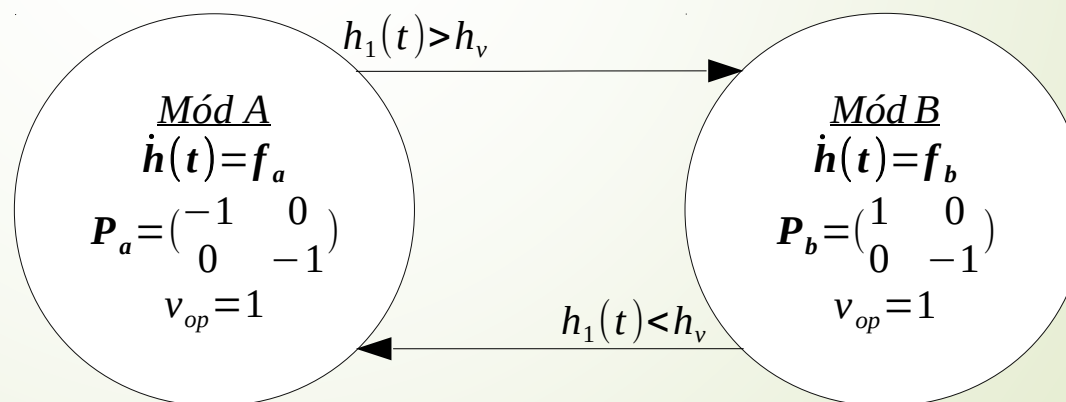
Otázky oponenta

Otázka 1: Uvedte postup pre zostavenie matematického modelu hybridného systému s viacerými dynamikami

- Postup bol nasledovný:
1. Rozlíšenie jednotlivých módov hybridného systému



2. Zostavenie grafu prechodov medzi módmi, podmienky prechodov



- Graf prechodov medzi 2 módmi

Otázka 1: Uvedte postup pre zostavenie matematického modelu hybridného systému s viacerými dynamikami

3. Zostavenie diferenciálnych rovníc pre každý mód

Mód	Vzťah
A	$\dot{h}_1(t) = \frac{q_0(t)}{S_1} - \frac{k_1 \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \sqrt{ h_1(t) - h_2(t) }}{S_1}$
	$\dot{h}_2(t) = \frac{k_1 \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \sqrt{ h_1(t) - h_2(t) }}{S_2} - \frac{k_3 \sqrt{h_2(t)}}{S_2}$

Ostatné módy v bakalárskej práci

4. Určenie/vypočítanie hodnôt premenných v ustálených stavoch

Mód	Zvolená ustálená hodnota hladiny $h_2[m]$	Vypočítaná ustálená hodnota hladiny $h_1[m]$	Vypočítaná ustálená hodnota prítoku $q_0[m^3s^{-1}]$
A	1.44	2.5425	4.2
B	2.56	3.4081	5.6
D	4.41	5.5125	7.35
F	1.96	5.6678	4.9
H	3.24	7.65	6.3

Otázka 1: Uvedte postup pre zostavenie matematického modelu hybridného systému s viacerými dynamikami

5. Lineárna aproximácia nelineárneho modelu

Mód	Matrica systému A_n pre n -tý mód
A	$\begin{pmatrix} -\frac{k_{1a}}{S_1} & \frac{k_{1a}}{S_1} \\ \frac{k_{1a}}{S_2} & -\frac{k_{1a}}{S_2} - \frac{k_{3outa}}{S_2} \end{pmatrix}$

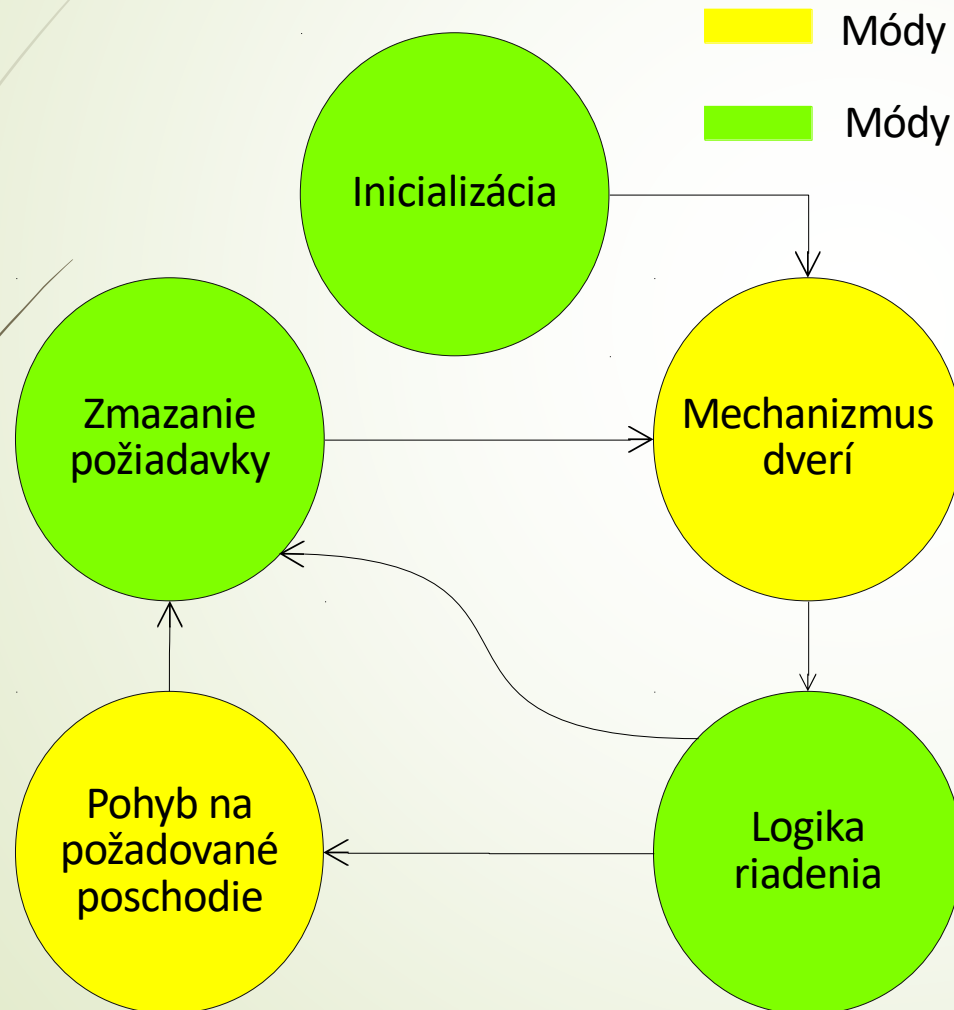
Ostatné módy v bakalárskej práci

6. Zostavenie modelu diskretného v čase

Mód	Vzťahy
A	$h_1(k+1) = T \left[-\frac{k_{1a}}{S_1} \Delta h_1(k) + \frac{k_{1a}}{S_1} \Delta h_2(k) + \frac{1}{S_1} \Delta q_0(k) \right] + h_1(k)$
	$h_2(k+1) = T \left[\frac{k_{1a}}{S_2} \Delta h_1(k) - \left(\frac{k_{1a}}{S_2} + \frac{k_{3outa}}{S_2} \right) \Delta h_2(k) \right] + h_2(k)$

Ostatné módy v bakalárskej práci

Otázka 2: Uvedte rozdiel v postupe zostavovania matematických modelov hybridného hydraulického systému a modelovej aplikácie Výťah



- HHS – zostavovanie modelu podľa predchádzajúceho postupu
- MAV
 - Model MAV – modelovaný ako konečný stavový automat
 - Niektoré módy neobsahovali žiadne diferenciálne rovnice
 - Komplexný model z hľadiska logiky prechodov medzi módmí

Otázka 3: Vo vytvorenom simulačnom modeli hydraulického systému s hybridnou dynamikou uvažujete obmedzenie (saturáciu) vstupu?

- ▶ Model – saturácia vstupu

$$q_0(t) \geq 0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$$
$$q_0(t) \leq 20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$$

- ▶ Optimálne stavové riadenie
 - ▶ Pri malých hodnotách matice Q vstup neprekročil hodnotu saturácie
- ▶ Prediktívne riadenie
 - ▶ Saturácia bola prekročená pri explicitnom riadení pri skokovitej zmene požadovanej výšky hladiny

Otázka 4: Okrem použitých softvérových nástrojov, ktoré sú uvedené v posudku, uveďte aspoň dva ďalšie, ktoré sú vhodné pre modelovanie a simuláciu hybridných systémov

► Použité nástroje

- MPT + HYSDEL
- Stateflow

► Ďalšie nástroje

- Charon
- Ptolemy
- HyTech
- HyVisual
- Hybrid Equations (HyEQ) Toolbox
- ... iné ...