

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a umelej inteligencie

Simulačné systémy v mobilnej robotike - riešenie úloh riadenia, navigácie a sledovania trajektórie v rámci aplikácií mobilnej robotiky

Bakalárska práca

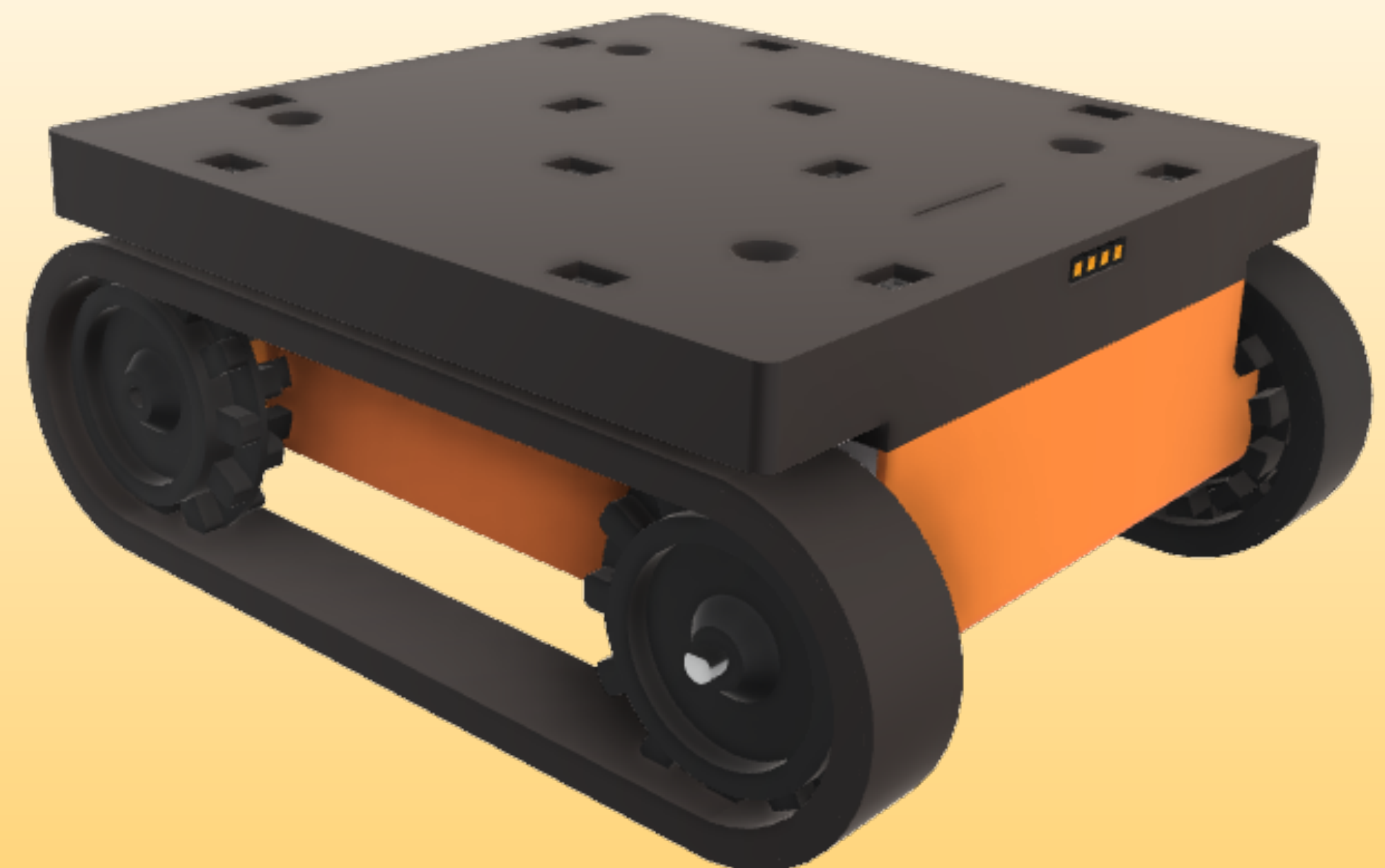
Autor: Dominika Líšková

Školiteľ: doc. Ing. Anna Jadlovská, PhD.

Konzultant: Ing. Milan Tkáčik

Dátum: 21.6.2022

Košice



Ciele práce

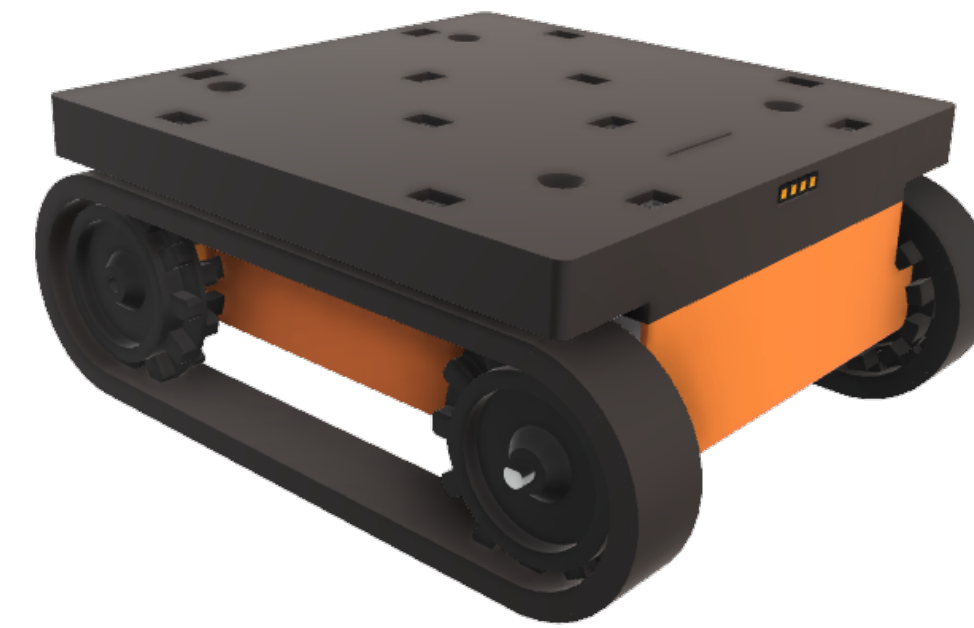
- Spracovanie prehľadu pracoviska mobilnej robotiky a simulačných nástrojov
- Riešenie vybraných úloh z mobilnej robotiky formou prípadových štúdií:
 - Modelovanie laboratórneho modelu ModBot
 - Návrh riadenia robota v rámci aplikácií mobilnej robotiky so simulačným overením
 - Implementácia navrhnutých algoritmov riadenia na laboratórny model ModBot
- Vypracovanie aplikácie vo forme programových modulov pre riešenie prípadové štúdie

Obsah prezentácie

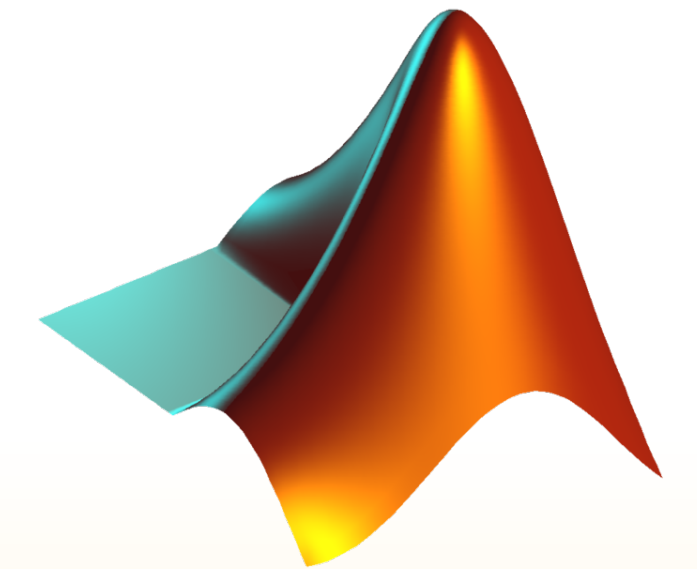
I. Laboratórny model ModBot

- A. Prípadová štúdia 1 - *Modelovanie*
- B. Prípadová štúdia 2 - *Návrh riadenia*
- C. Prípadová štúdia 3 - *Implementácia*

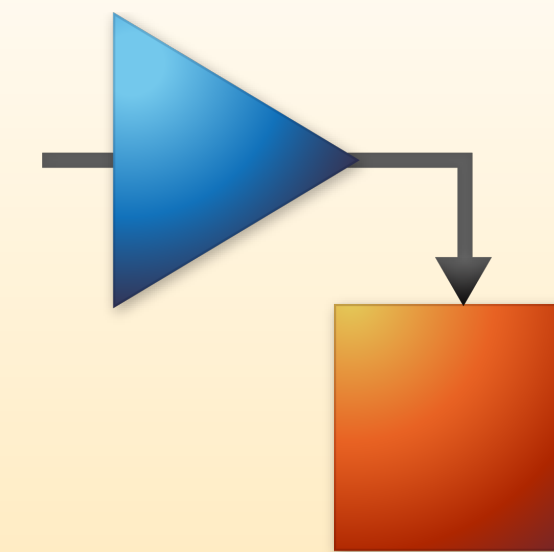
II. Zhodnotenie výsledkov



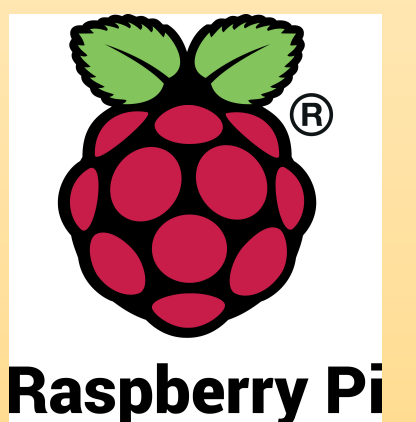
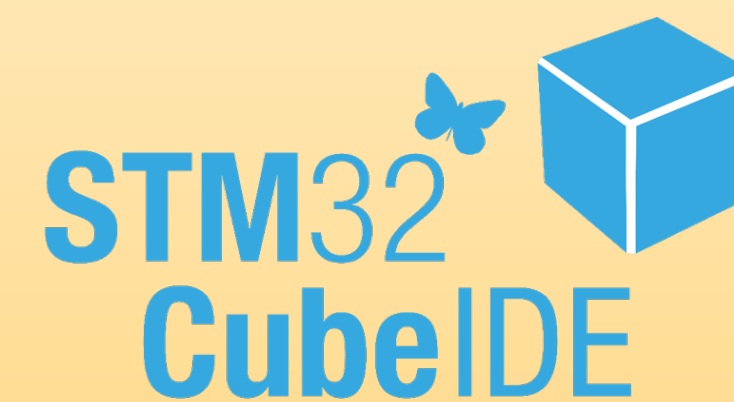
MODBOT



MATLAB



SIMULINK

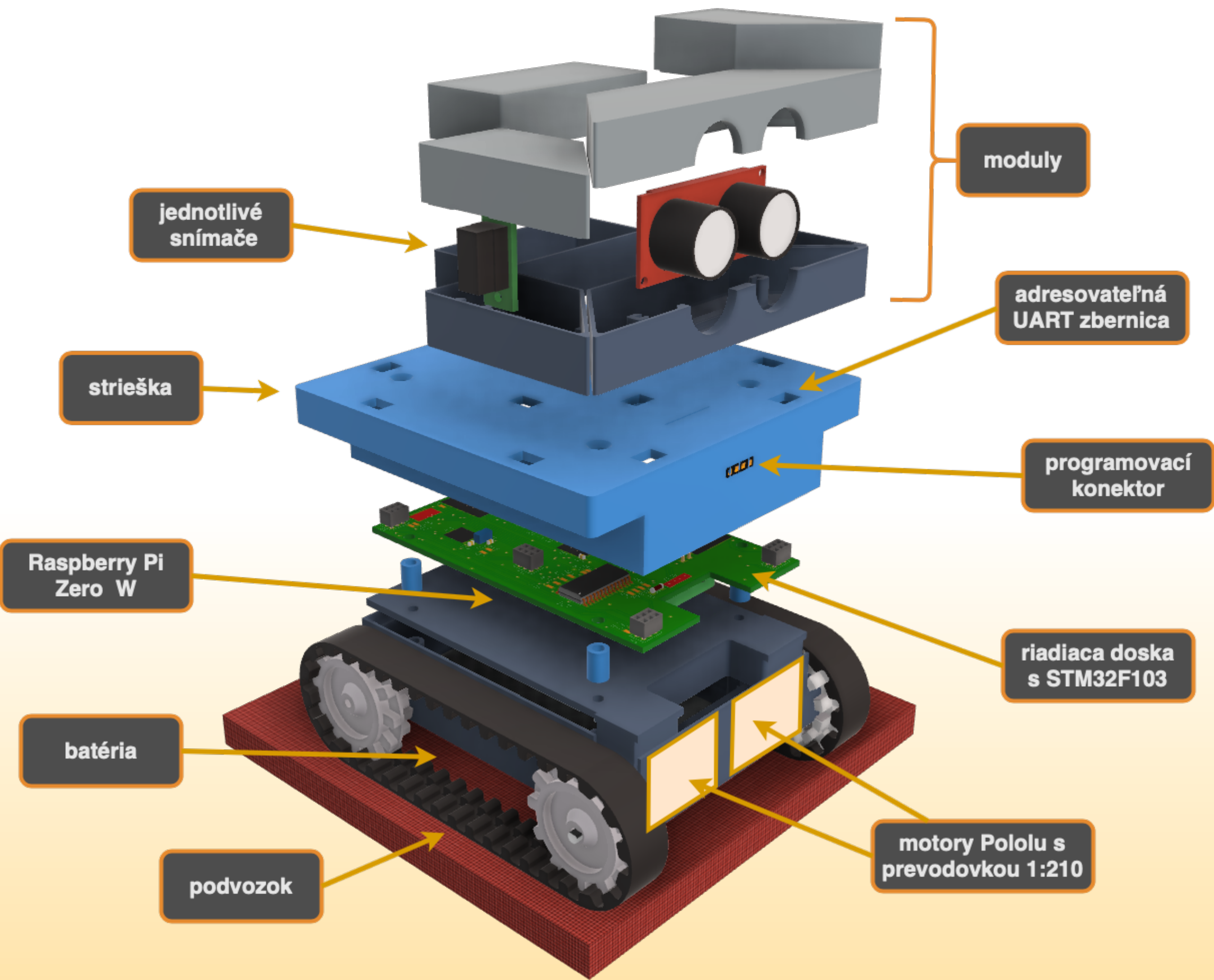


I. ModBot

Popis modelu

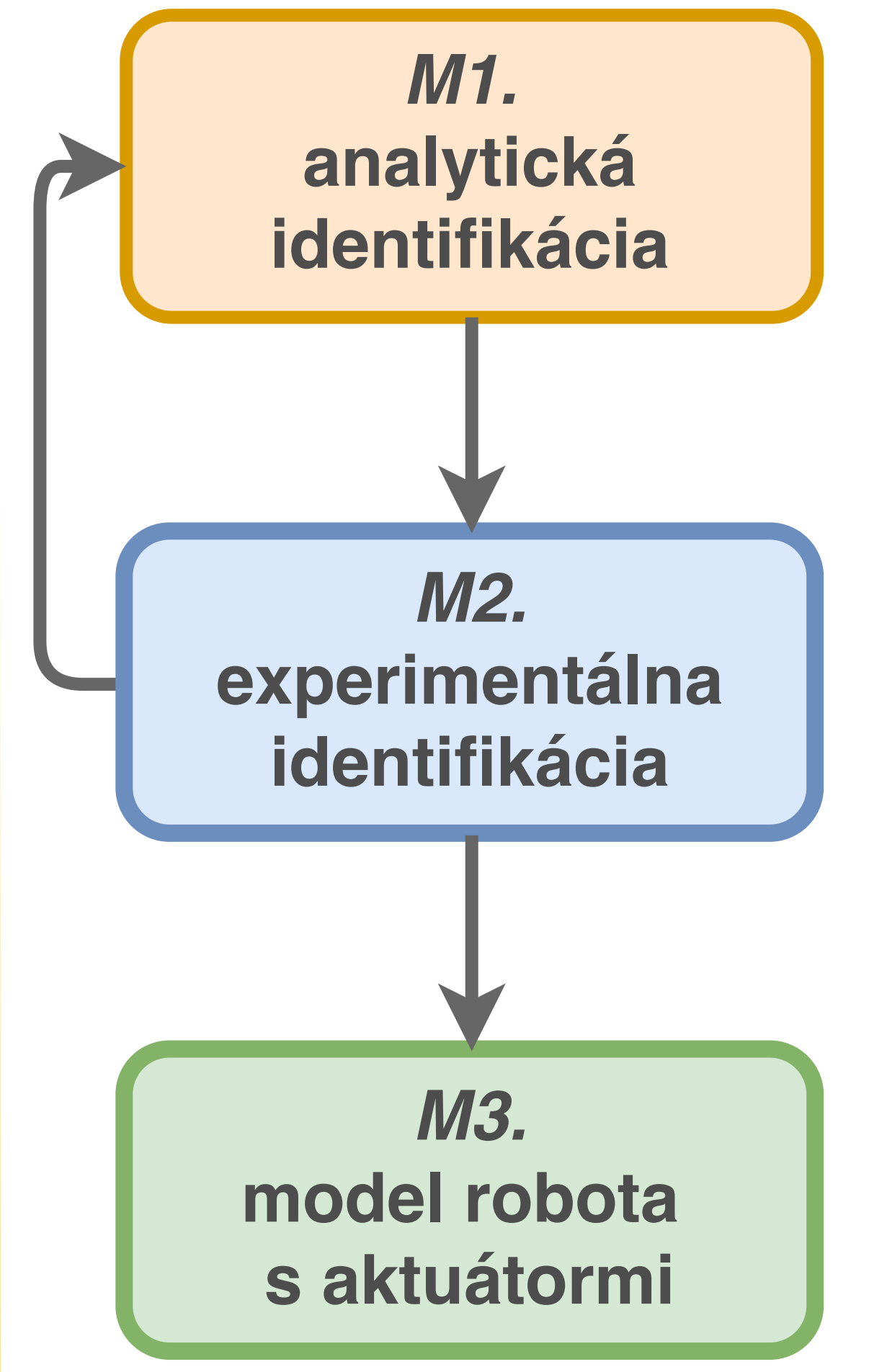
Parameter	Označenie	Rozmer
Polomer kolesa	r	m
Rozchod kolies	L	m
Polomer oblúka	R_c	m
Hmotnosť robota	m	m
Polohový vektor	q	m
Súradnice ťažiska	x, y, φ	m, rad
Súradnice robota	X_R, Y_R	m
Globálny SS	X_G, Y_G, O_G	m

Tab. 1 - Parametre modelu mobilného robota



Obr.1 - ModBot

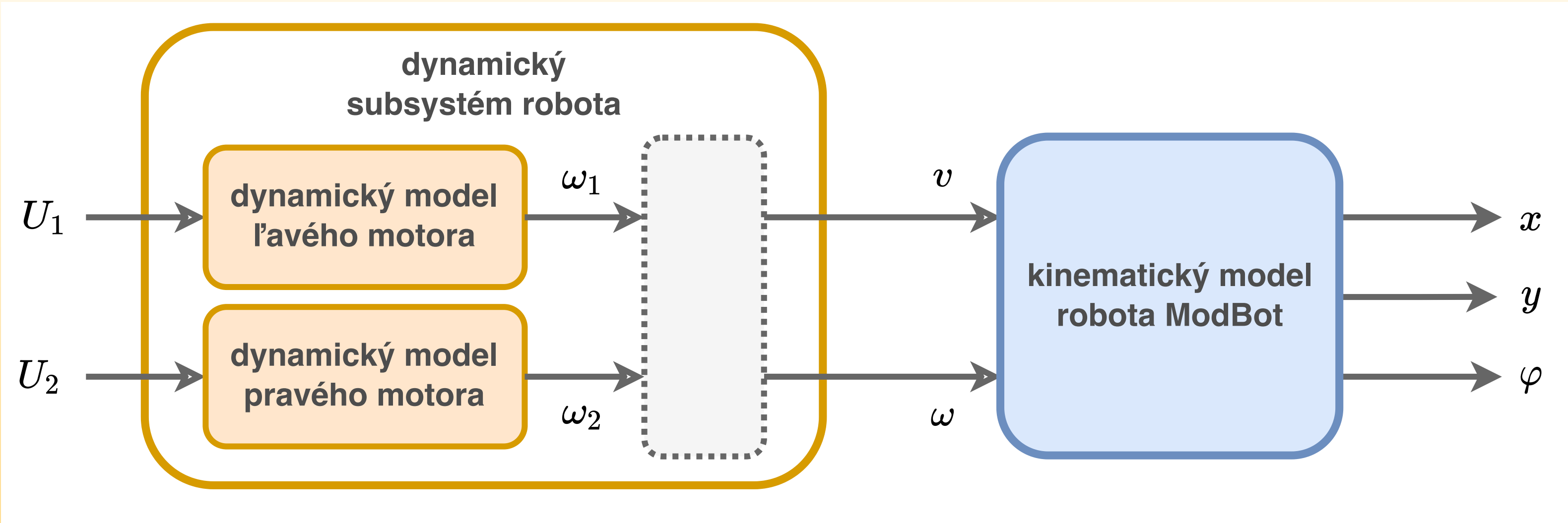
A. Prípadová štúdia 1 - Modelovanie



Obr. 2 - Metodika pre modelovanie robota

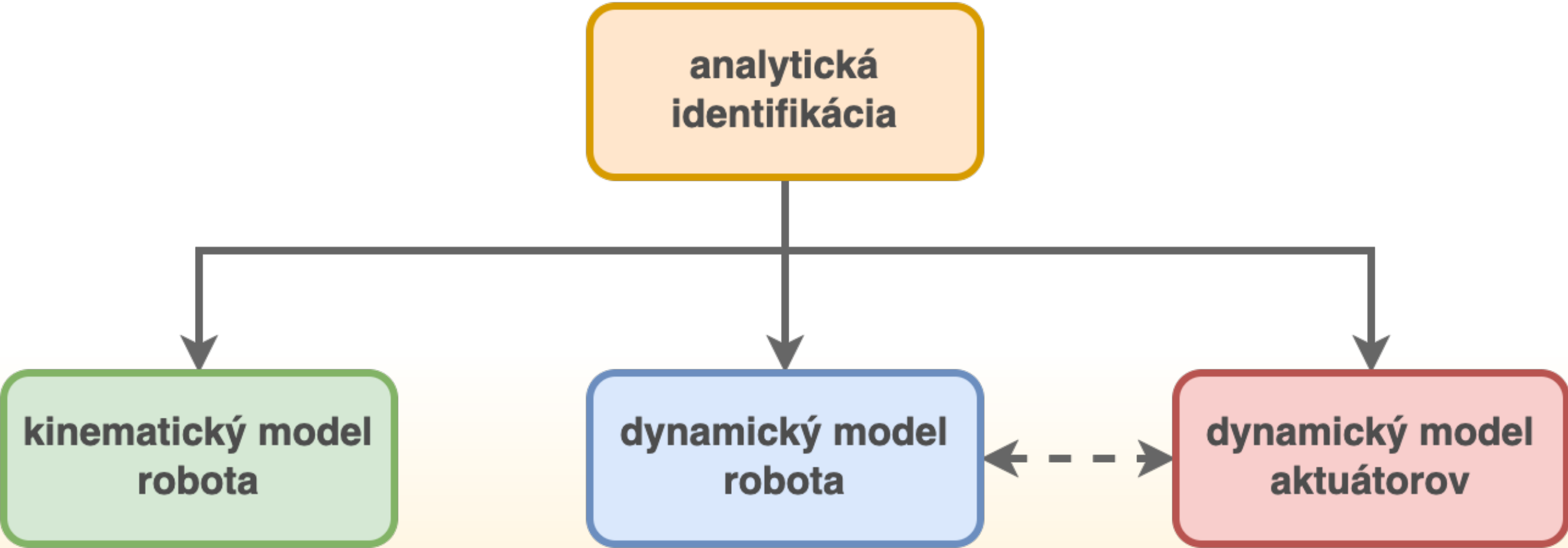
Veličina	Označenie	Rozmer
Napätie	$U(t)$	V
Lineárna rýchlosť	$v(t)$	m/s
Uhlová rýchlosť	$\omega(t)$	rad/s

Tab.2 - Fyzikálne veličiny modelu MR



Obr. 3 - Schéma modelu mobilného robota

A. / Modul 1 - Analytická identifikácia

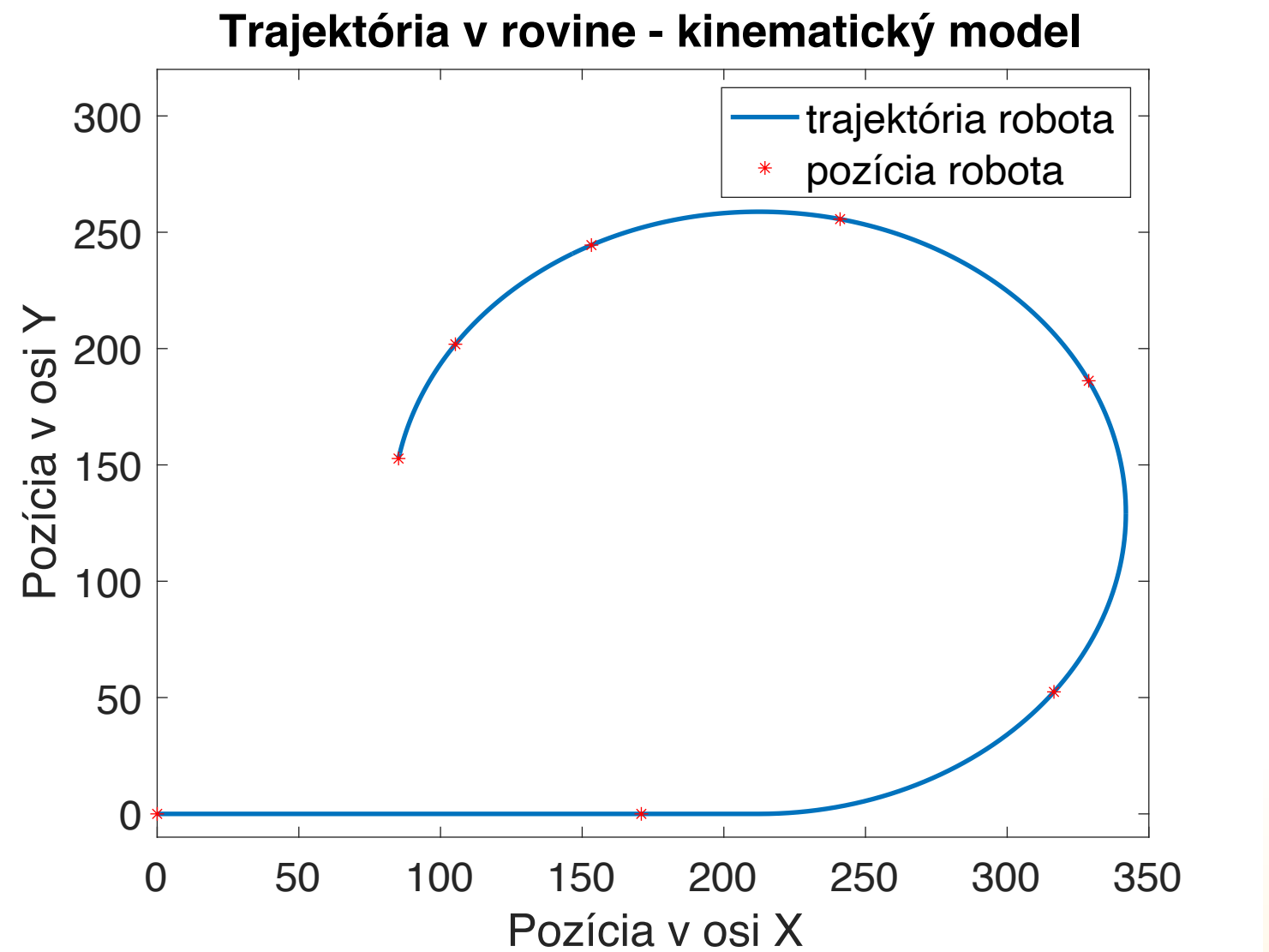


Metodika analytickej identifikácie

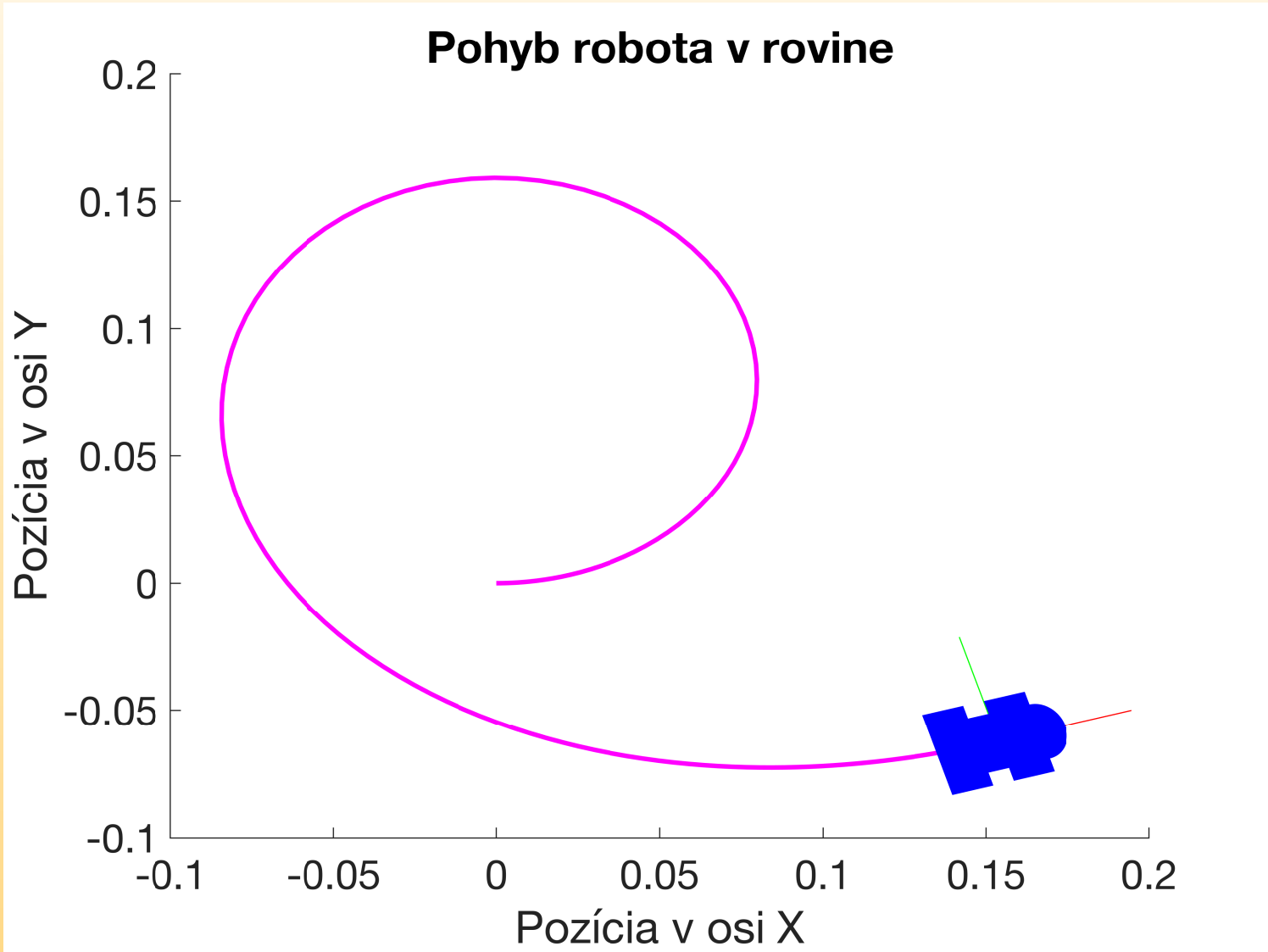
$$\dot{q} = S(q)\eta = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{L}{2} & -\frac{L}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_R \\ F_L \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_v}{L_r} & -\frac{\frac{60}{2\pi}k_e N}{L_r} \\ \frac{Nk_\tau}{J_{z_ekv}} & -\frac{B_{z_ekv}}{J_{z_ekv}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_r} \\ 0 \end{bmatrix} u_m$$



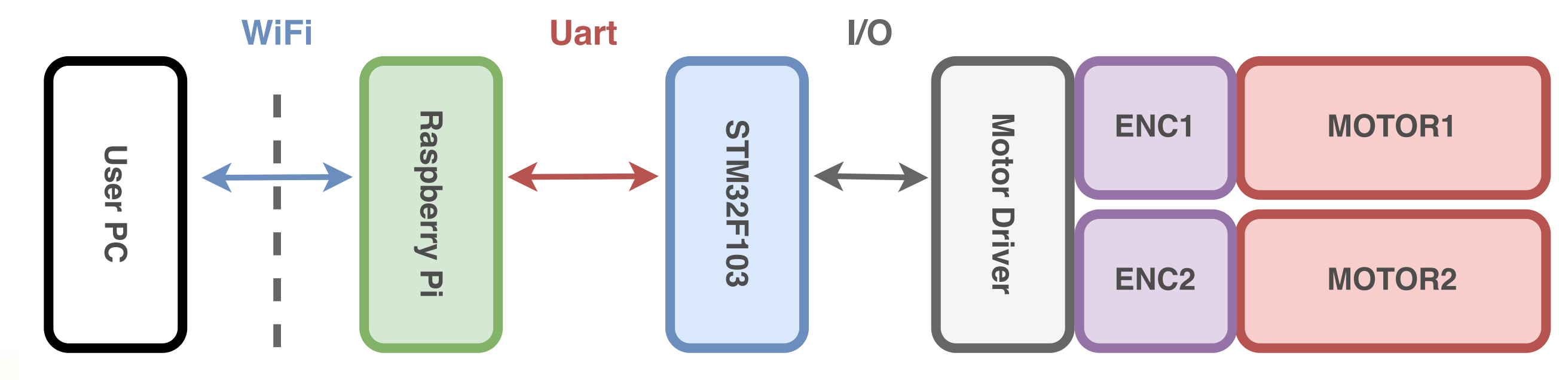
Obr. A



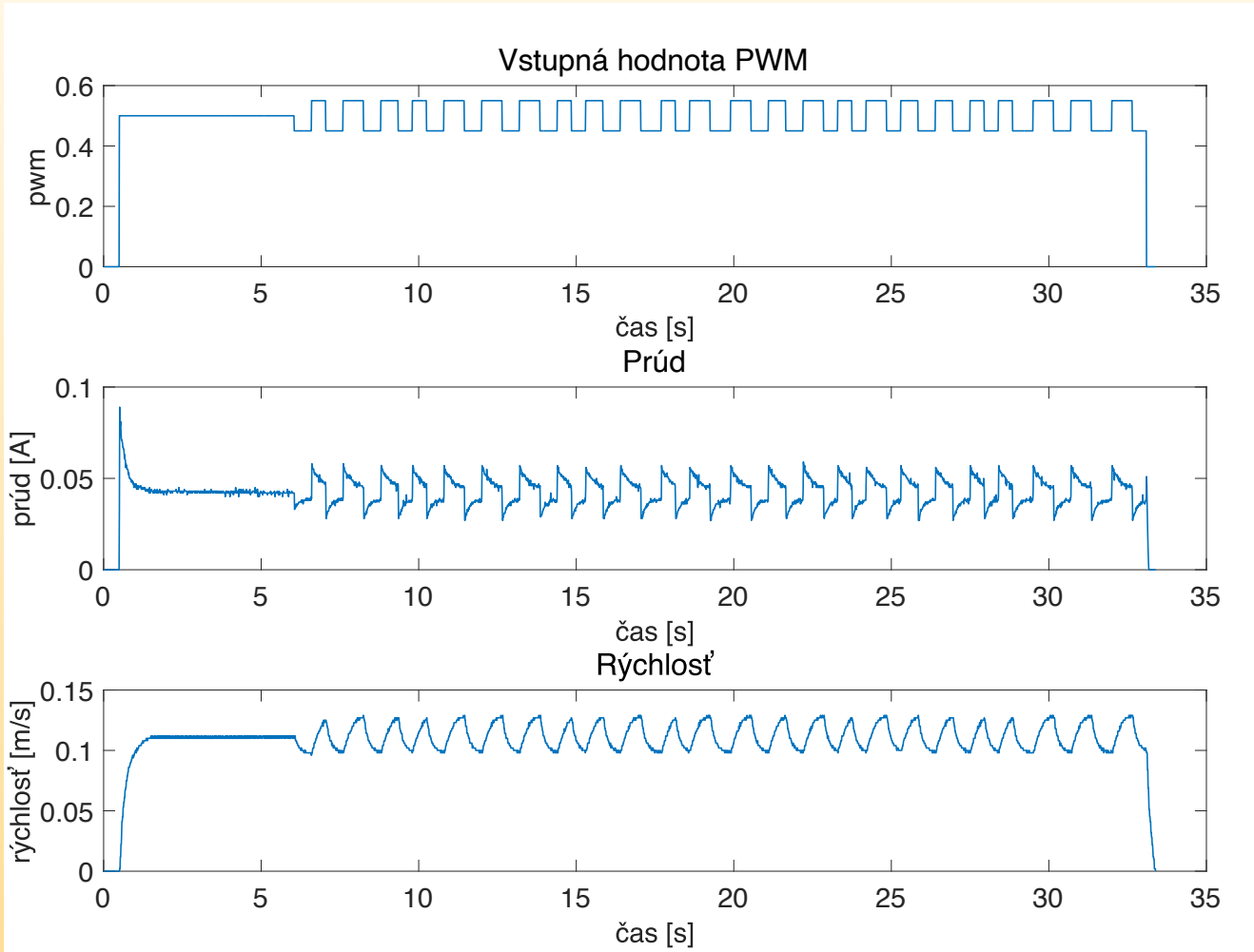
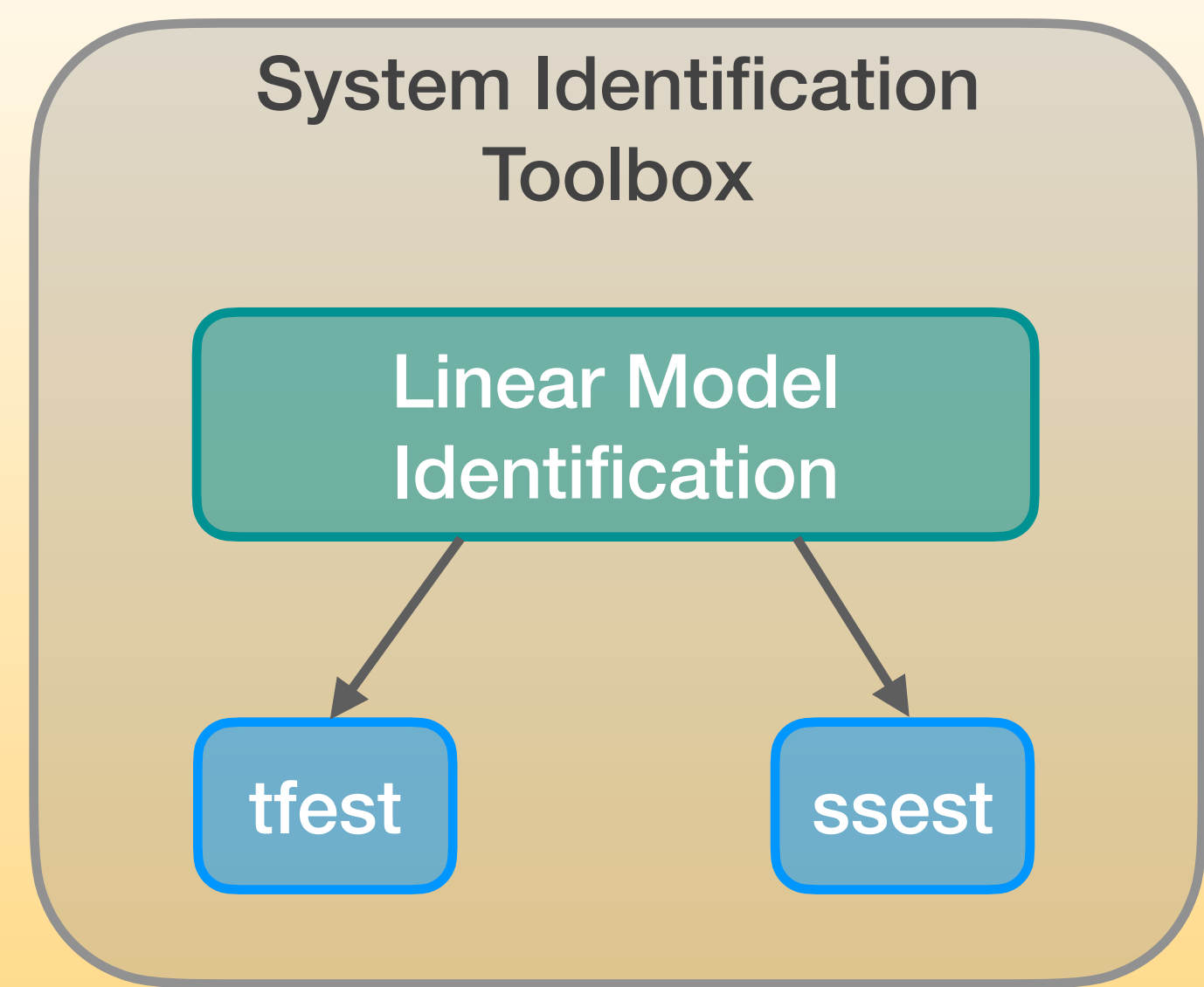
Obr. B

A. / Modul 2 - Experimentálna identifikácia

Parametre DC motora



Obr. 4 - Bloková schéma pre experimentálnu identifikáciu



Obr. 5 - Namerané dáta

Parameter / veličina	Označenie	Rozmer
Autoindukcia vinutia rotora	L_r	H
Odpor na svorkách motora	R_v	Ω
Spätnomotorické napätie	k_e	V/min
Konštanta motora - točivý moment	k_r	Nm/A
Moment zotrvačnosti motora	J_r	$kg \cdot m^2$
Koeficient viskózneho trenia	B_r	Nms
Točivý moment	τ	Nm
Uhlová rýchlosť	$\dot{\theta}$	rad/s
Prúd vo vinutí	i_v	A
Napätie motora	u_m	V

Tab.3 - Parametre a fyzikálne veličiny DC motora

A. / Modul 3 - Model robota

V / V
model

$$F_{\Omega(s)/U(s)} = \frac{Nk_{\tau}}{J_{z_ekv}L_r s^2 + (J_{z_ekv}R_v + B_{z_ekv}L_r)s + (B_{z_ekv}R_v + \frac{60}{2\pi}N^2k_e k_{\tau})}$$

SS
model

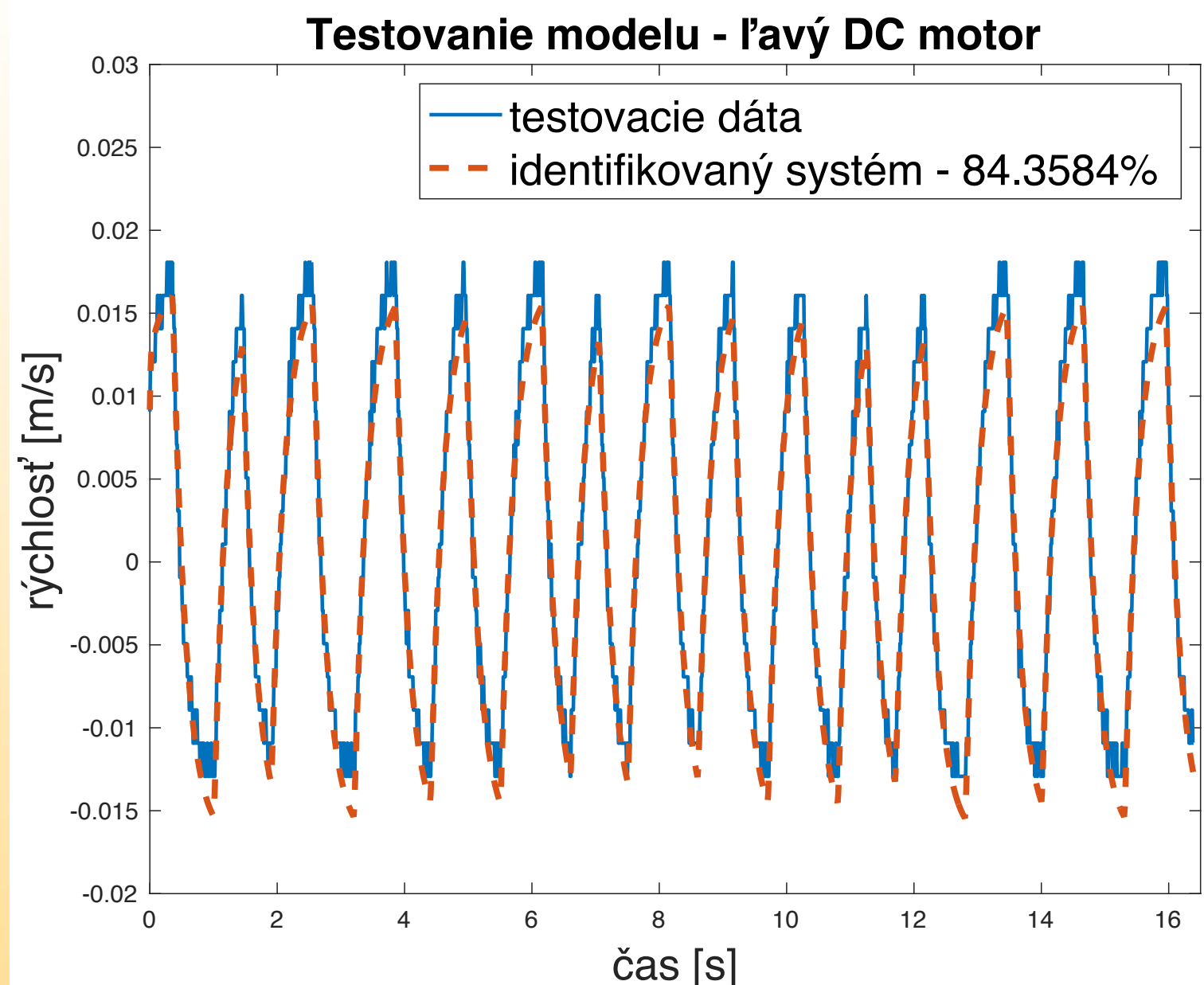
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_v}{L_r} & -\frac{\frac{60}{2\pi}k_e N}{L_r} \\ \frac{Nk_{\tau}}{J_{z_ekv}} & -\frac{B_{z_ekv}}{J_{z_ekv}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_r} \\ 0 \end{bmatrix} u_m$$

$$\begin{aligned} a_0 &= 1 \\ a_1 &= 85.98 \\ a_2 &= 441.2 \end{aligned}$$

Pravý motor

$$\begin{aligned} a_0 &= 1 \\ a_1 &= 107.3 \\ a_2 &= 495.9 \end{aligned}$$

Ľavý motor



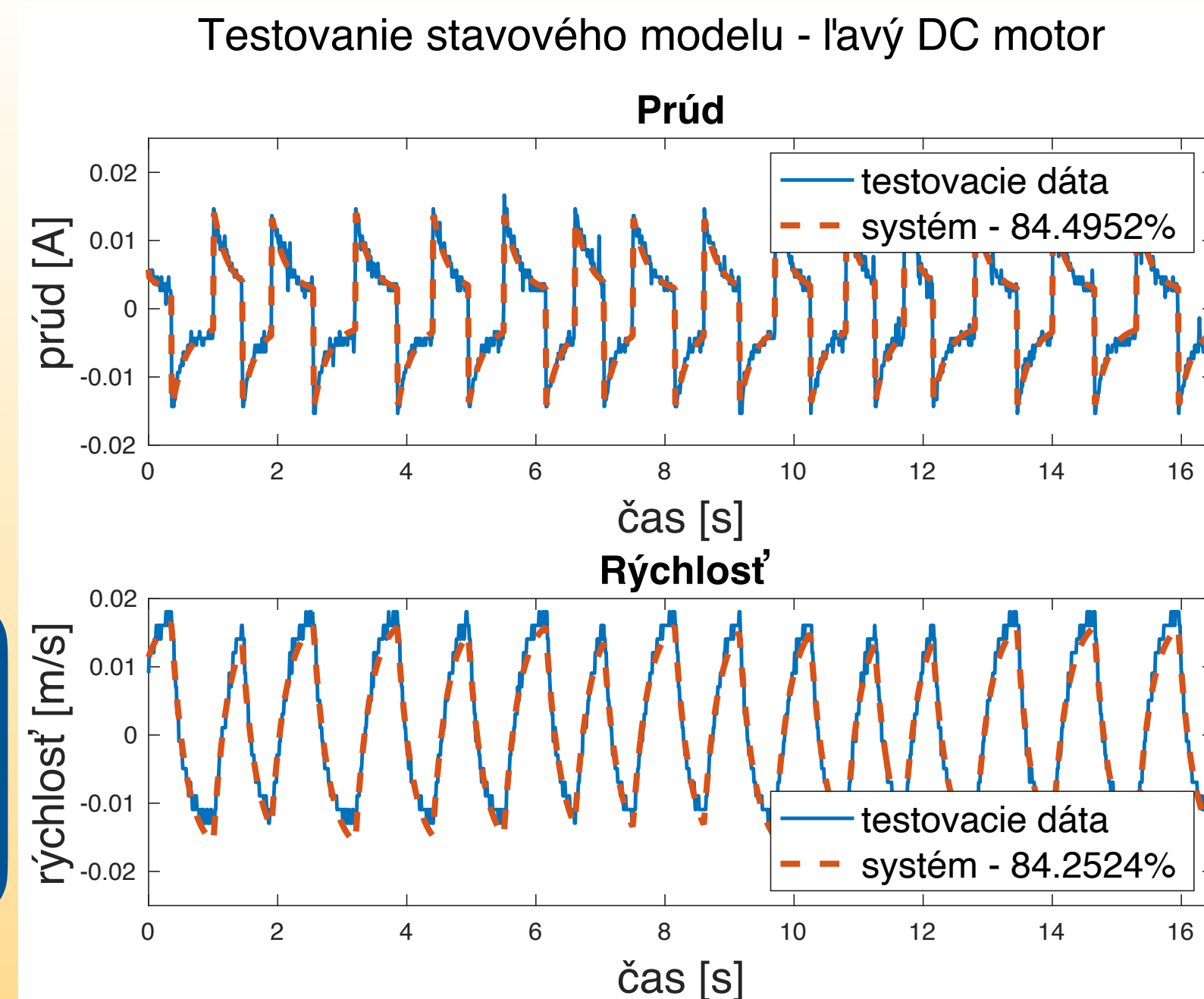
Obr. 5

$$A = \begin{bmatrix} -272.6 & -111.8 \\ 8.242 & -1.29 \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} 6.518 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pravý motor

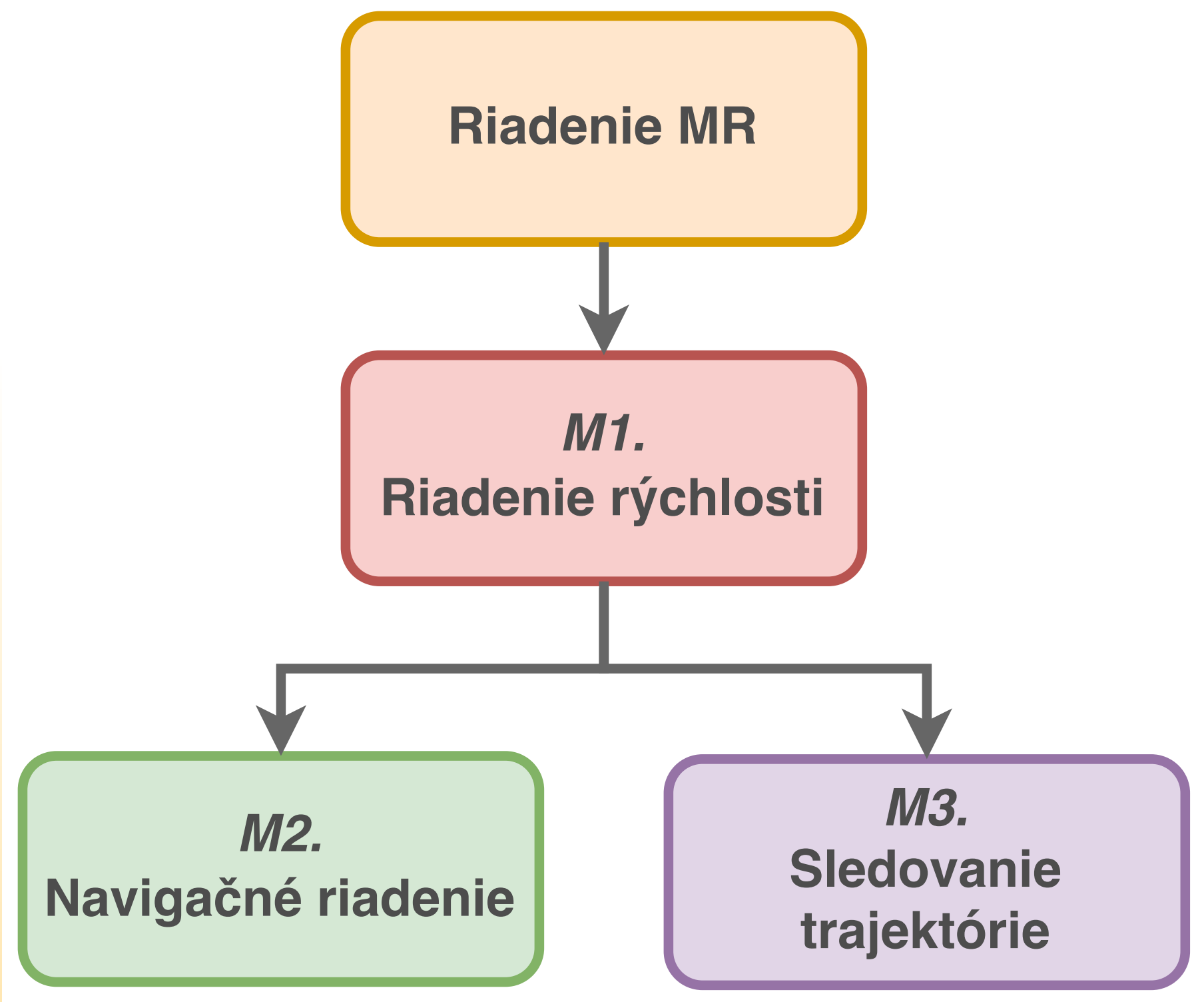
$$A = \begin{bmatrix} -398.1 & -145.3 \\ 8.836 & -1.207 \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} 8.548 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ľavý motor

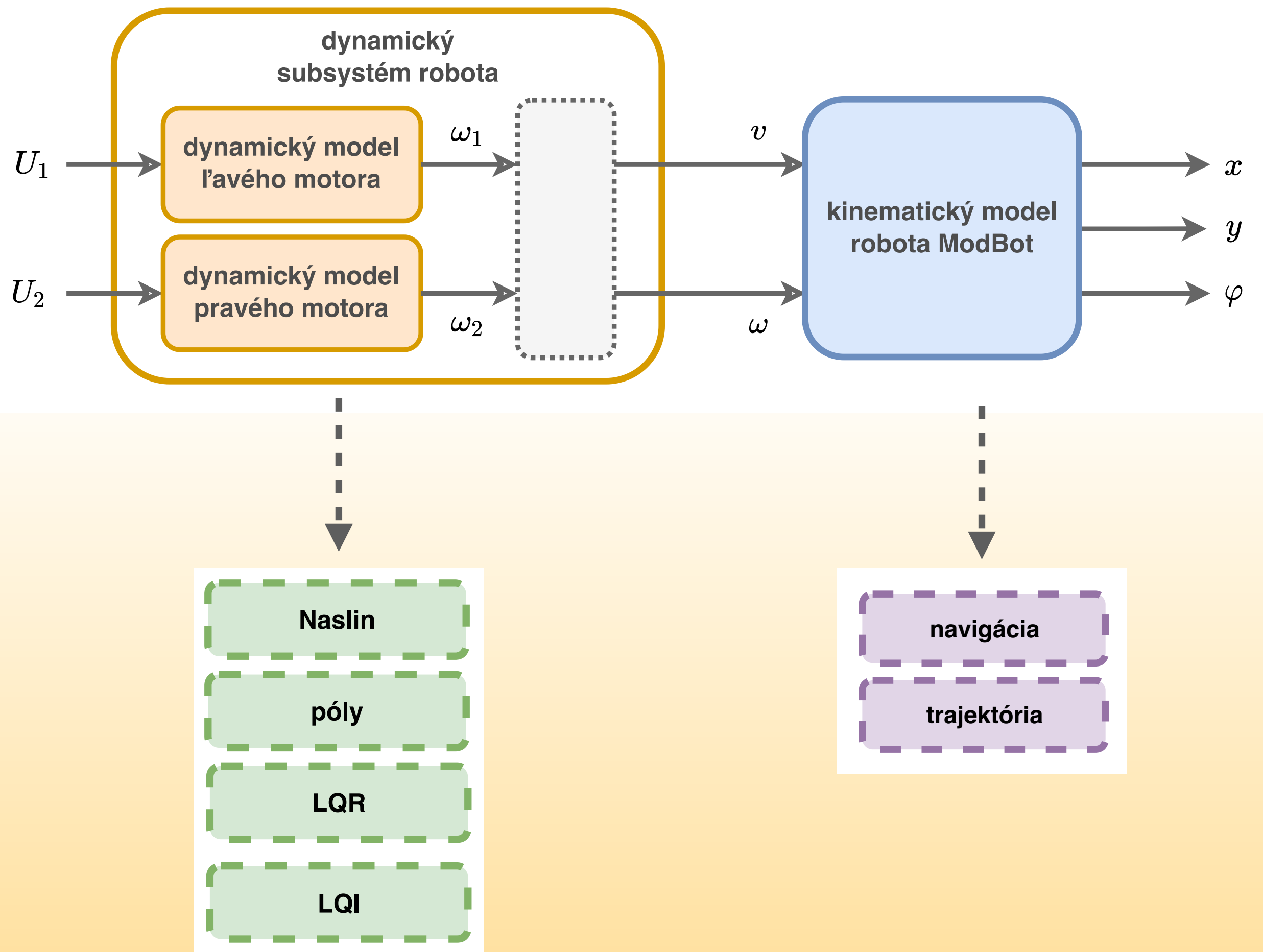


Obr. 6

B. Prípadová štúdia 2 - Návrh riadenia

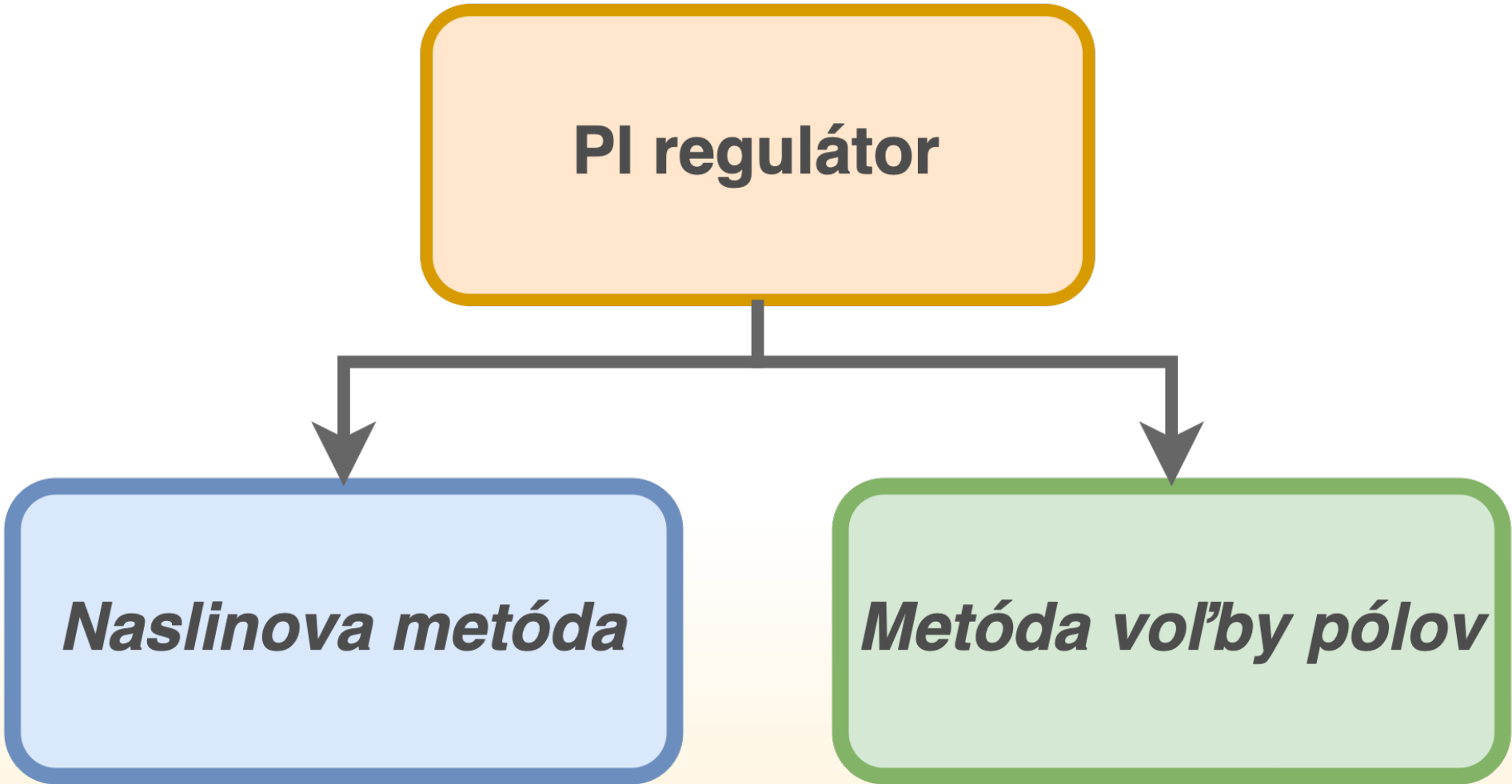


Obr. 7 - Metodika riadenia MR

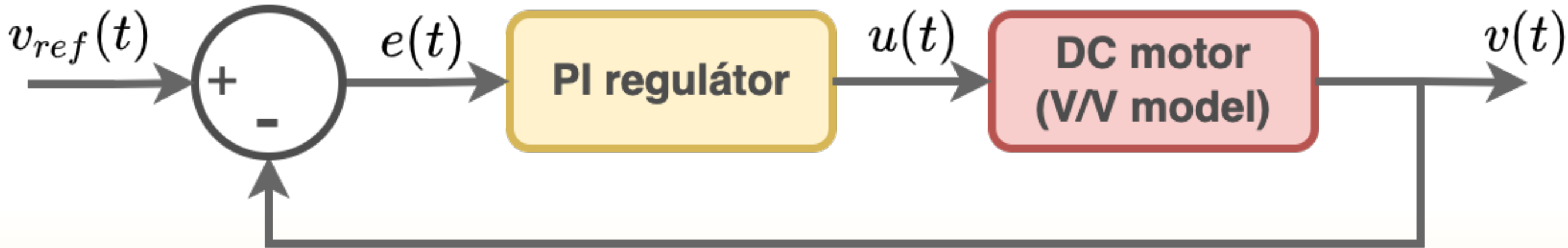


Obr. 8 Schéma MR s navrhnutými metódami riadenia

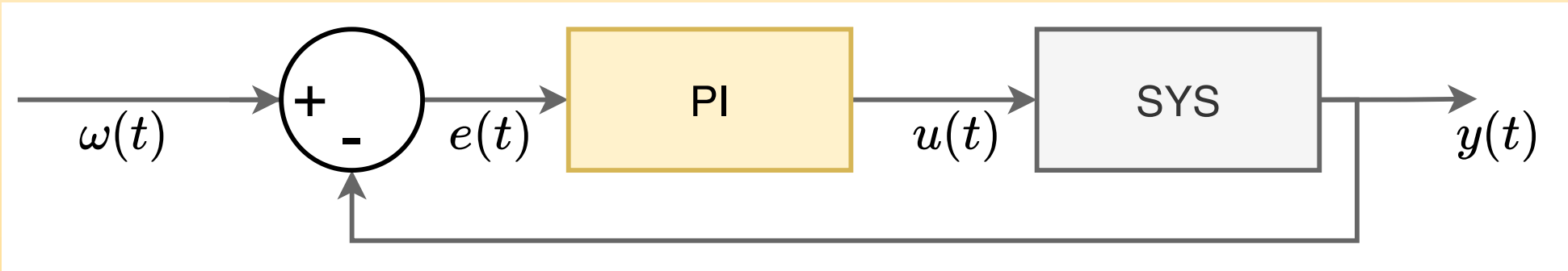
B. / Modul 1.1 - Riadenie rýchlosti aktuátorov



Obr. 9 - Metódy syntézy PI regulátorov



Obr. 11 - Riadenie aktuátora



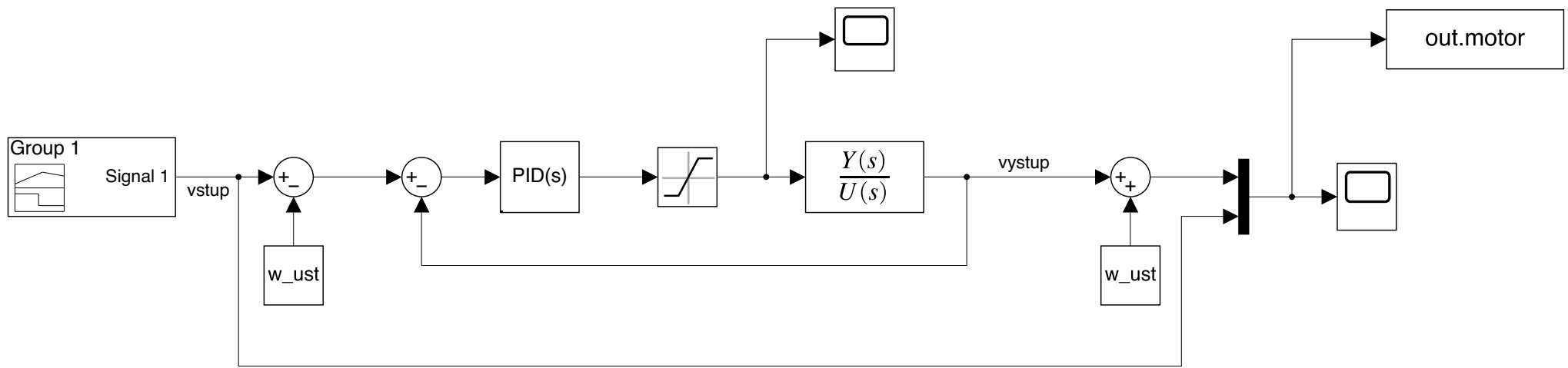
Obr. 10 - Schéma riadiacej štruktúry pre PI

Názov	Označenie
Riadiaca veličina	$\omega(t)$
Regulačná odchýlka	$e(t)$
Akčný zásah	$u(t)$
Regulovaná veličina	$y(t)$
Stavový vektor	$x(t)$

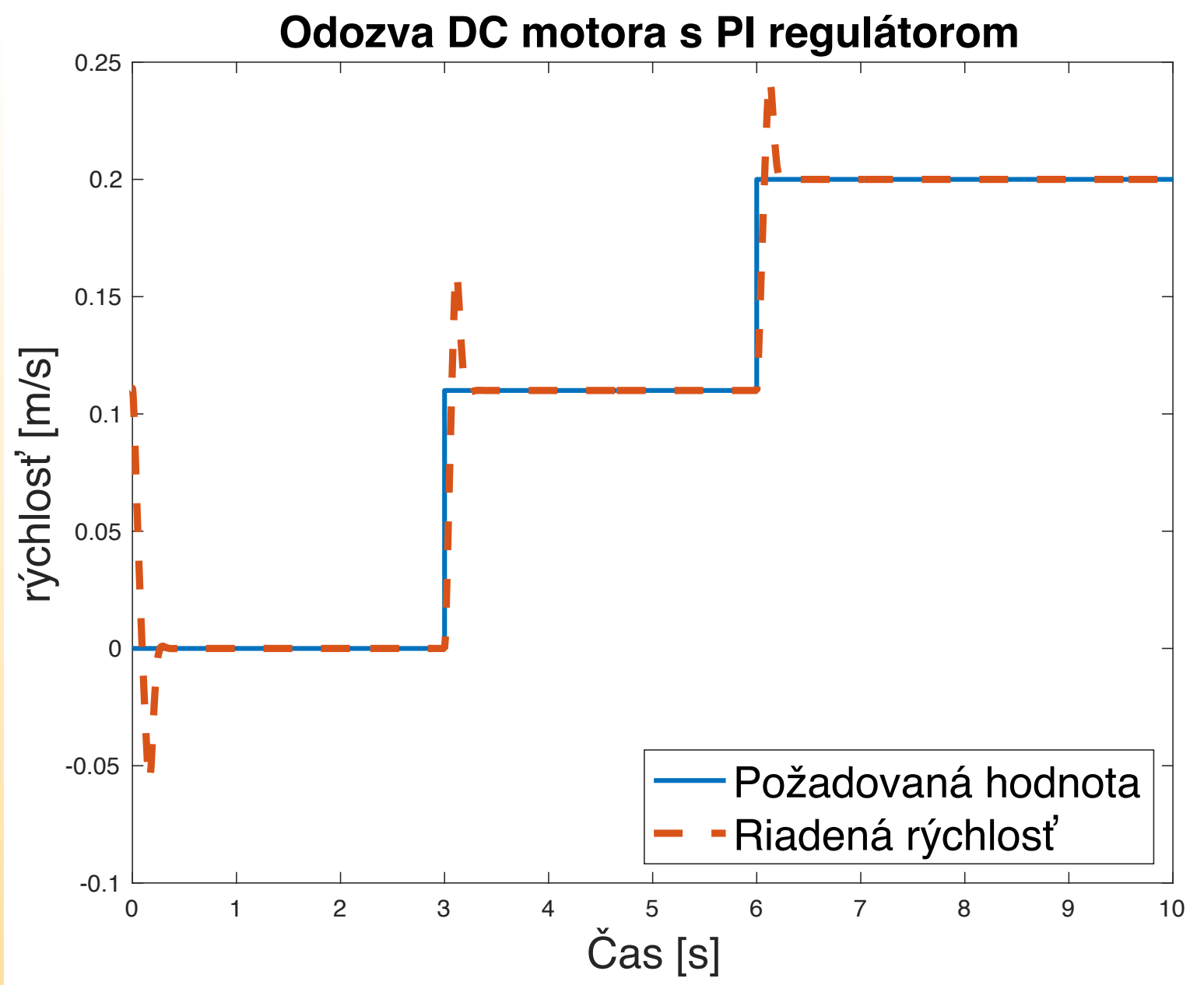
Tab. 4 - Veličiny riadiacich štruktúr

B. / Modul 1.1 - Riadenie rýchlosti aktuátorov

Simulačné overenie

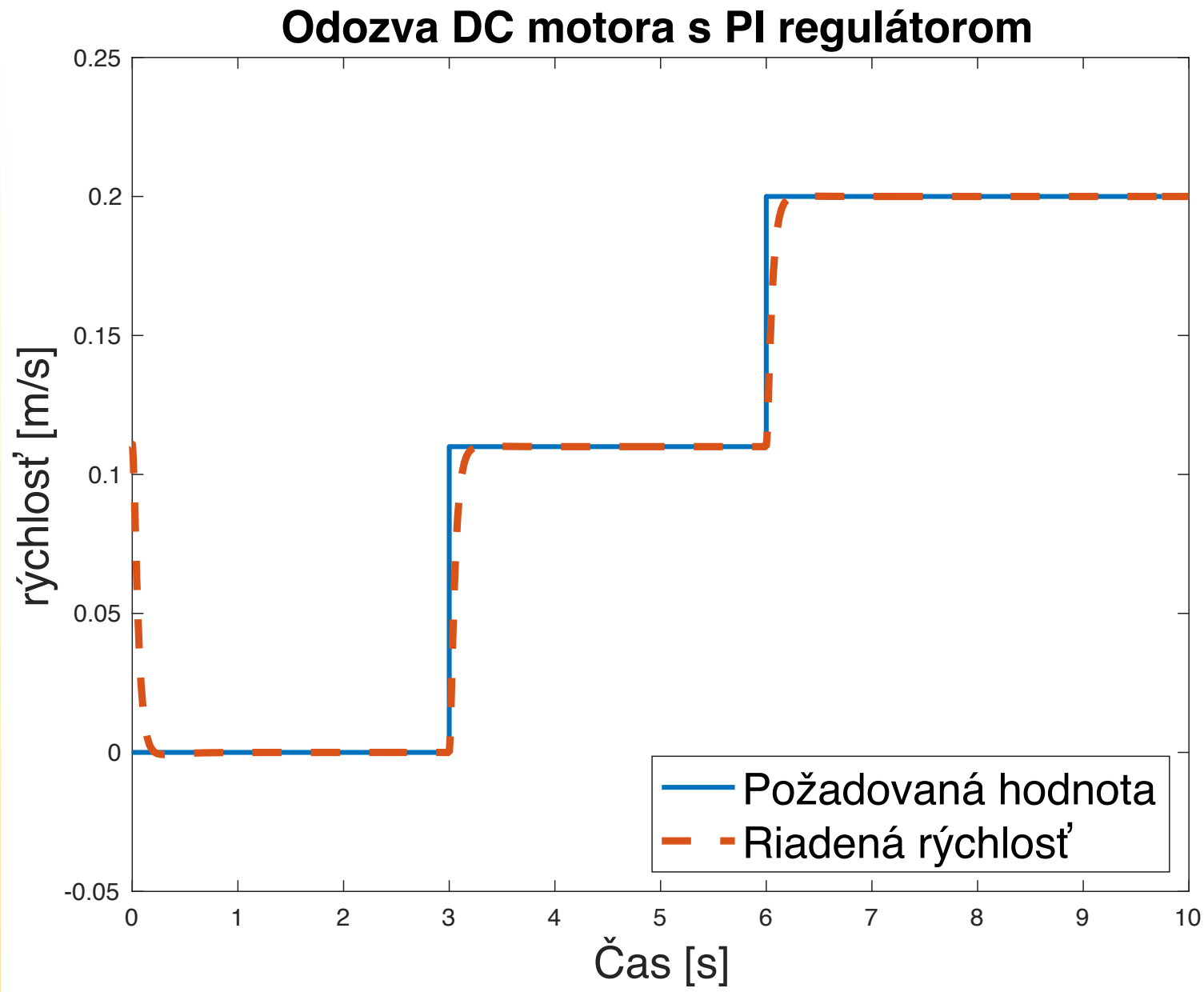


Obr. 12 - Simulačná schéma - riadenie aktuátora PI regulátorom



Obr. 13 - Naslinova metóda

Vlastná funkcia - Naslin



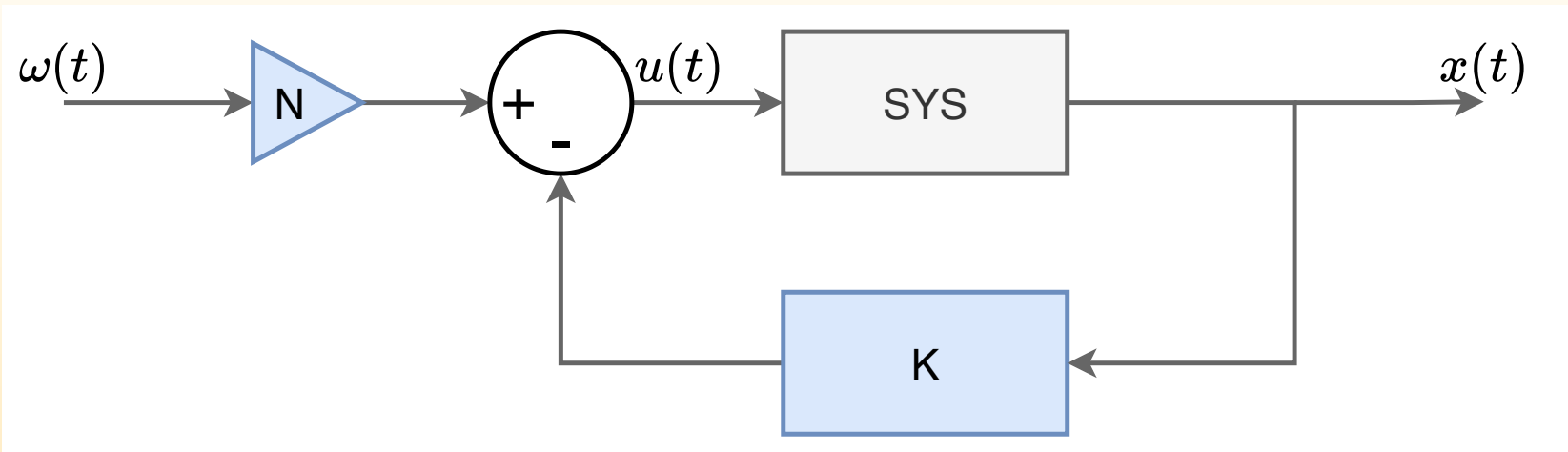
Obr. 14 - Metóda voľby pólov

Vlastná funkcia - poles

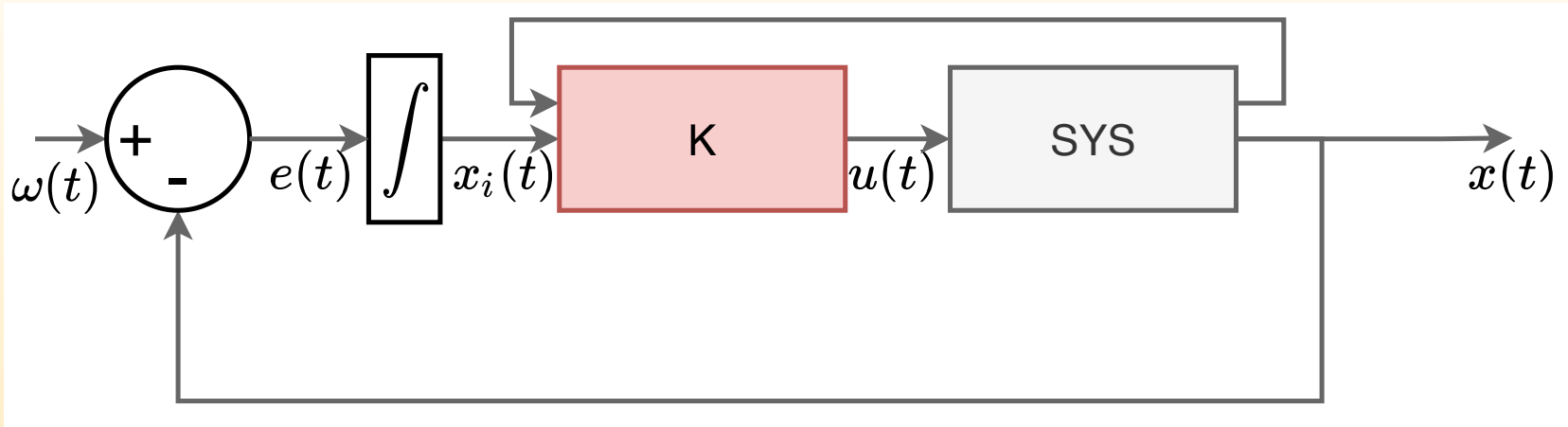
B. / Modul 1.1 - Riadenie rýchlosti aktuátorov



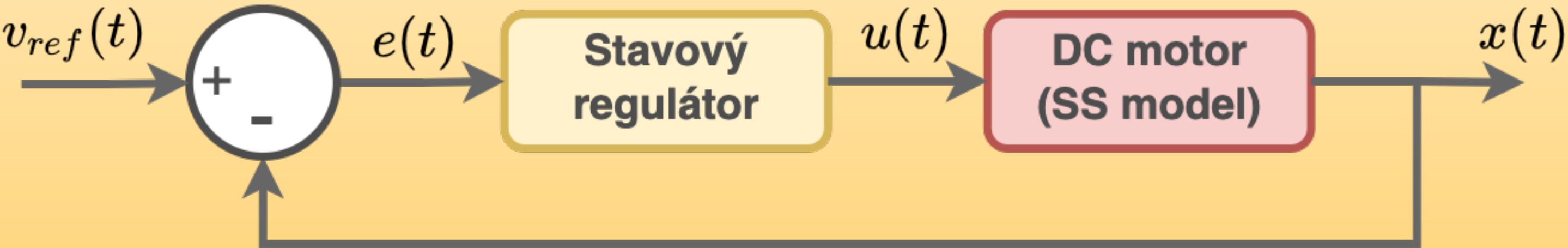
Obr. 15 - Optimálne riadenie



Obr. 16 - Schéma riadiacej štruktúry pre LQR



Obr. 17 - Schéma riadiacej štruktúry pre LQI



B. / Modul 1.1 - Riadenie rýchlosti aktuátorov

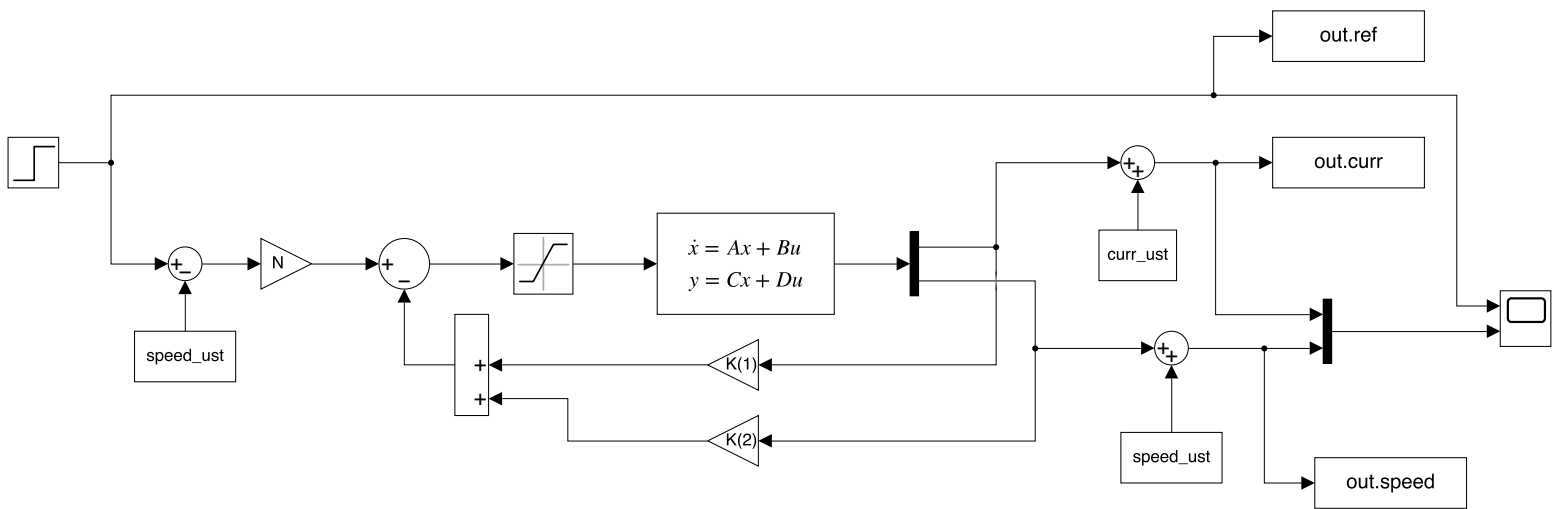
Simulačné overenie

LQR

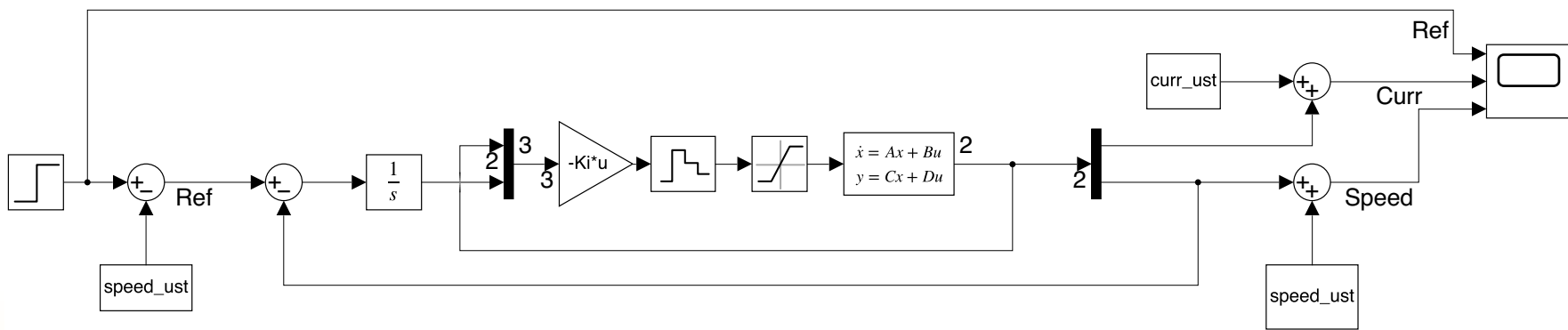
$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} u(t)$$

LQI

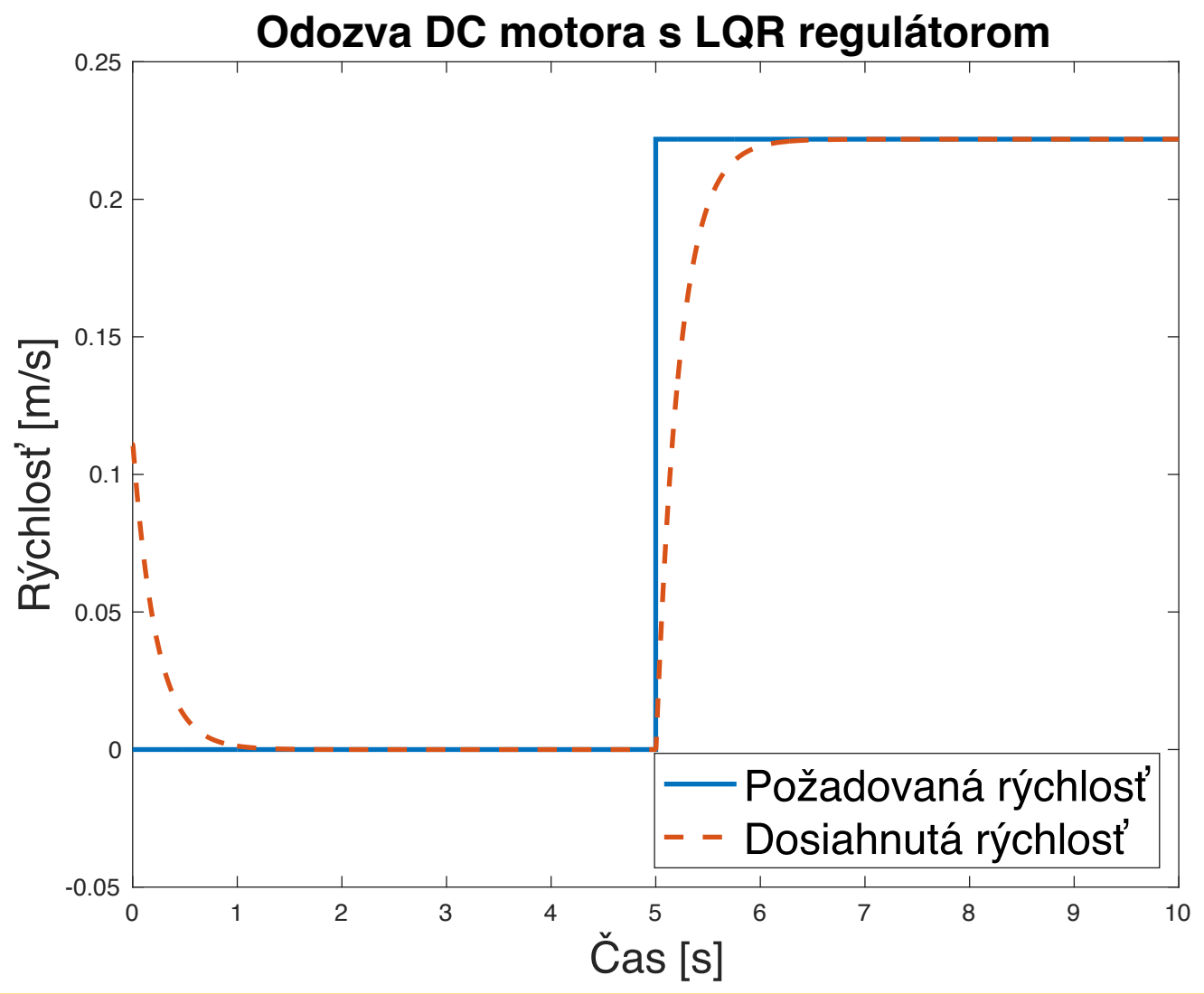
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ [0..] & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$



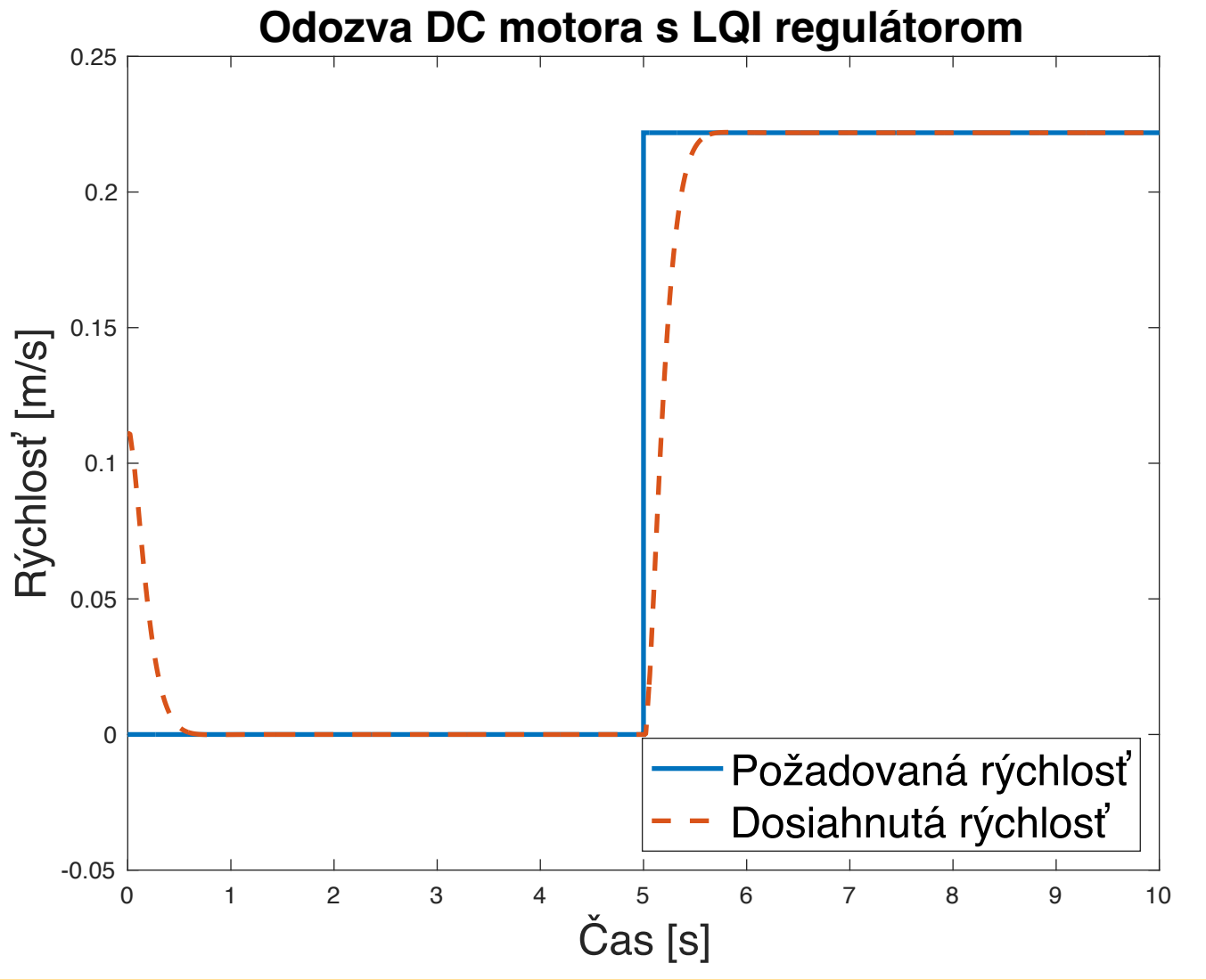
Obr. 18 - Simulačná schéma LQR



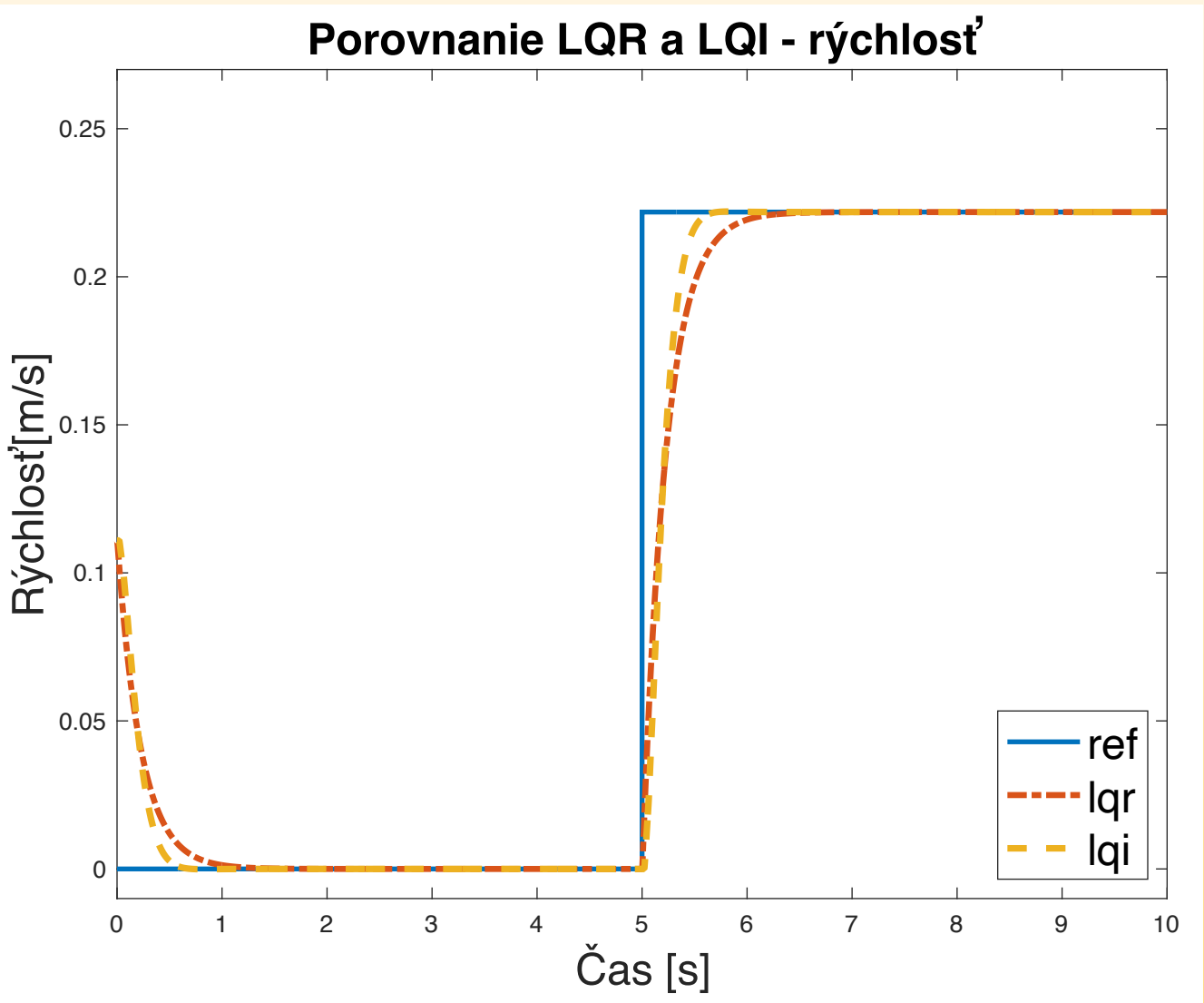
Obr. 19 - Simulačná schéma LQI



Obr. 20



Obr. 21

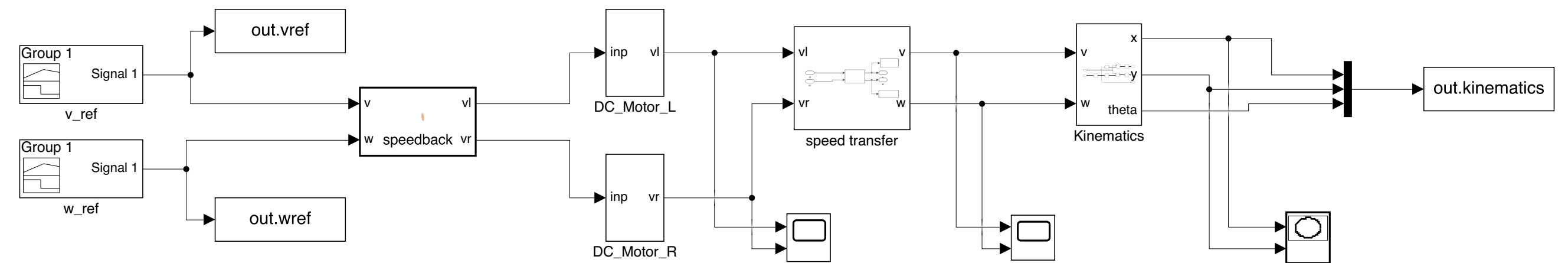


Obr. 22

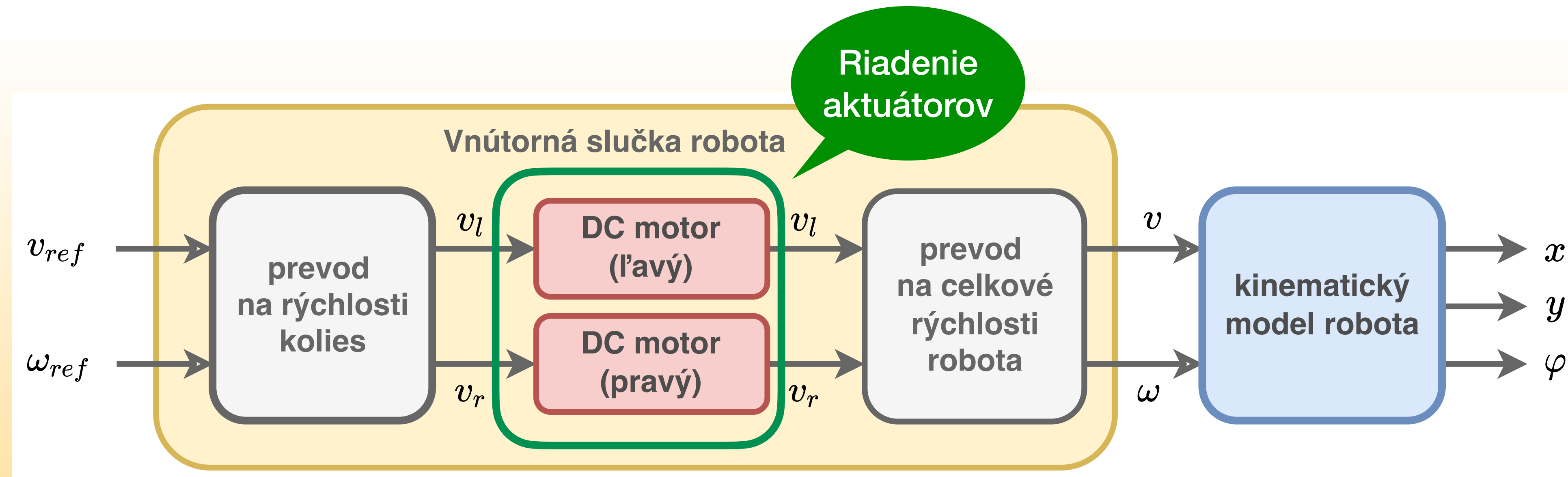
Matlab funkcia - LQR

Matlab funkcia - LQI

B. / Modul 1.2 - Riadenie rýchlosti robota



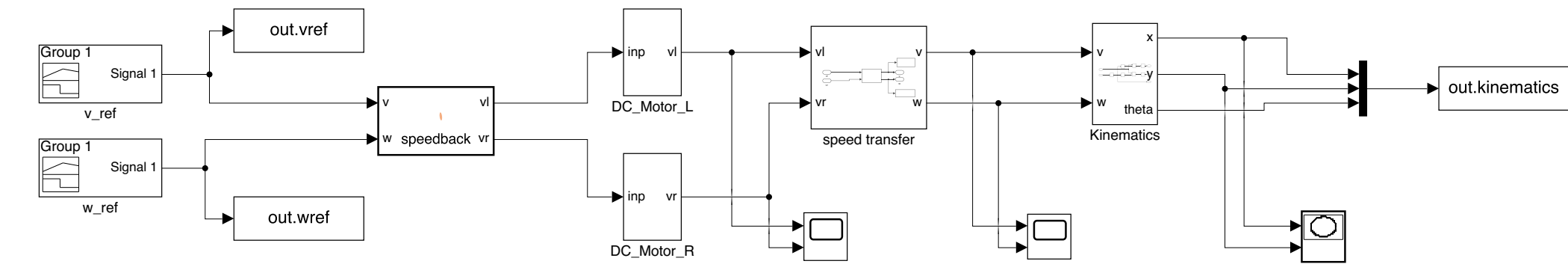
Obr. 23 - Simulačná schéma - riadenie rýchlosti robota



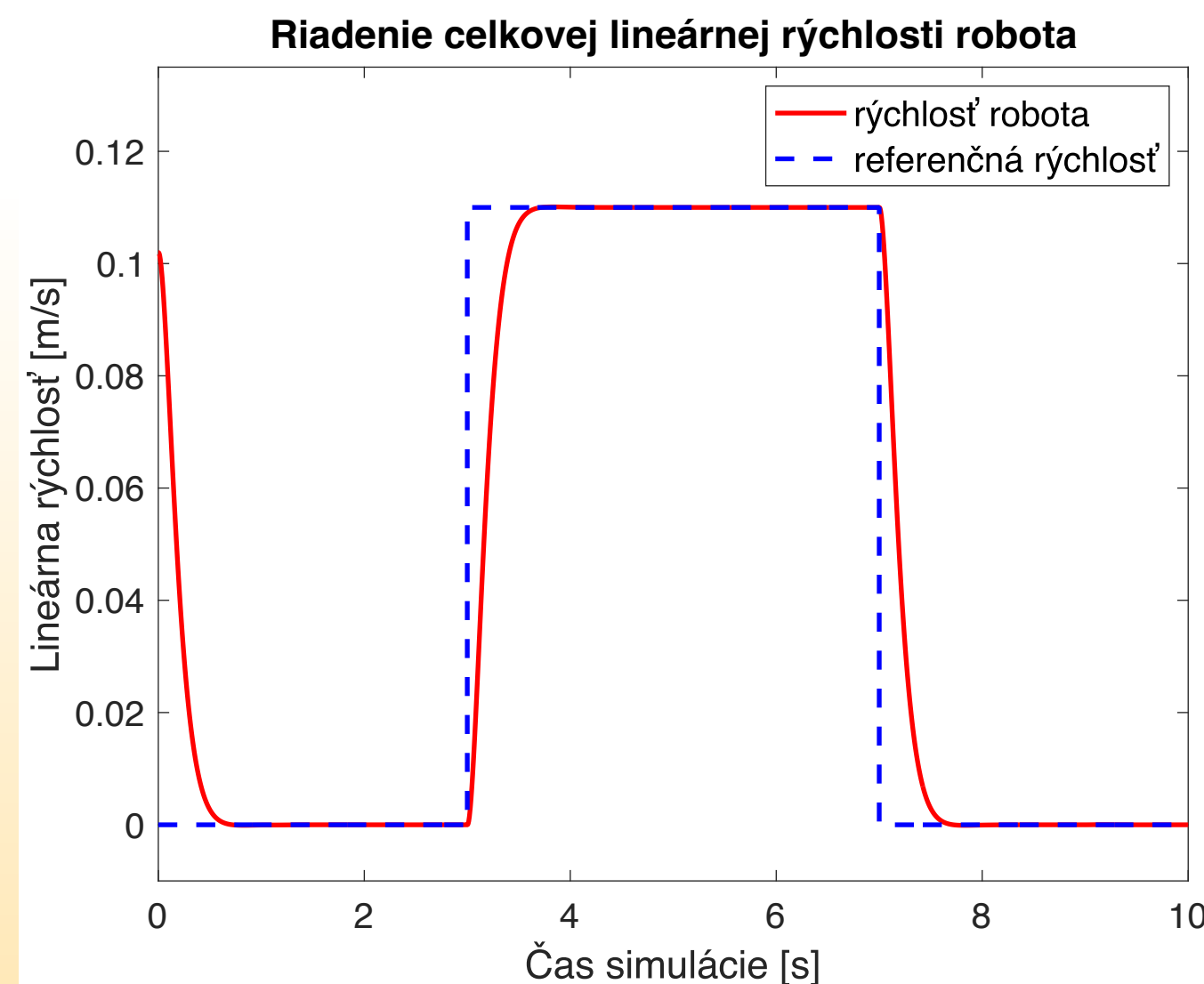
Obr. 24 - Bloková schéma modelu pre riadenie celkovej rýchlosti MR

B. / Modul 1.2 - Riadenie rýchlosti robota

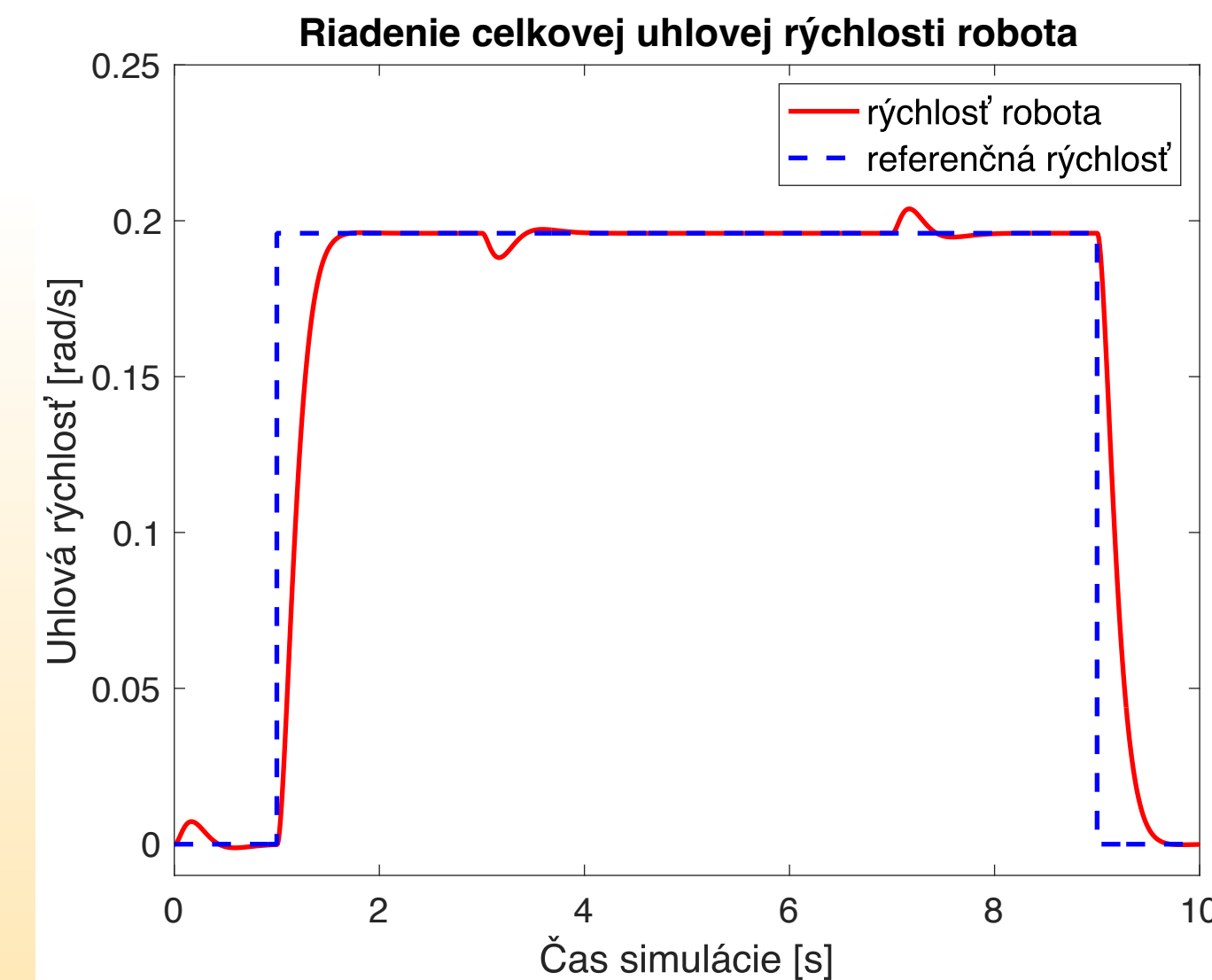
Simulačné overenie



Obr. 25 - Simulačná schéma - riadenie rýchlosti robota



Obr. 26 - LQI - lineárna rýchlosť

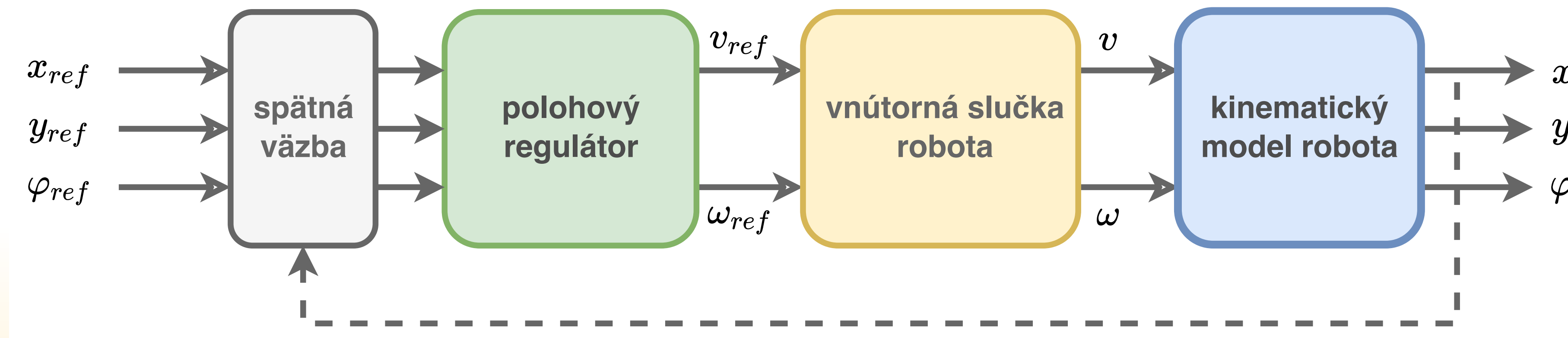


Obr. 27 - LQI - uhlová rýchlosť

Testované vnútorné slučky:
PI (Naslin, póly); LQR; LQI

B. / Modul 2 - Navigačné riadenie

Riadenie do bodu a pozície



Obr. 28 - Bloková schéma modelu pre navigačné riadenie MR

$$\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\Delta x}{\Delta y} - \varphi$$

$$\beta = -\Delta\varphi - \alpha$$

Výpočet polárnych
odchýlok

$$v = K_{\rho}\rho \quad \text{a} \quad \omega = K_{\alpha}\alpha$$

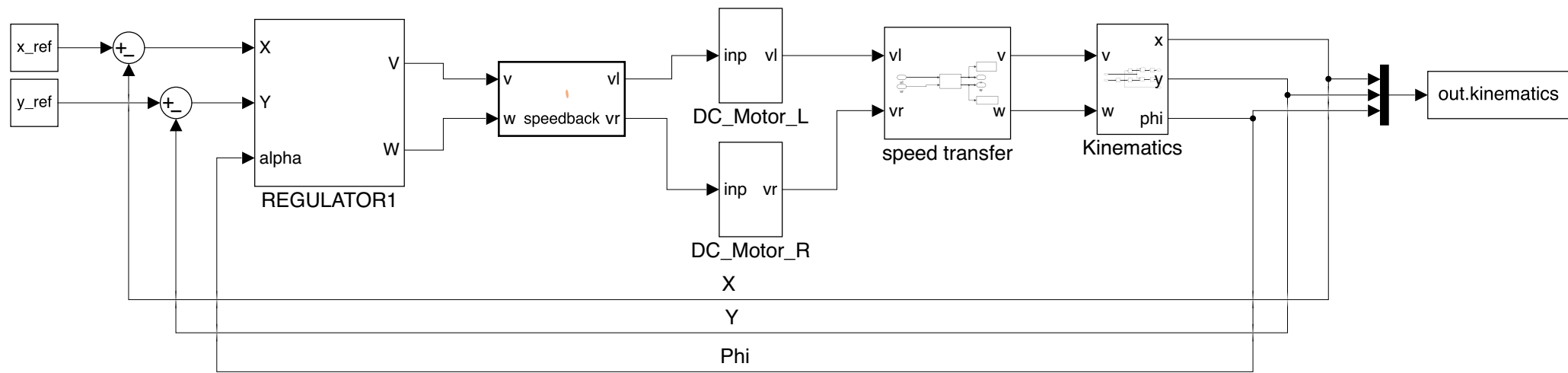
Zákon riadenia - navigácia
do bodu

$$v = K_{\rho}\rho \quad \text{a} \quad \omega = K_{\alpha}\alpha + K_{\beta}\beta$$

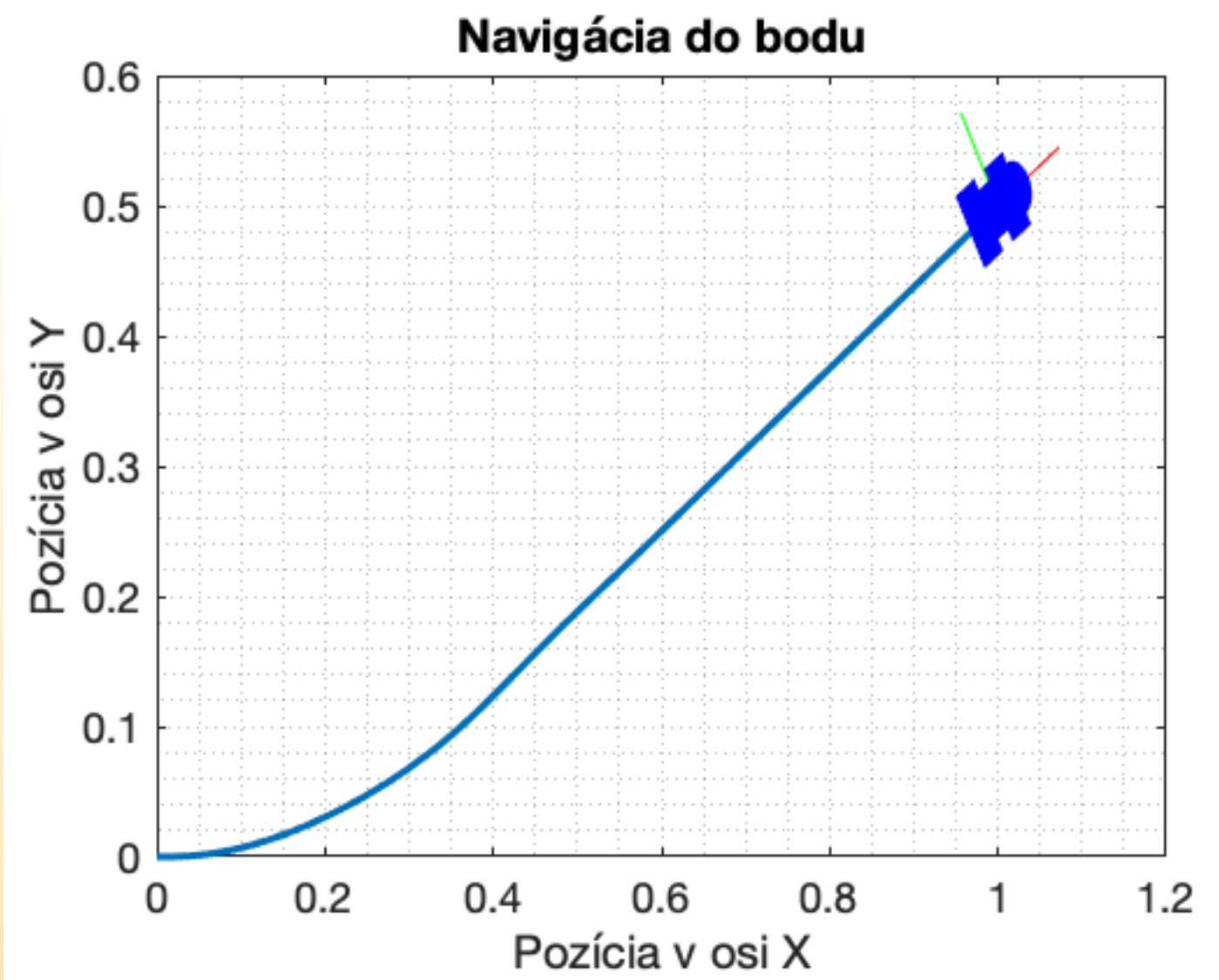
Zákon riadenia - navigácia do pozície

B. / Modul 2.1 - Navigačné riadenie do bodu

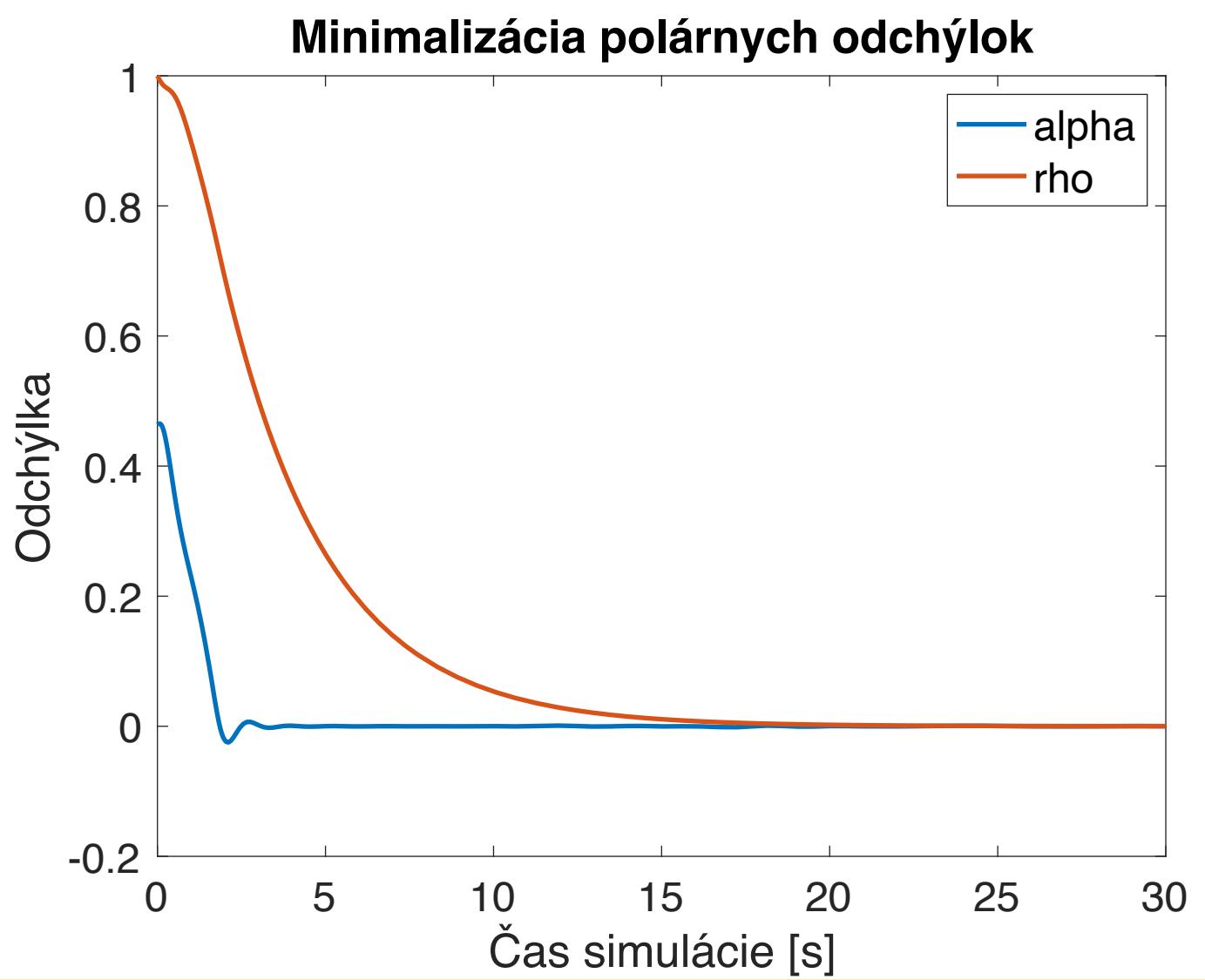
Simulačné overenie



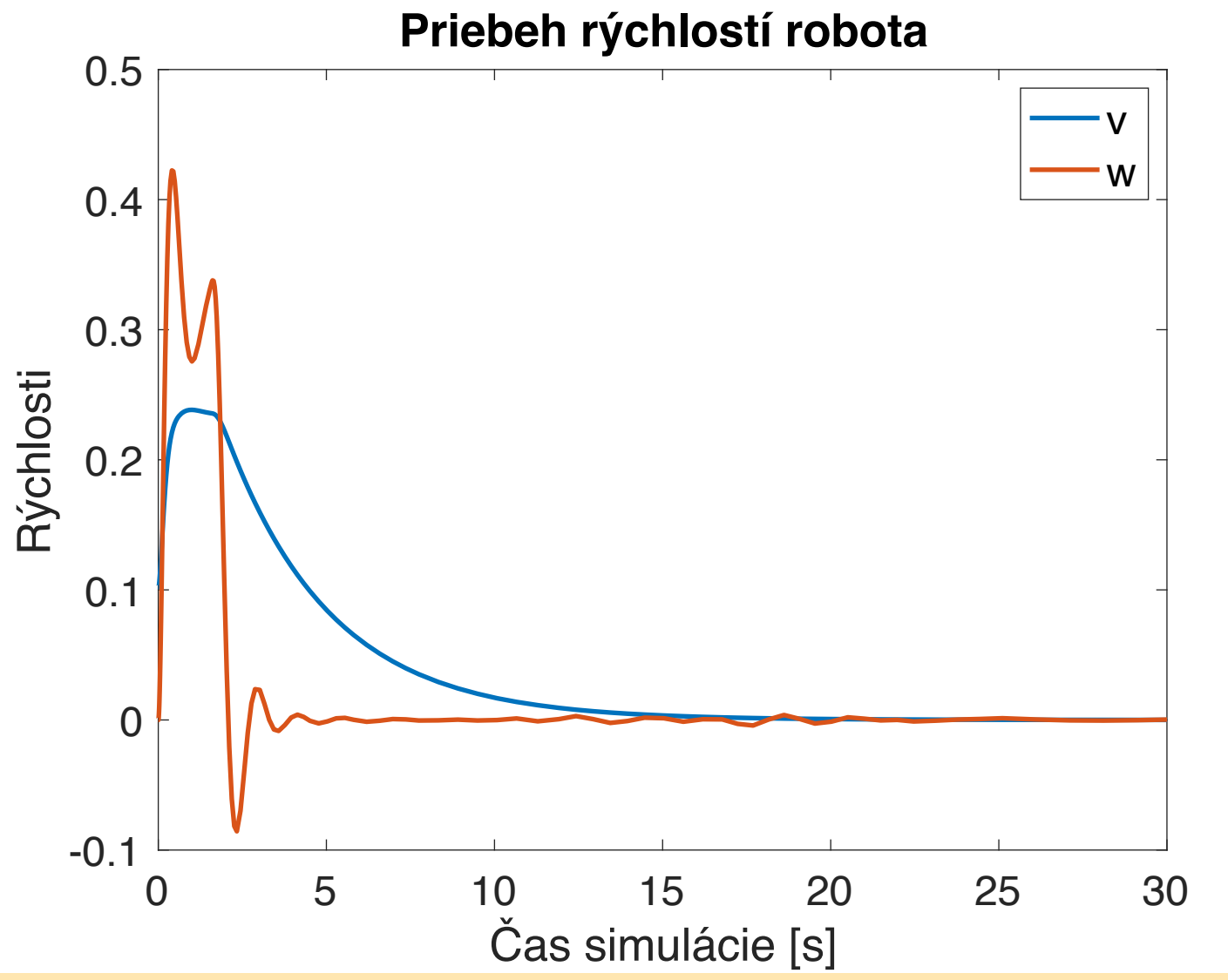
Obr. 29 - Simulačná schéma navigačného riadenia do bodu



Obr. 30



Obr. 31

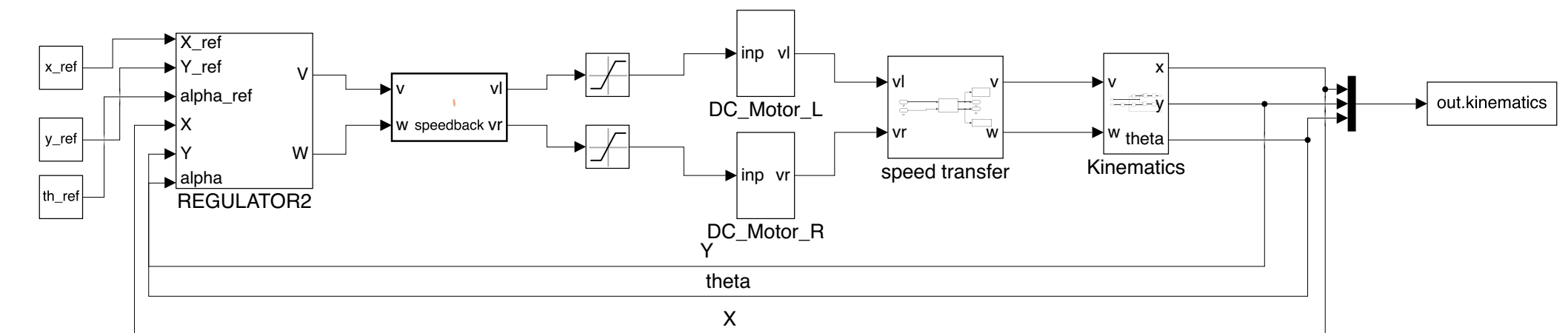


Obr. 32

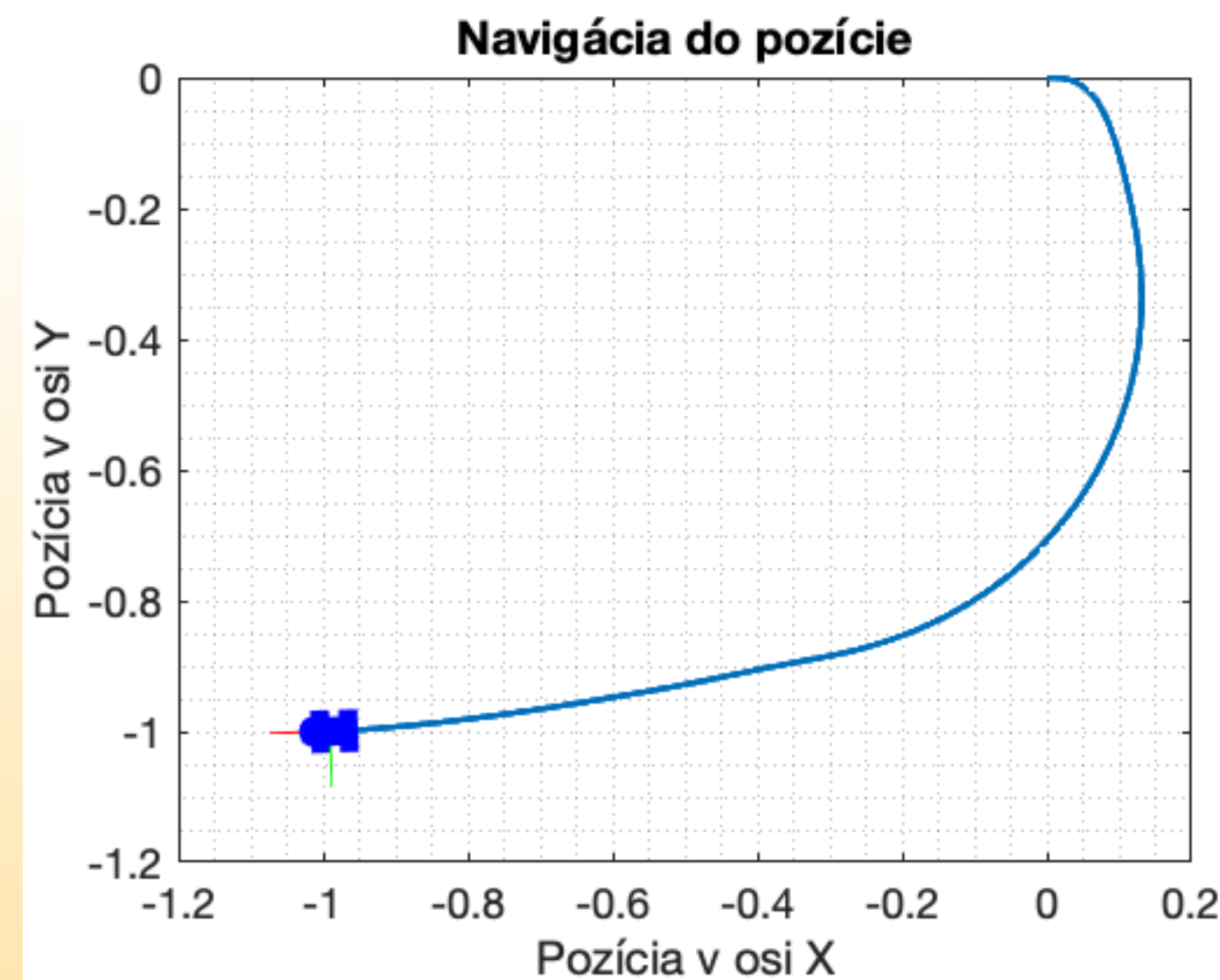
Testované vnútorné slučky:
PI (Naslin, póly); LQR; LQI

B. / Modul 2.2 - Navigačné riadenie do pozície

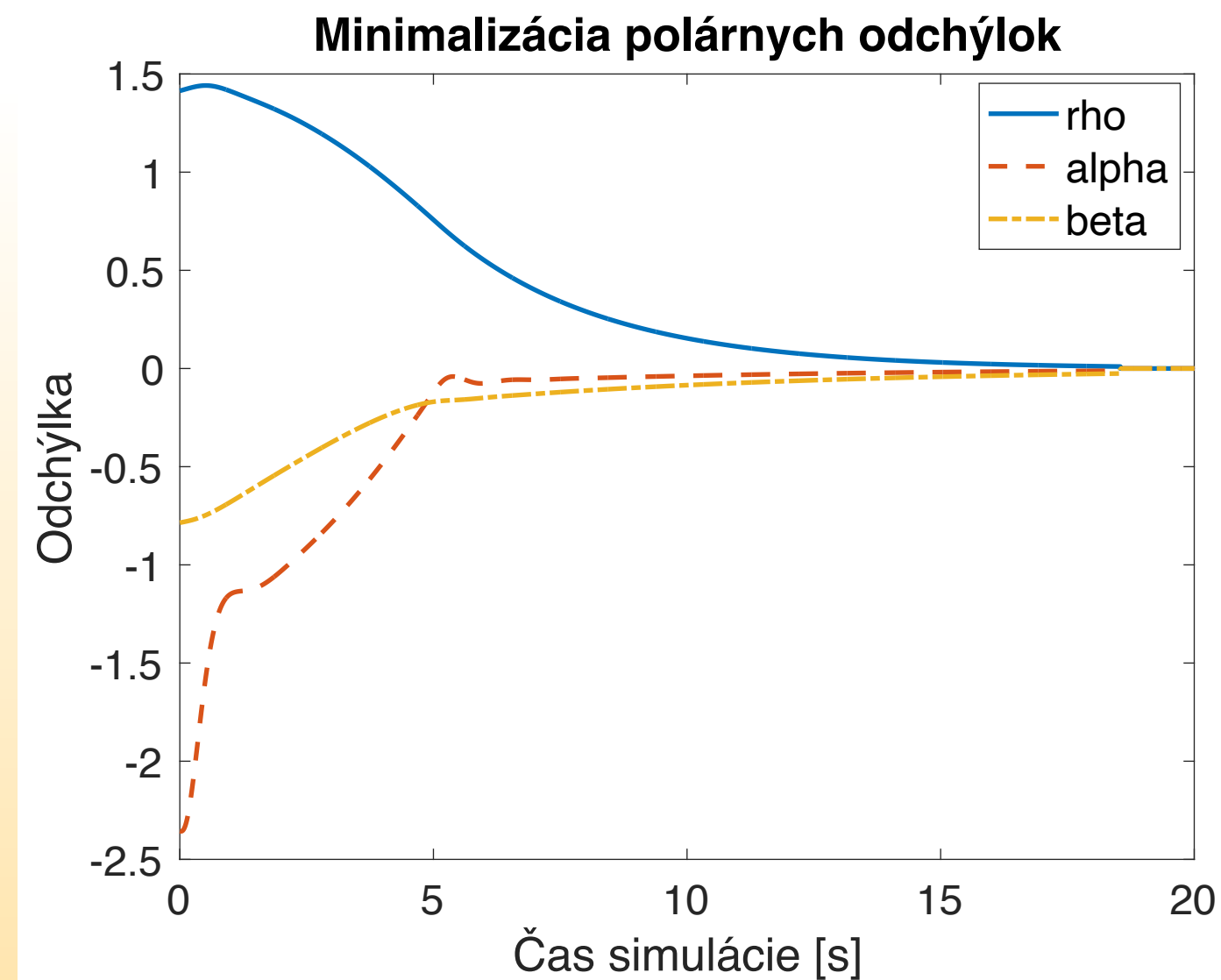
Simulačné overenie



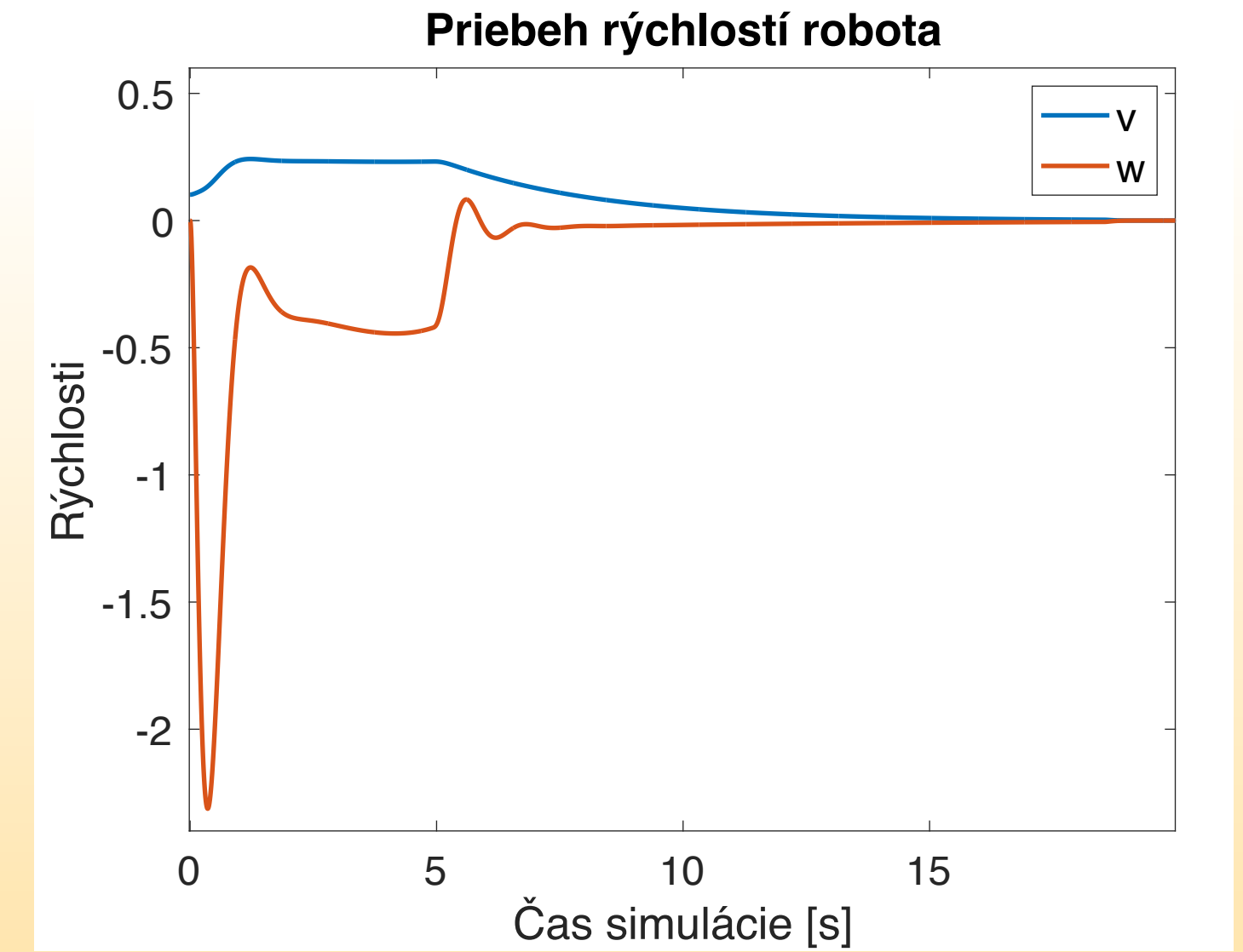
Obr. 33 - Simulačná schéma navigačného riadenia do pozície



Obr. 34



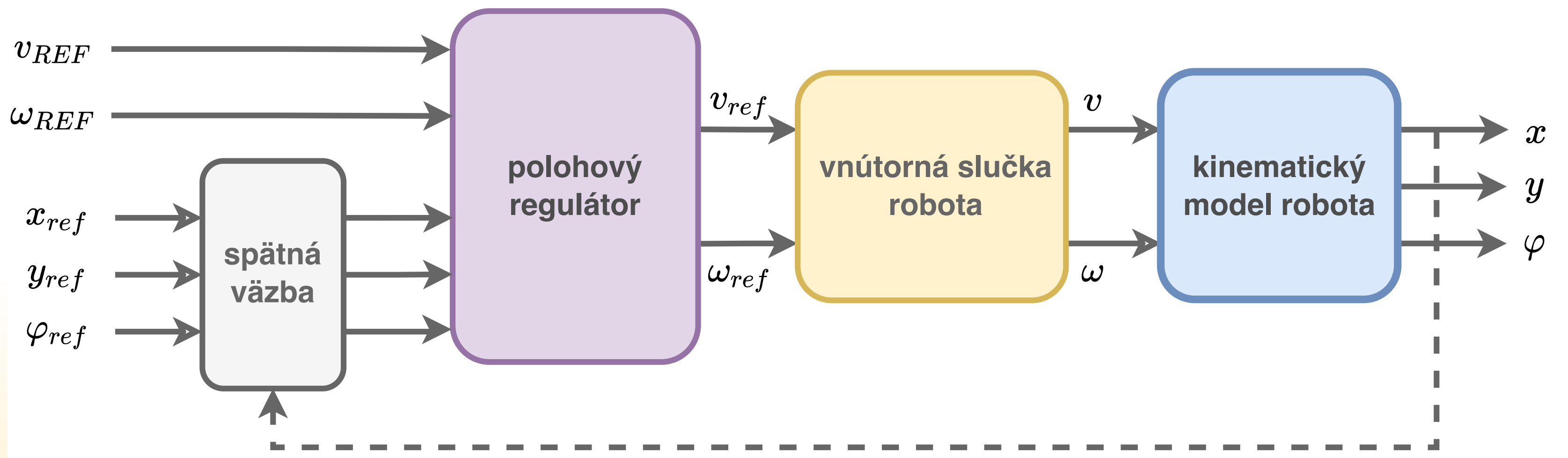
Obr. 35



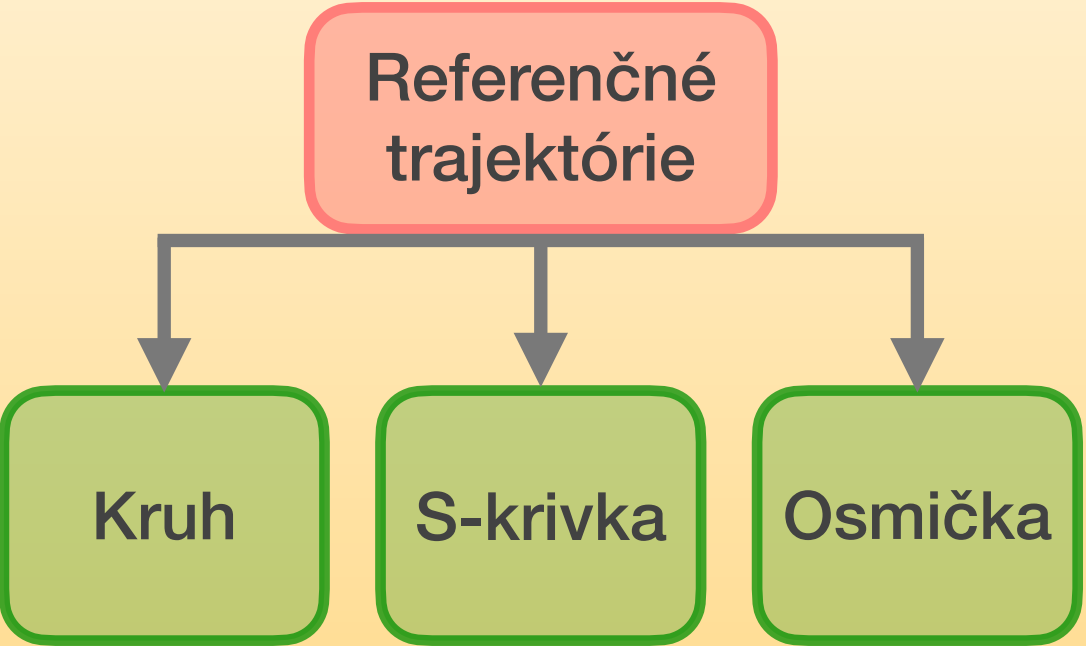
Obr. 36

Testované vnútorné slučky:
PI (Naslin, póly); LQR; LQI

B. / Modul 3 - Sledovanie trajektórie



Obr. 37 - Bloková schéma modelu pre sledovanie trajektórie



$$v_{ref}(k) = \frac{\sqrt{[x_{ref}(k) - x_{ref}(k-1)]^2 + [y_{ref}(k) - y_{ref}(k-1)]^2}}{t(k) - t(k-1)}$$

$$\varphi_{ref}(k) = \tan^{-1} \frac{y_{ref}(k) - y_{ref}(k-1)}{x_{ref}(k) - x_{ref}(k-1)}$$

$$\omega_{ref}(k) = \frac{\varphi_{ref}(k) - \varphi_{ref}(k-1)}{t(k) - t(k-1)}$$

Výpočet referenčných rýchlostí

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \varphi \end{bmatrix}$$

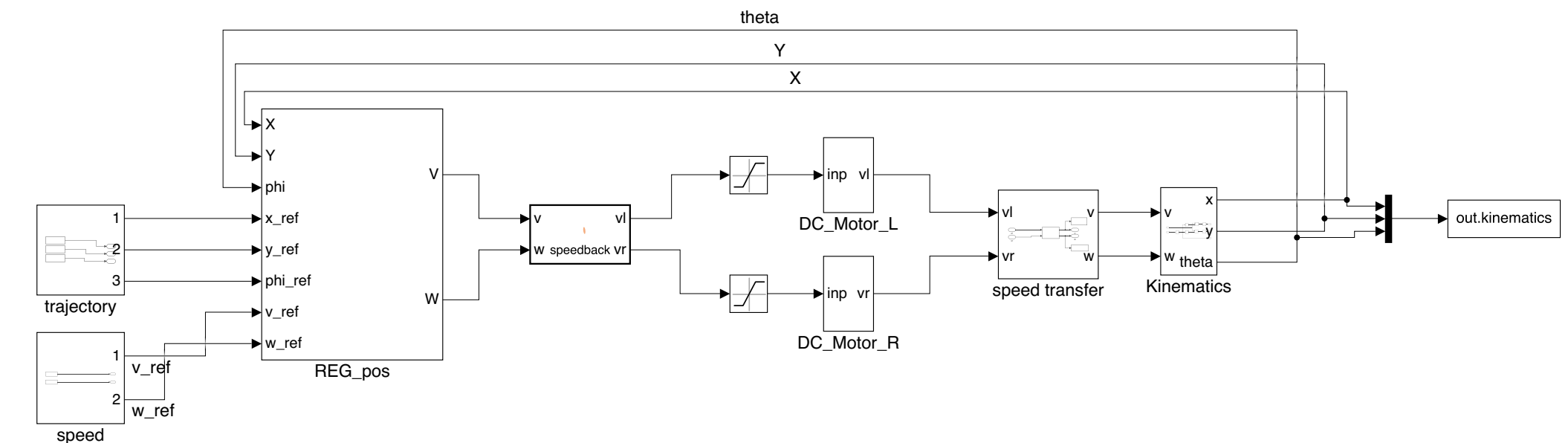
Výpočet odchýlok polohového regulátora

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\text{sign}(v_{ref})k_2 & -k_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}$$

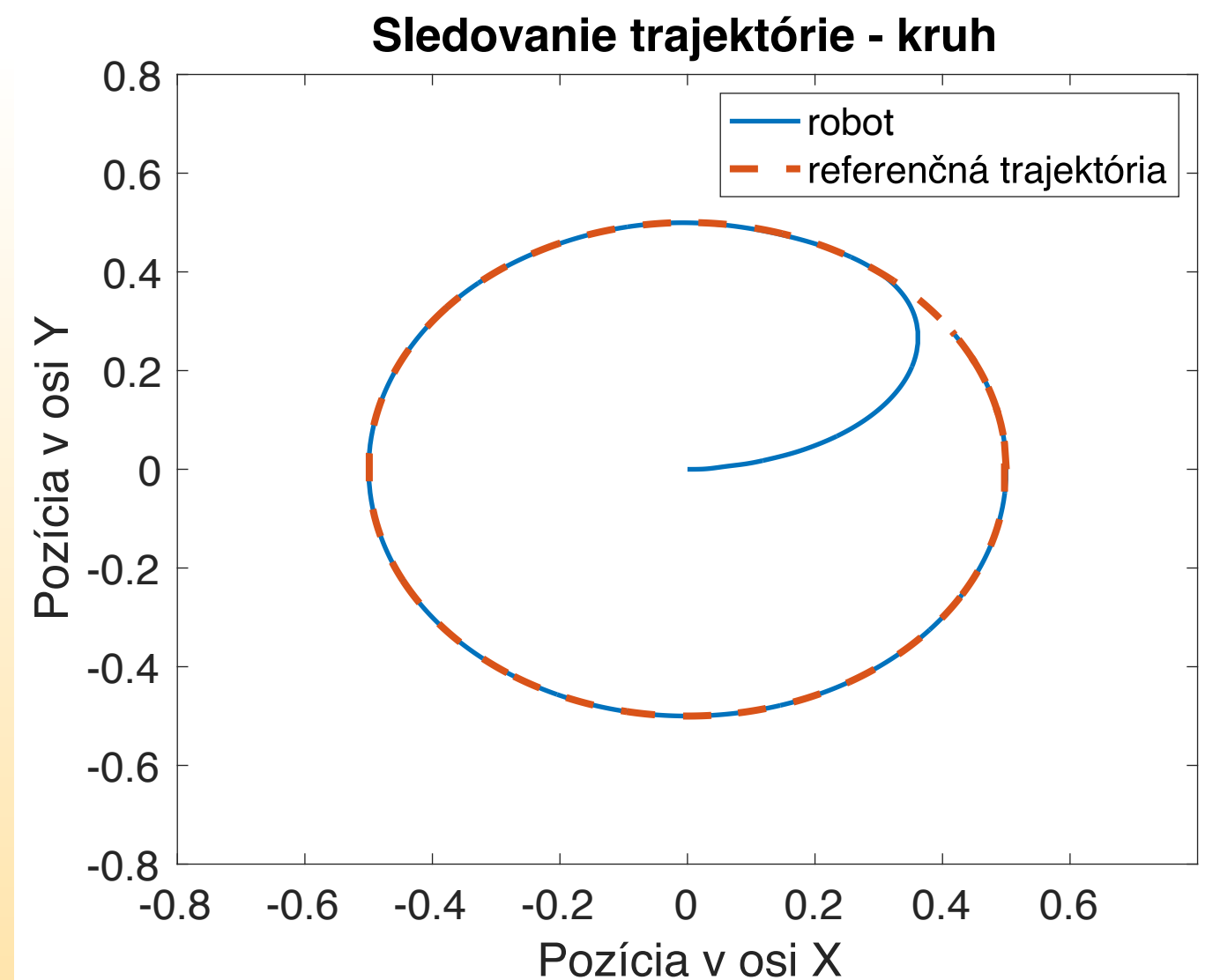
Zákon riadenia pre sledovanie trajektórie

B. / Modul 3 - Sledovanie trajektórie

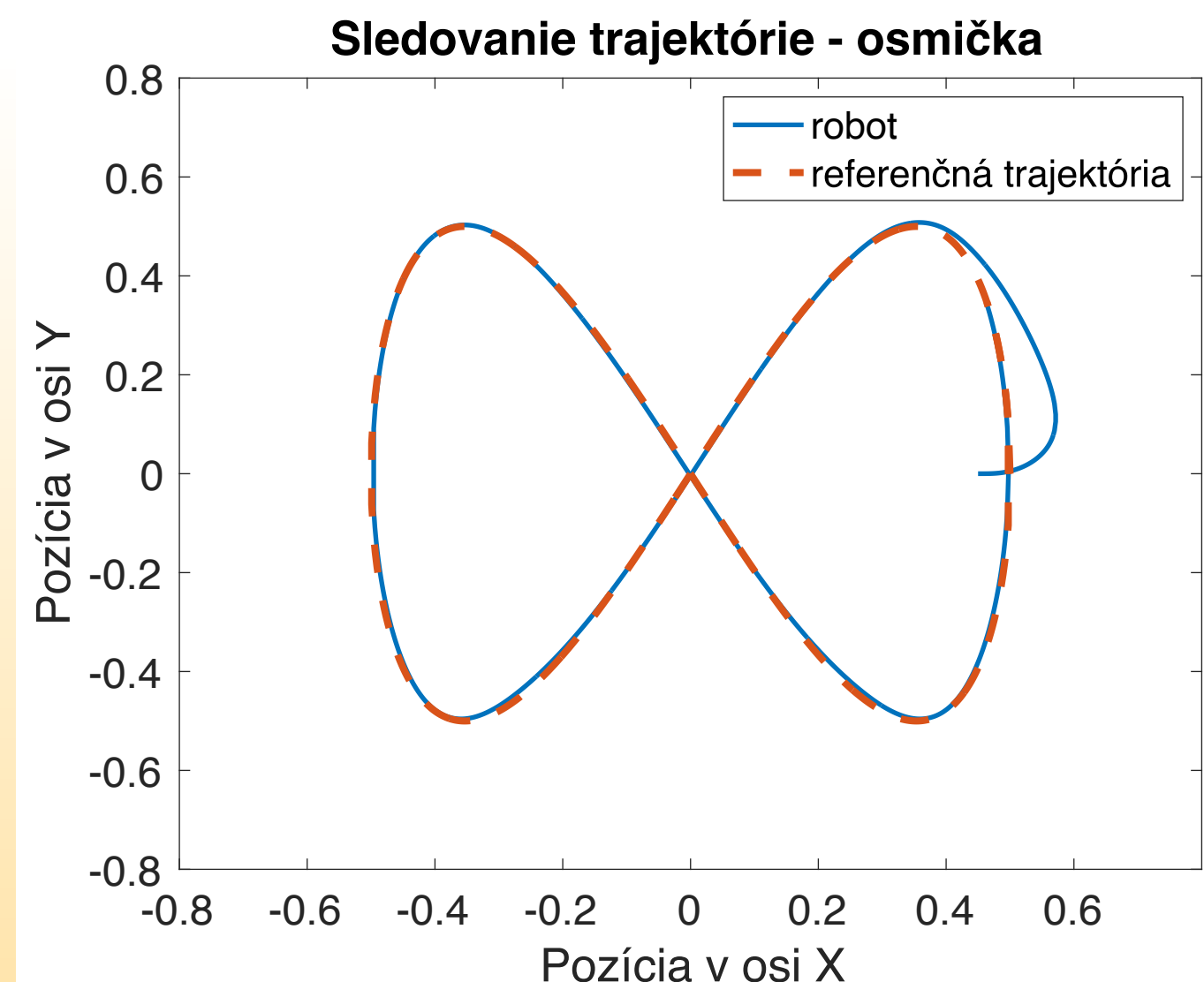
Simulačné overenie



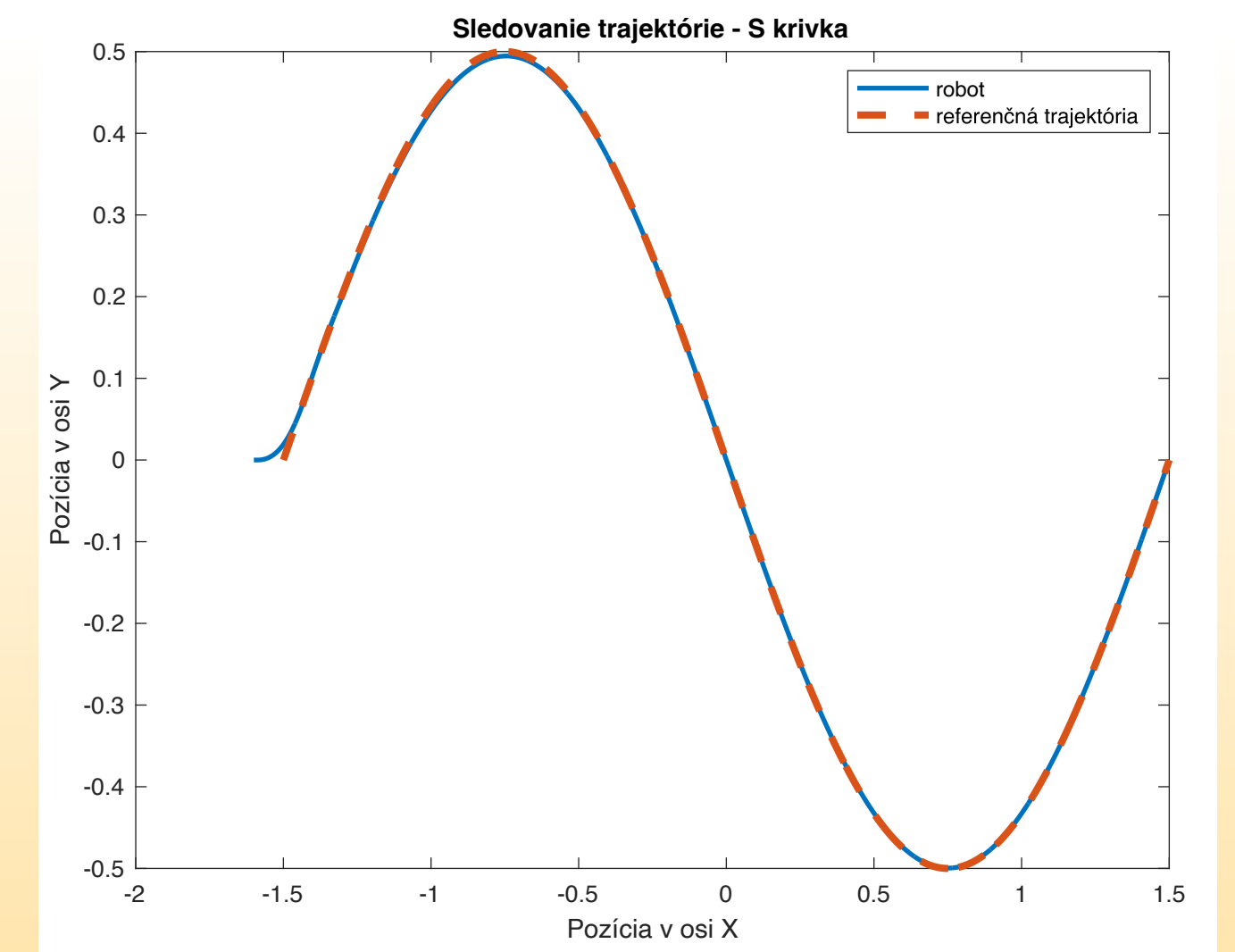
Obr. 38 - Simulačná schéma pre sledovanie trajektórie



Obr. 39



Obr. 40



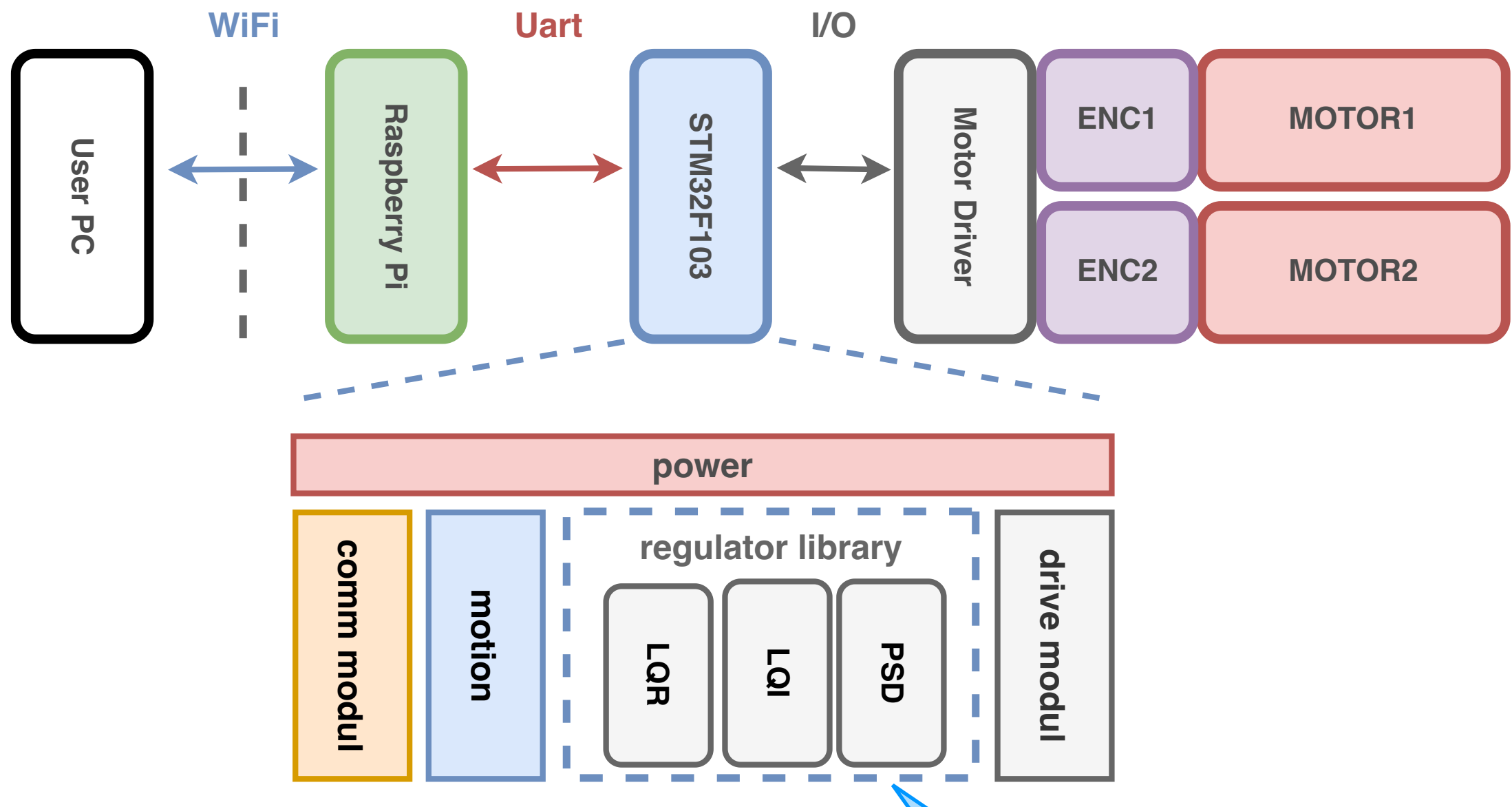
Obr. 41

Testované vnútorné slučky:
PI (Naslin, póly); LQR; LQI

C. Prípadová štúdia 3 - Implementácia



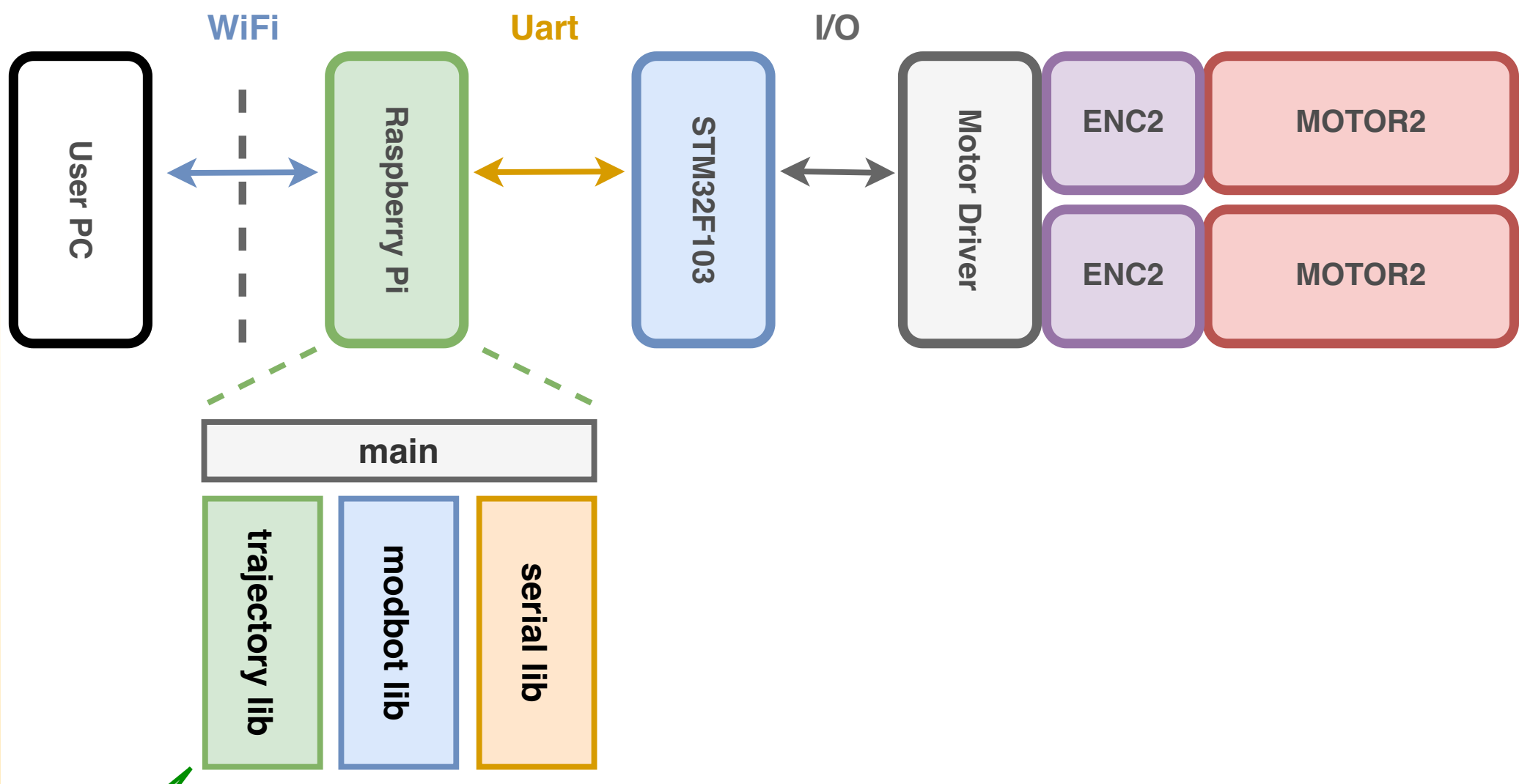
• STM32



Obr. 42 - Schéma modulov v mikroPC STM32

Algoritmy z časti
B/M1 a B/M2

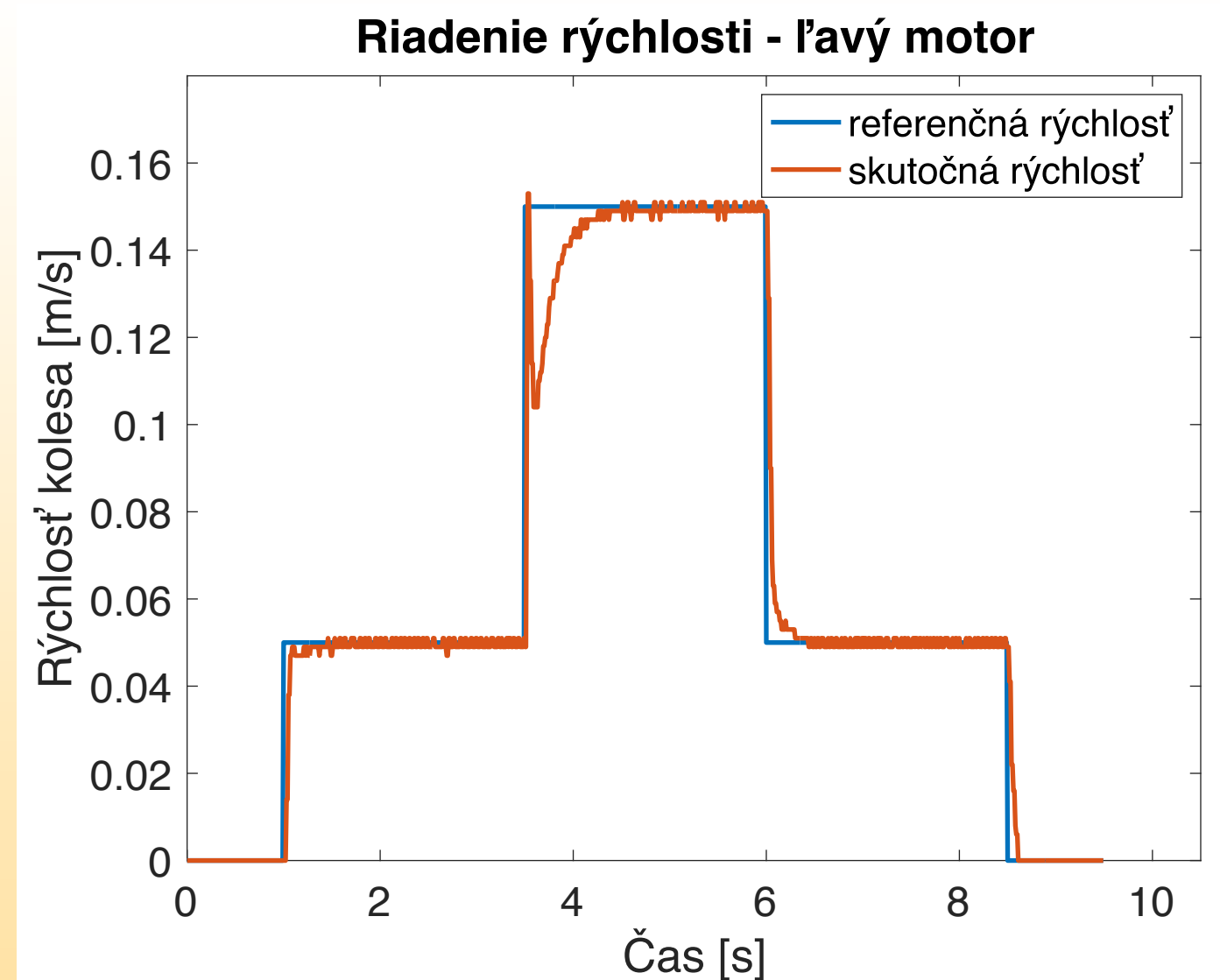
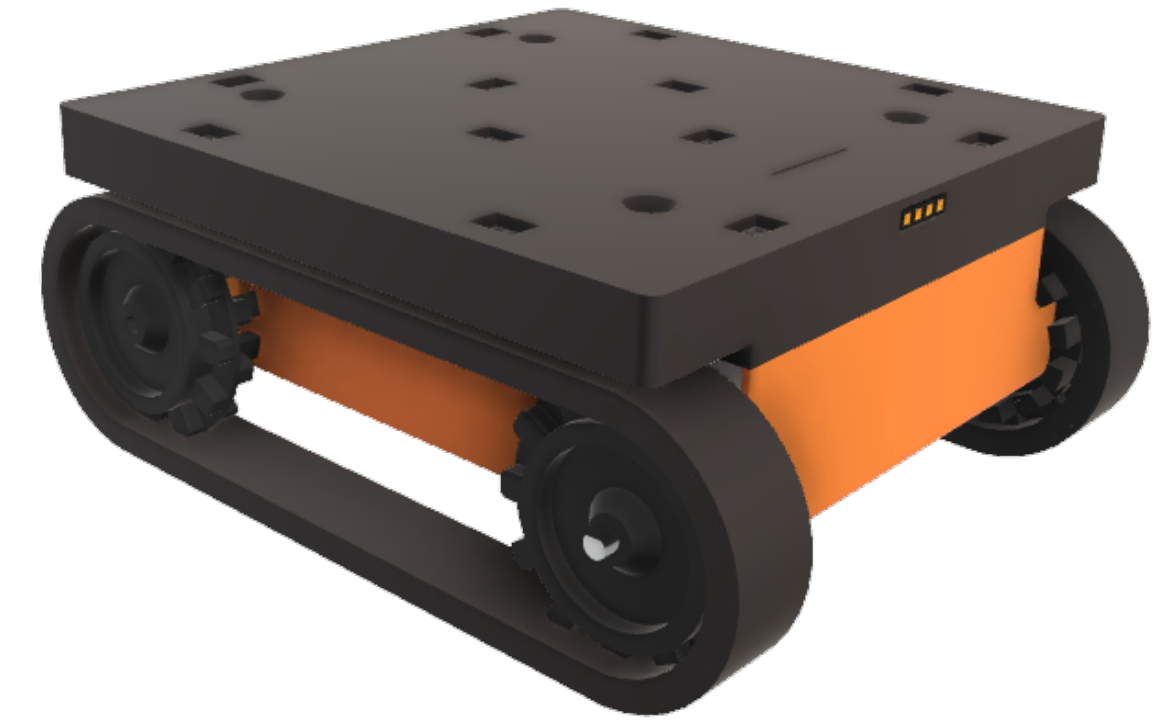
• RaspberryPi



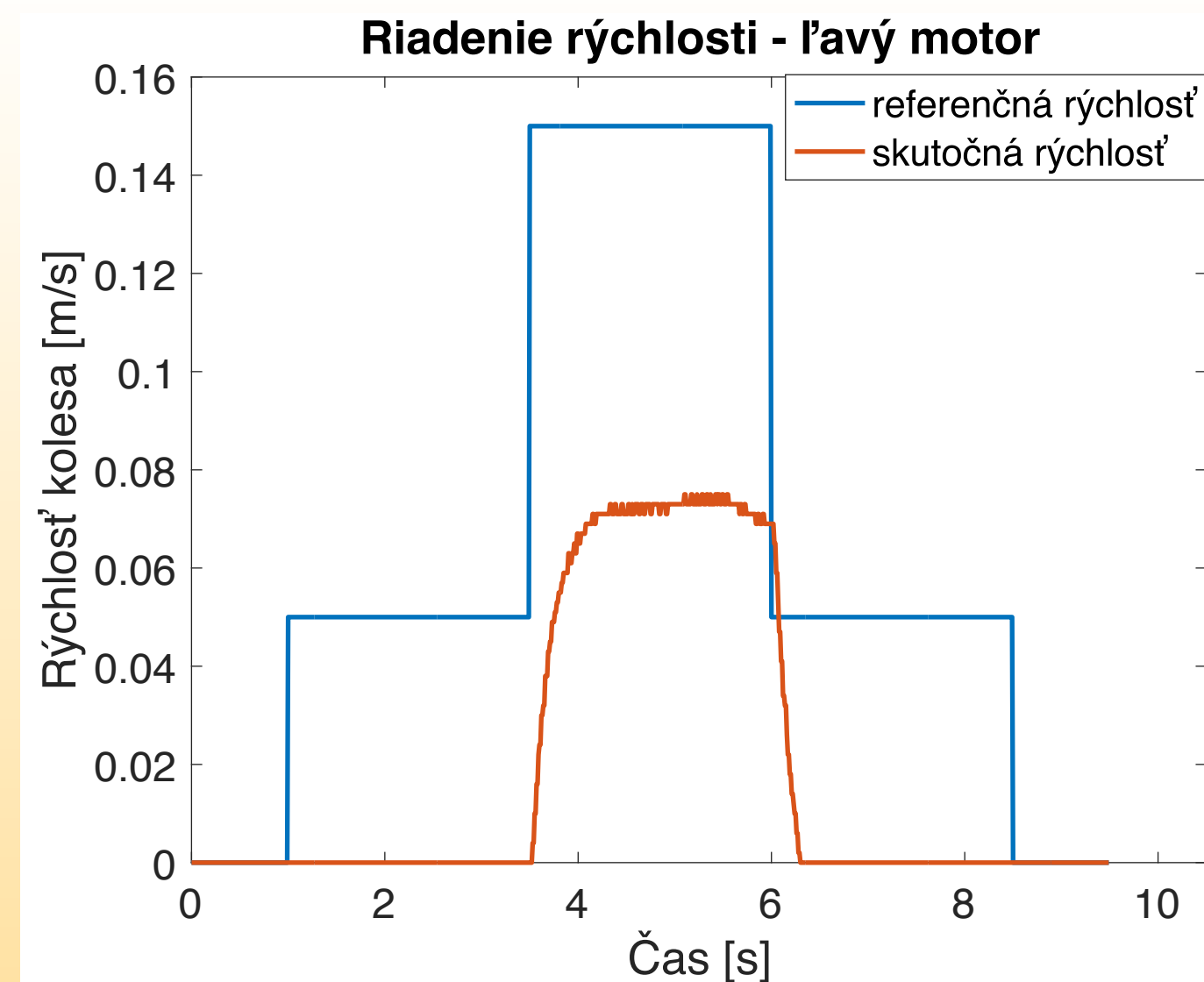
Obr. 43 - Schéma modulov v RaspberryPi

Algoritmy z časti
B/M3

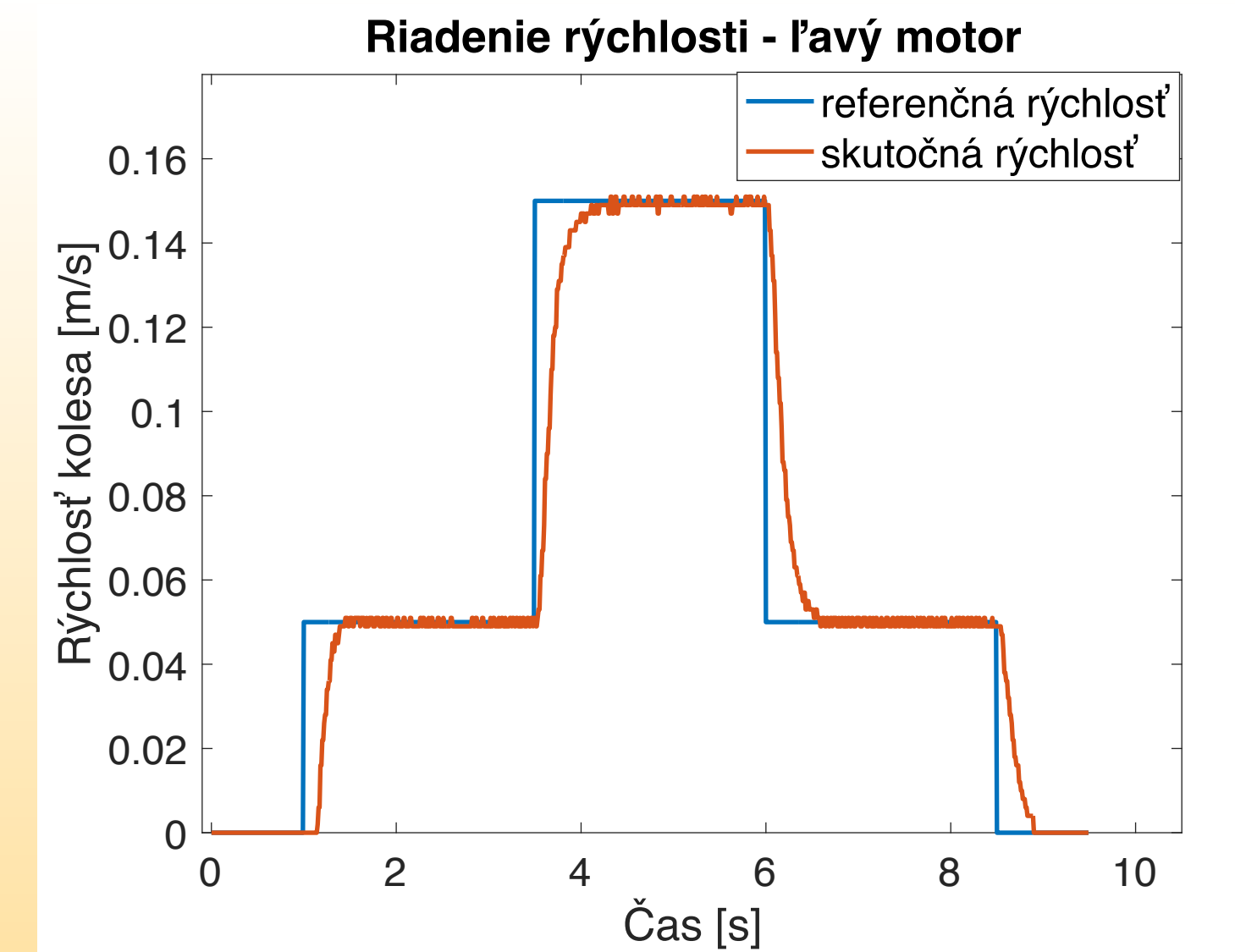
C. / Modul 1 - Riadenie rýchlosti aktuátorov



Obr. 44 - PS

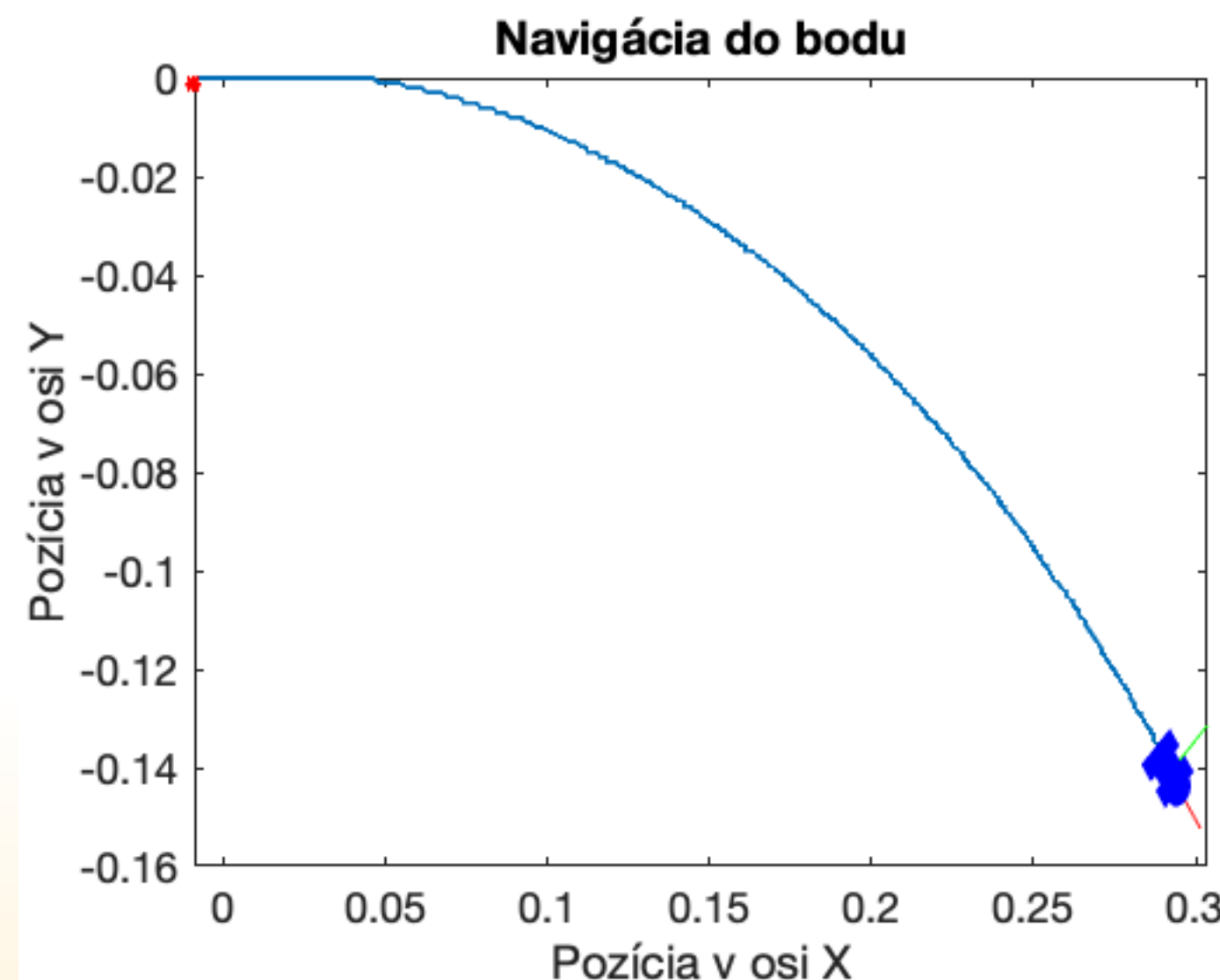
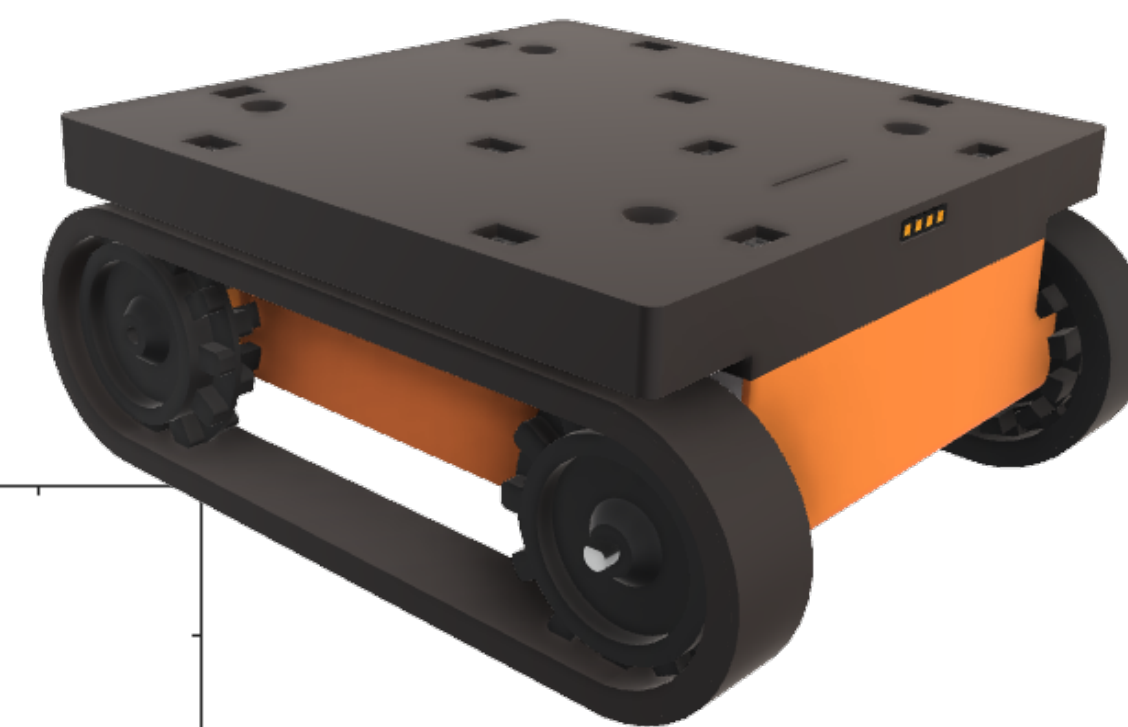


Obr. 45 - LQR

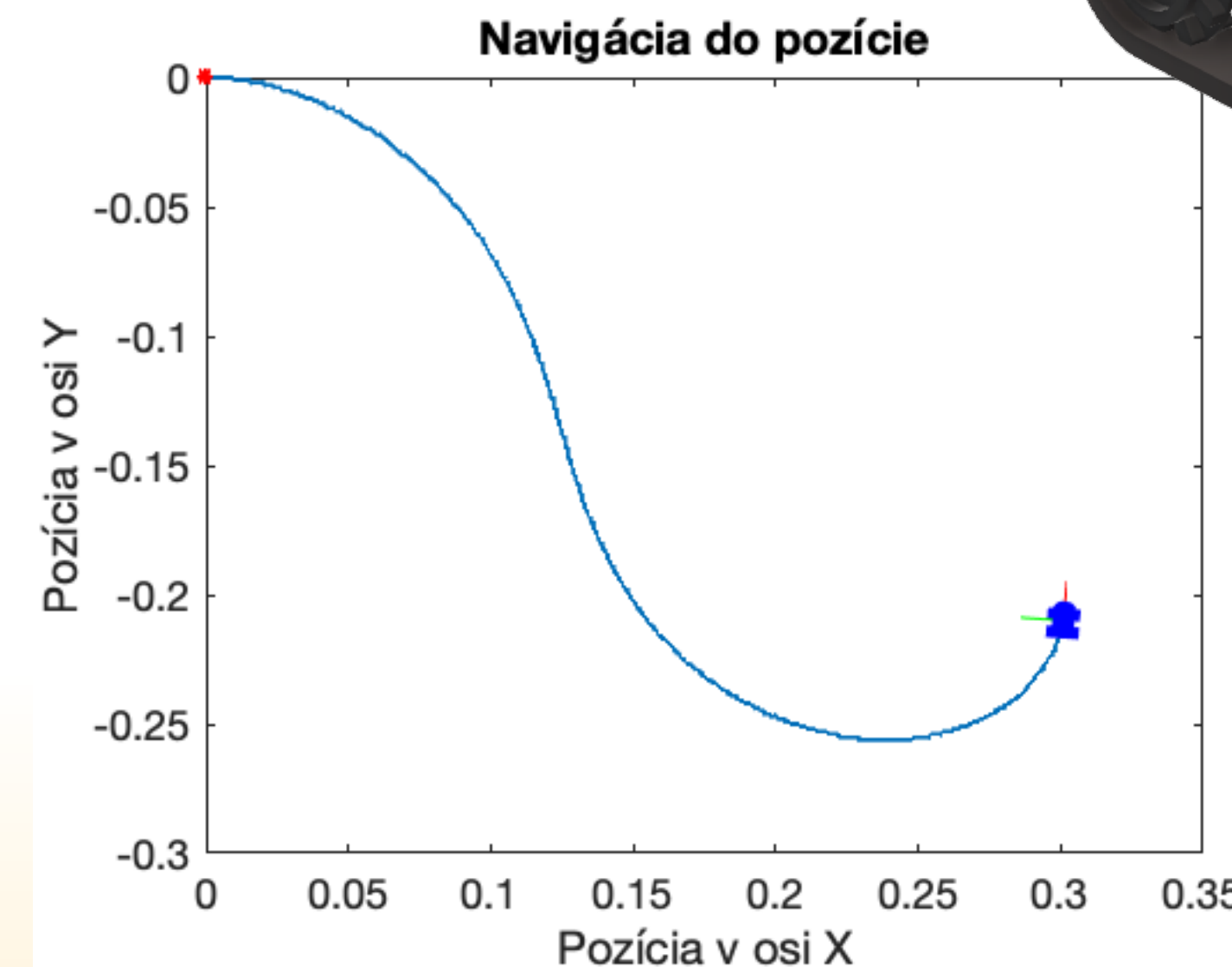


Obr. 46 - LQI

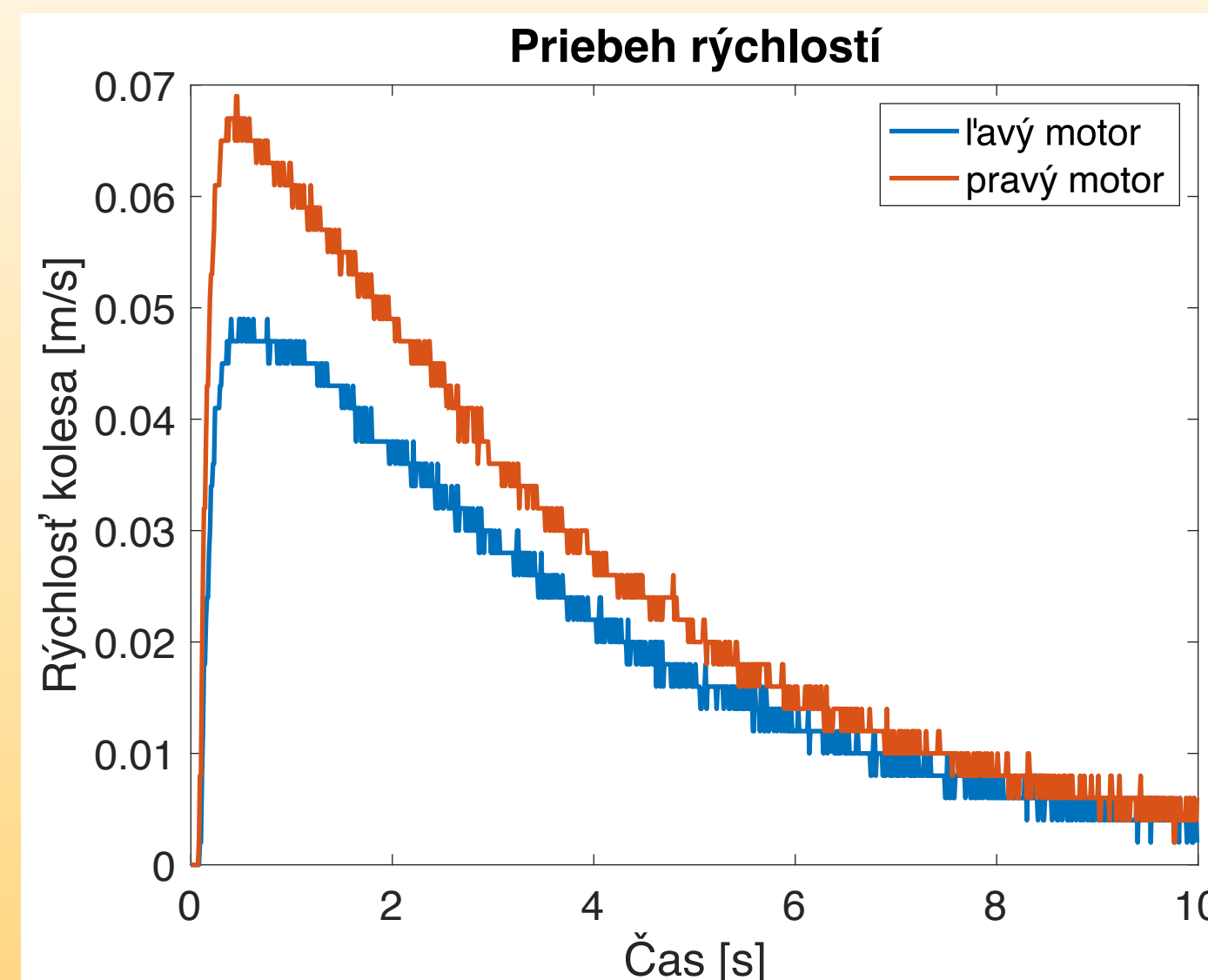
C. / Modul 2 - Navigačné riadenie



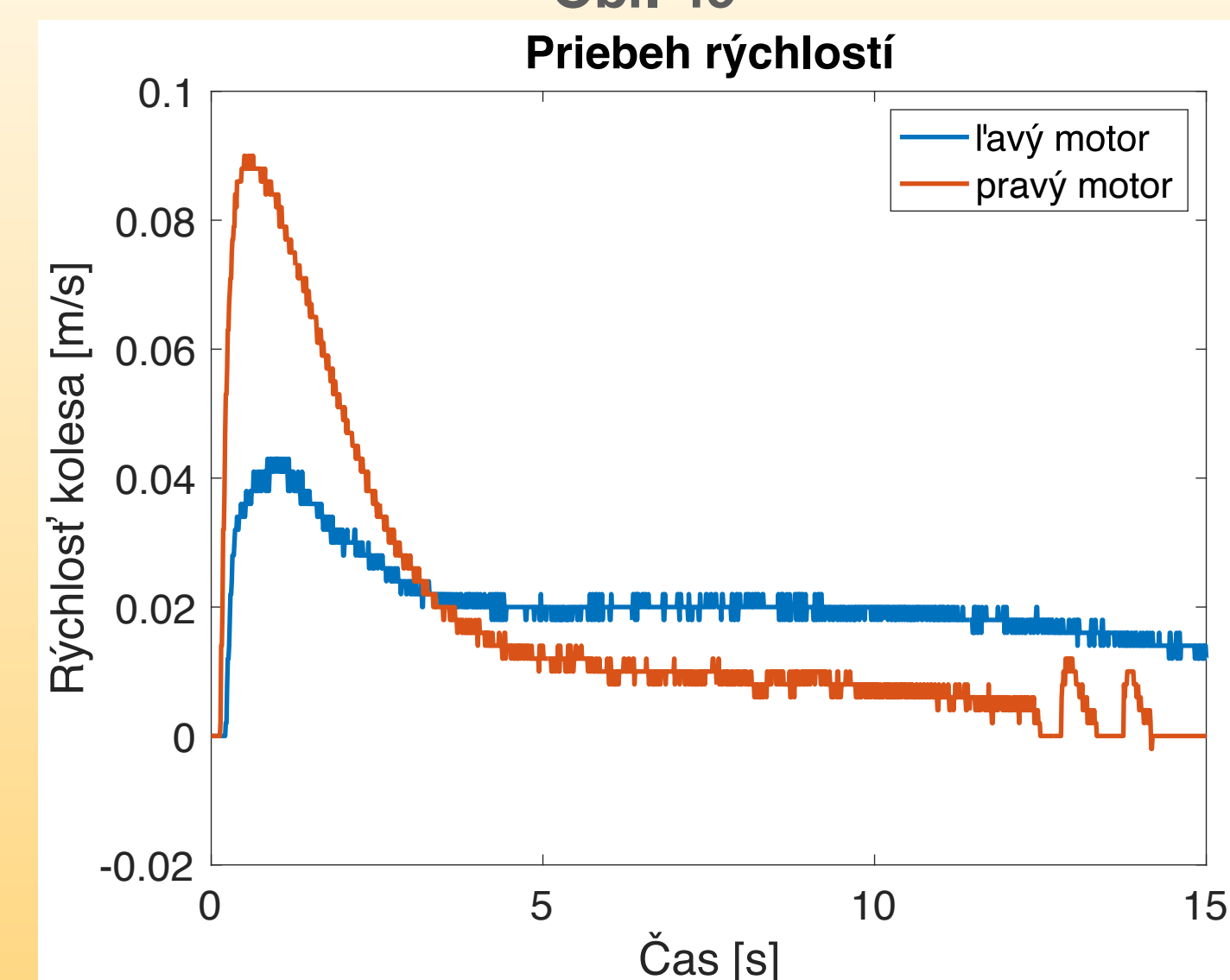
Obr. 47



Obr. 49



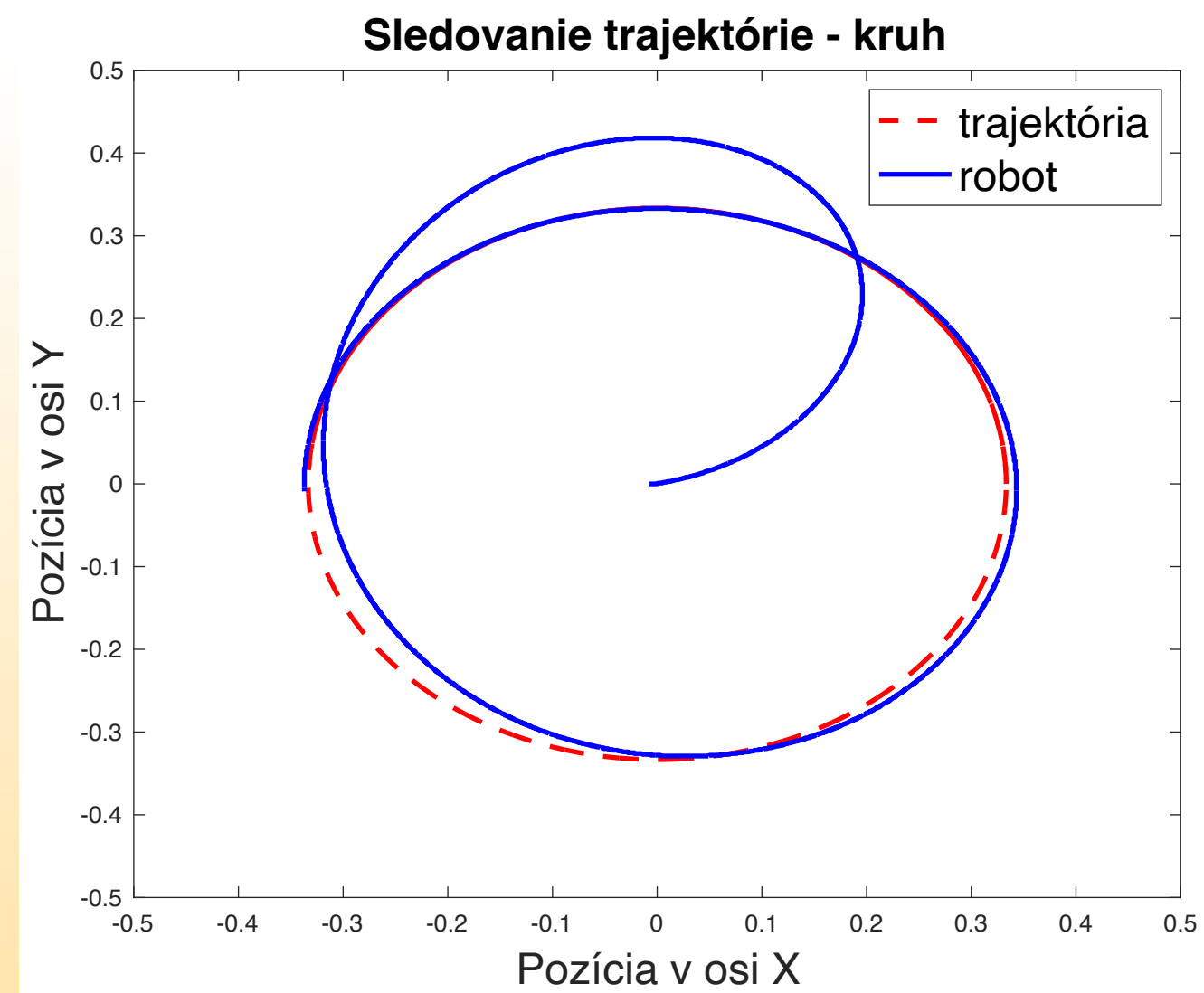
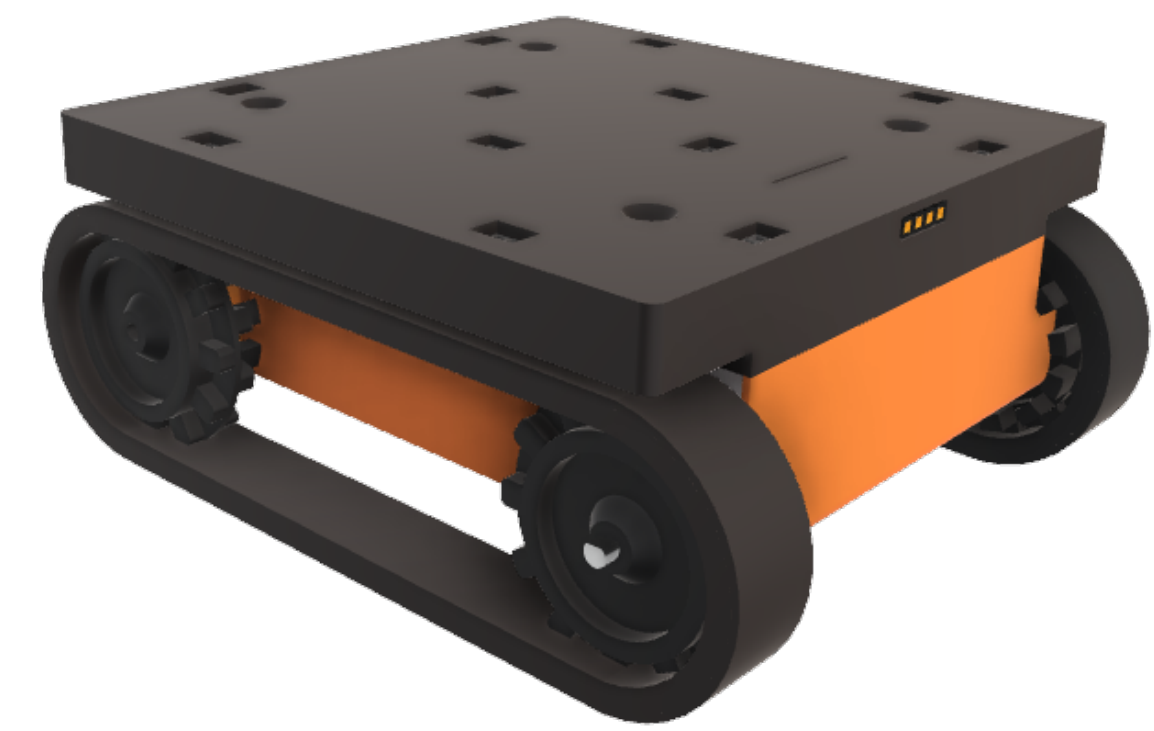
Obr. 48



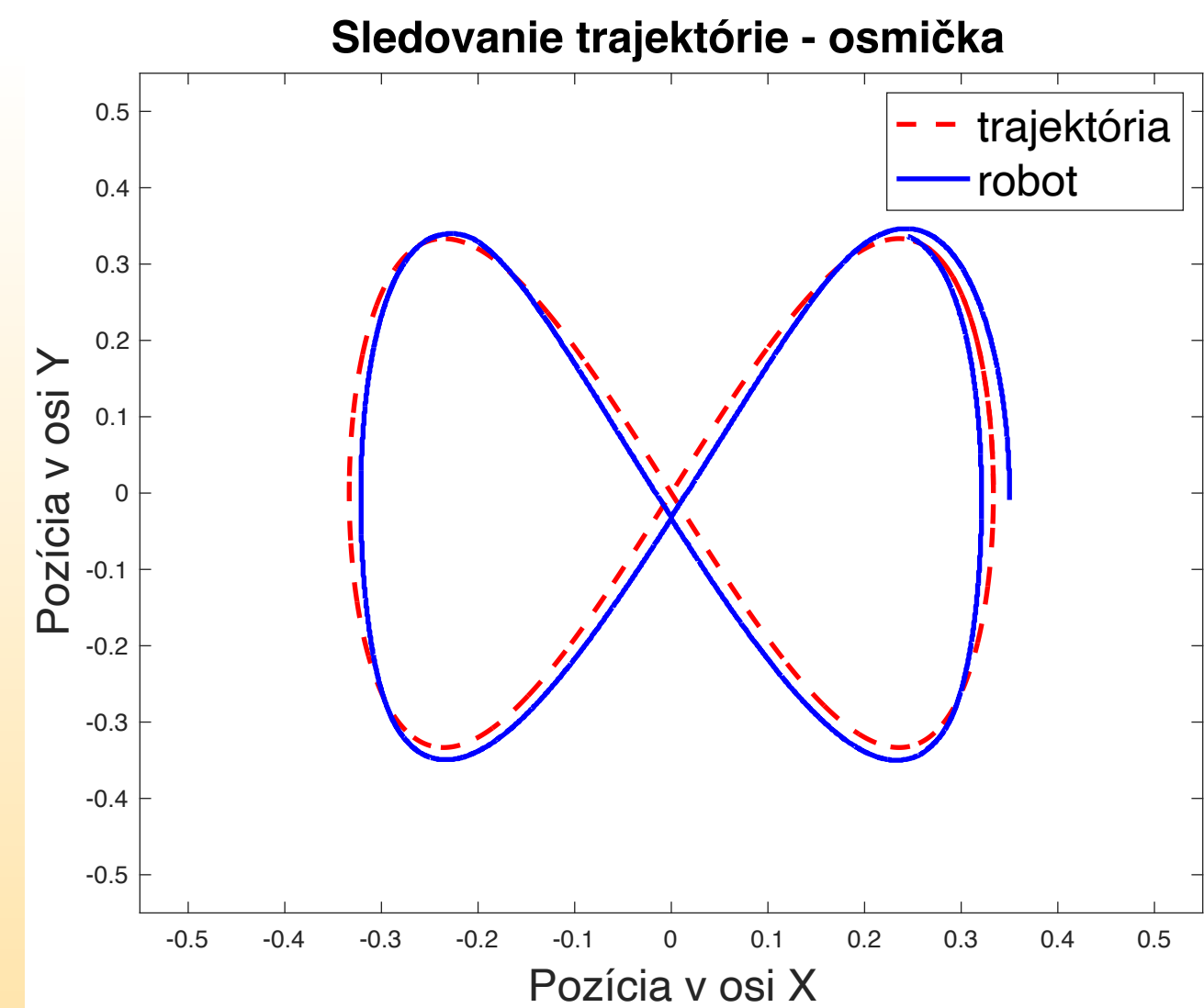
Obr. 50

Testované
vnútorné slučky:
PS; LQI

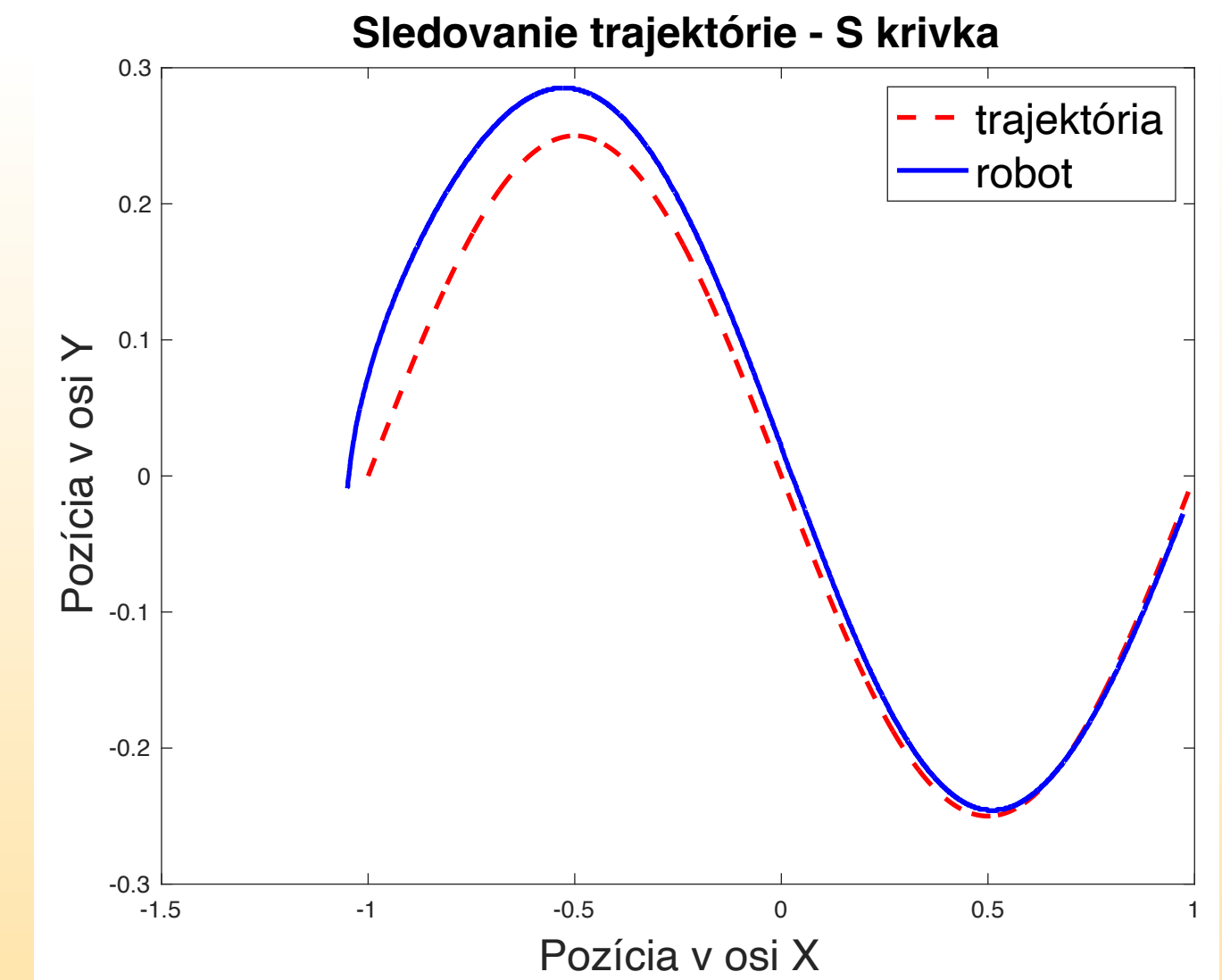
C. / Modul 3 - Sledovanie trajektórie



Obr. 51



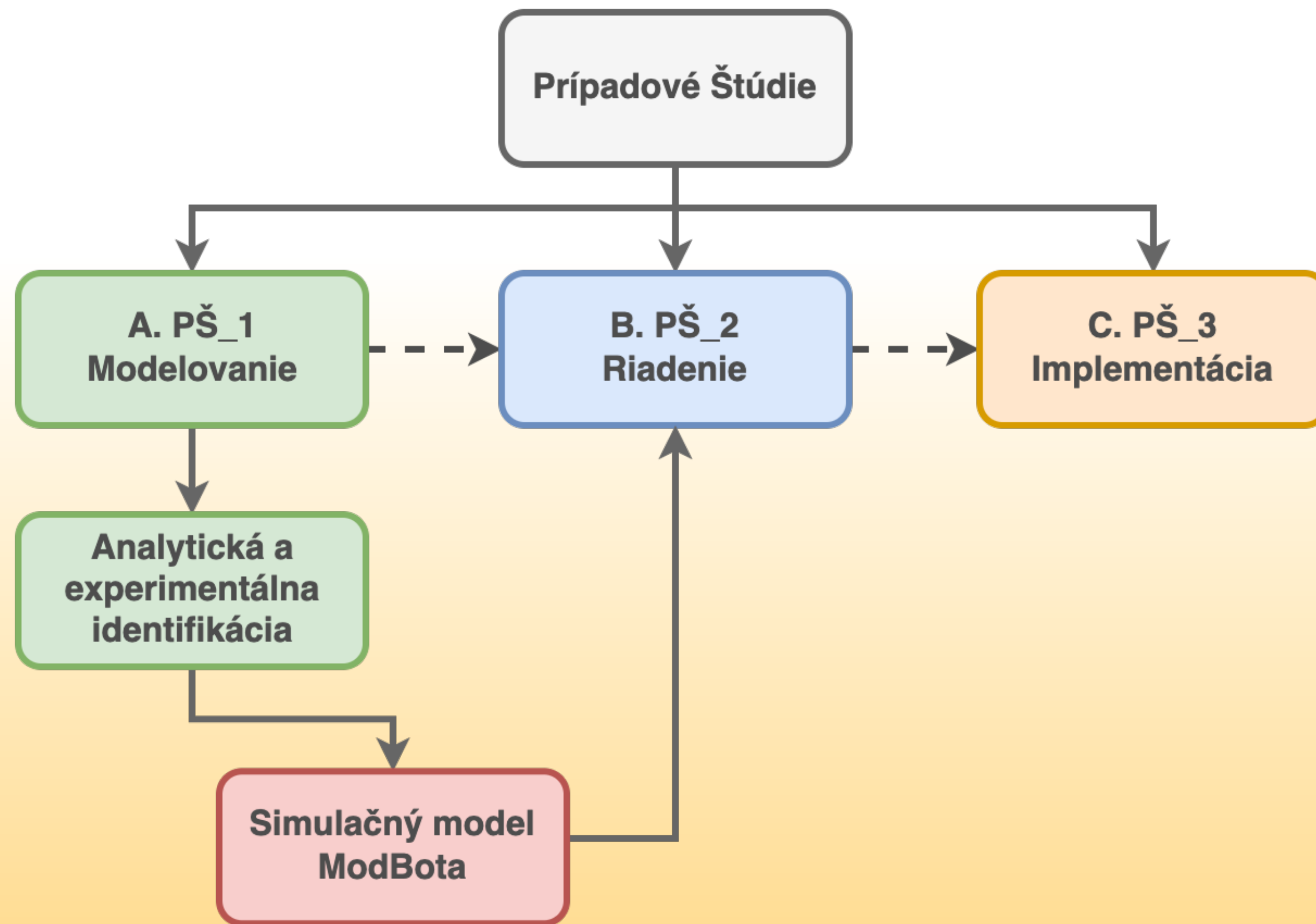
Obr. 52



Obr. 53

Testované vnútorné slučky: PS; LQI

II. Zhodnotenie výsledkov



Obr. 54 Zhrnutie

- Vytvorenie matematického a simulačného modelu robota ModBot
- Naprogramovanie simulačných modulov pre prípadové štúdie
- Naprogramovanie modulov na laboratórnom modeli ModBot

ĎAKUJEM
ZA POZORNOST