

P01a

utorok 18. februára 2025

7:27



AR00_txt_o
rganizacia

Organizácia predmetu

Adaptívne riadenie (LS, ak. r. 2024/2025)

Cieľ predmetu:

Študenti po absolvovaní predmetu získajú vedomosti o najvýznamnejších metódach a algoritmoch používaných v oblasti adaptívneho riadenia procesov. Absolventi predmetu získajú vedomosti týkajúce sa odvodenia a analýzy vlastností vybraných algoritmov priameho adaptívneho riadenia a nepriameho adaptívneho riadenia. Získajú poznatky o základných princípoch vybraných heuristických adaptívnych regulátorov, komerčných adaptívnych regulátorov, a princípoch využitia adaptácie pri fuzzy riadiacich systémoch.

Zodpovedný za predmet: Ing. Marián Tárník, PhD.

Predmet patrí medzi povinné predmety a študent po absolvovaní získa 7 kreditov. Týždenný rozsah predmetu: prednášky: 2 h, cvičenia: 2 h

Predmet zabezpečujú:

Ing. Marián Tárník, PhD. (prednášky, cvičenia)

Ing. Róbert Málík (cvičenia)

Podmienky absolvovania predmetu:

1. Aktívna účasť na vyučovacom procese.
2. Predpokladom pre vykonanie skúšky je zisk 33,6 a viac bodov počas semestra. Počas semestra je možné získať 60 bodov.
3. Účasť na záverečnej skúške je *nevyhnutná*, je možné získať 40 bodov.

Priebežné hodnotenie počas semestra:

- Priebežná práca na cvičeniach: 15 bodov
- Krátka písomka na cvičeniach: 10 bodov
- Písomka v čase 7. prednášky: 20 bodov
- Vypracovanie semestrálneho zadania (referát): 15 bodov

Učebný materiál:

Základný učebný materiál bude priebežne dostupný na dokumentovom serveri v AIS v priečinku predmetu I-ADRIA.

(DS / Fakulta elektrotechniky a informa... / Predmety / LS 2024/2025 / I-ADRIA Adaptívne riadenie)

Zároveň je učebný materiál verejne dostupný prostredníctvom repozitára na GitHub: <https://github.com/PracovnyBod/ADRIA>

Aktualizáciu tohto dokumentu (najmä harmonogramu na nasledujúcej strane) je najvýhodnejšie sledovať na: https://github.com/PracovnyBod/ADRIA/blob/master/doc/AR00_txt_organizacia/AR00_txt_organizacia.pdf


$$u = \Theta^T \omega$$
$$[\dots] \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}$$

Harmonogram semestra

Týždeň	Obsah
1. predn.	<ul style="list-style-type: none"> Úvod, účel predmetu, história a súčasnosť, adaptívna stabilizácia. [AR01, AR02,]
cv.	<ul style="list-style-type: none"> Cvičenie prvé. [AR02] [1b]
2. predn.	<ul style="list-style-type: none"> Samonastavujúci sa regulátor. ←
cv.	<ul style="list-style-type: none"> Cvičenie druhé: rekurzívna metóda najmenších štvorcov (reprodukcia vzorového príkladu). [1b]
3. predn.	<ul style="list-style-type: none"> Riadenie (adaptívne riadenie) s referenčným modelom, <i>MRAC</i>¹ <i>gradientný</i>.
cv.	<ul style="list-style-type: none"> Cvičenie tretie: samonastavujúci sa regulátor. [1b]
4. predn.	<ul style="list-style-type: none"> <i>MRAC gradientný</i> (pokračovanie a info k cvičeniu), Klasické Adaptívne riadenie s referenčným modelom s využitím Lyapunovovej teórie stability, <i>MRAC stavový</i>.
cv.	<ul style="list-style-type: none"> Krátka písomka: (12. marec 2025) [10b] Priestor pre dokončenie tém z predchádzajúcich cvičení (nepovinné).
5. predn.	<ul style="list-style-type: none"> <i>MRAC stavový</i> (pokračovanie a info k cvičeniu).
cv.	<ul style="list-style-type: none"> Cvičenie štvrté: <i>MRAC gradientný</i> [3b]
6. predn.	<ul style="list-style-type: none"> Zovšeobecnenie riadenia s referenčným modelom, MRC² problém. <i>MRAC vstupno-výstupný</i> pre $n^* = 1$.
cv.	<ul style="list-style-type: none"> Cvičenie piate: <i>MRAC stavový</i> [5b]
7. predn. 01.04.2025	<ul style="list-style-type: none"> Semestrálna písomka v čase a mieste prednášky (... a nie je to „prvý apríl“) [20b]
cv.	<ul style="list-style-type: none"> Cvičenie šieste: príklad k téme MRC problém Prípadné dokončenie úloh z predchádzajúcich cvičení. (<i>MRAC gradientný</i>, <i>MRAC stavový</i>) [1b]

¹Model Reference Adaptive Control

²Model Reference Control

8.	predn. 08.04.2025	<ul style="list-style-type: none"> • Prednáška nie je. Študijné voľno pre ŠVOČ.
	cv.	<ul style="list-style-type: none"> • Cvičenie siedme: <i>MRAC vstupno-výstupný</i> pre $n^* = 1$ (priamo nadväzuje na predchádzajúce cvičenie.) [2b] • Oboznámenie sa so semestrálnym zadáním [15b]
9.	predn.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>MRAC vstupno-výstupný</i> pre $n^* = 1$ (pokračovanie). • <i>MRAC vstupno-výstupný</i> pre $n^* = 2$.
	cv.	<ul style="list-style-type: none"> • Priestor pre prácu na referáte.
10.	predn.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>MRAC vstupno-výstupný</i> pre $n^* = 2$. • Otázky implementácie algoritmov riadiacich systémov vyplývajúcich z pokročilých metód automatického riadenia.
	cv.	<ul style="list-style-type: none"> • Priestor pre prácu na referáte.
11.	predn.	<ul style="list-style-type: none"> • Pripravuje sa...
	cv. 30.04.2025	<ul style="list-style-type: none"> • Cvičenie nie je. Vyučuje sa podľa rozvrhu na štvrtok.
12.	predn.	<ul style="list-style-type: none"> • Pripravuje sa...
	cv.	<ul style="list-style-type: none"> • Pripravuje sa... [1b]
13.	predn.	<ul style="list-style-type: none"> • Priestor pre náhradný termín semestrálnej písomky...
	cv.	<ul style="list-style-type: none"> • Časová rezerva, priestor pre konzultácie...
		<p> Odhad termínu skúšky: prvý týždeň skúškového obdobia, začína 19.05.2025.</p>

Učebnice pre prehľad

- [1] P. Ioannou a J. Sun. *Robust Adaptive Control*. Prentice Hall, Inc, 1996. URL: http://www-rcf.usc.edu/~ioannou/Robust_Adaptive_Control.htm.
- [2] P. Ioannou a B. Fidan. *Adaptive Control Tutorial*. Society for Industrial a Applied Mathematics, USA., 2006.
- [3] H. Butler. *Model Reference Adaptive Control: From theory to practice*. Prentice Hall International (UK) Ltd., 1992.
- [4] G. Tao. *Adaptive control design and analysis*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.

- [5] K.J. Åström a B. Wittenmark. *Adaptive Control, 2nd edition*. Addison-Wesley, 1995.
- [6] Bjorn Wittenmark Karl J. Astrom. *Adaptive control*. 2. vyd. Dover Publications, 1994. ISBN: 9780486462783, 0486462781.
- [7] S. Sastry a M. Bodson. *Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness*. Prentice-Hall, 1994.
- [8] Anuradha M. Narendra Kumpati S.; Annaswamy. *Stable Adaptive Systems*. Dover Publication, 2012. ISBN: 9780486442266.
- [9] K. M. Passino a S. Yurkovich. *Fuzzy Control*. Addison Wesley Longman, Inc., 1998.



AR01_txt_p
rehladAR

Veľmi stručný prehľad Adaptívneho riadenia

Obsah

1	História a nedávna história	1
2	Schémy Adaptívneho riadenia	2
2.1	Základná schéma AR	2
2.1.1	Robustné riadenie	2
2.2	Gain Scheduling	2
2.3	Priame a nepriame AR	3
3	Otázky a úlohy	4

1 História a nedávna história

NÁZVY *Adaptívny systém* a *Adaptívne riadenie* boli v publikáciách prvý krát použité okolo roku 1950. Motiváciou pre vývoj adaptívnych regulátorov bol návrh autopilota pre vysokovýkonné experimentálne lietadlá na začiatku 50-tych rokov.

Lietadlo operuje vo veľkom rozsahu rýchlostí a výšok. Komplexná dynamika lietadla môže byť pre daný pracovný bod (rýchlosť, výška) aproximovaná lineárnym modelom v tvare

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1a)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (1b)$$

pričom A , B , C a D sú funkciou pracovného bodu, ktorý sa mení v čase (teda A , B , C a D sú funkciou času).

Zjednodušene, tá istá výchylka „smerovky“ (alebo kormidla na lodi) spôsobí pri rôznych rýchlostiach iný moment sily (ktorý otáča lietadlo alebo loď). Teda mení sa parameter riadeného systému, ktorý môže byť opísaný napríklad prenosovou funkciou, ktorej vstupom je výchylka kormidla a výstupom je kurz (natočenie) lode.

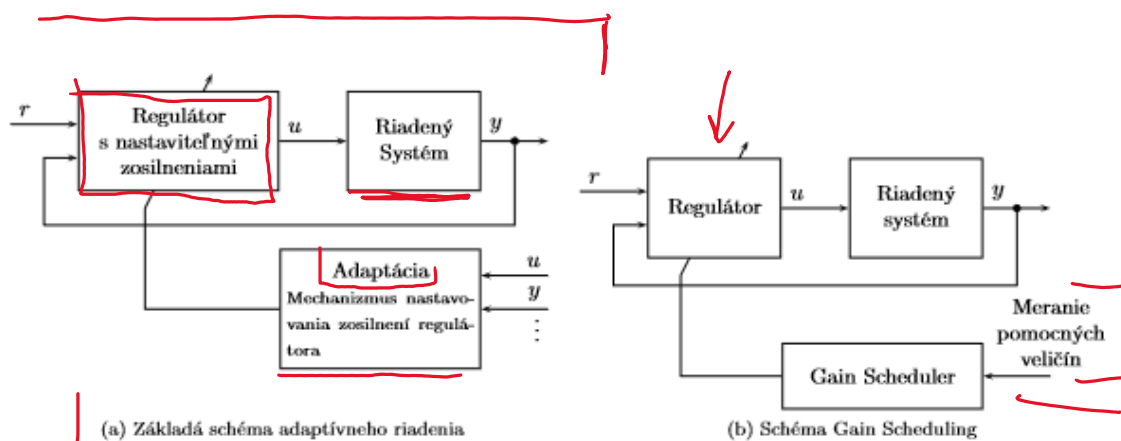
Toľko veľmi stručné zhrnutie inak veľmi rozsiahlej histórie Adaptívneho riadenia.

Ako príklad súčasného/nedávneho využitia Adaptívneho riadenia možno uviesť opäť systémy riadenia letu. V správe *The Impact of Control Technology*, T. Samad and A.M. Annaswamy (eds.), *IEEE Control Systems Society*, 2011, available at www.ieeecss.org, je uvedený takýto príklad.

Názvom *The Joint Direct Attack Munition* sa označuje navádzací systém, ktorý konvertuje nenavádzané bomby na *smart* muníciu schopnú činnosti v každom počasi. V tomto systéme sa uplatňuje robustné a adaptívne riadenie. Navzájom sa dopĺňajú a kombinujú.

Tento príklad uvádzame najmä preto, aby sme čitateľa upozornili na uvedenú správu. Medzičasom (2014) je dostupná aj druhá edícia tejto správy, dostupné na: <http://ieeecss.org/impact-control-technology-2nd-edition>.

Autor si na začiatku roka 2022 uvedomuje možnú zmätenosť čitateľa ak sa za súčasnosť, či nedávnu minulosť označujú roky 2011, prípadne 2014. Ide však o obdobie, keď vznikol tento učebný text. Adaptívne riadenie, ako pojem, sa možno vytráca,



Obr. 1: Základná schéma adaptívneho riadenia a schéma Gain Scheduling

avšak princípy, najmä v spojení s identifikáciou systémov vo všeobecnosti, sú viac ako aktuálne. Nájdeme ich prezlečené alebo zaradené pod pojmy ako je strojové učenie (machine learning), spracovanie signálov (signal processing) alebo priebežná identifikácia systémov.

Podobne, ak sa čitateľovi zdá odporúčaná literatúra staršieho dáta, nech má na pamäti, že ide o relatívne novinky v čase poslednej rozsiahlejšej aktualizácie tohto učebného materiálu – predovšetkým kniha [1] z roku 2006. Ostatné sa dajú považovať za klasické učebnice tohto predmetu a do popredia tu dávame knihu [2] najmä pre skutočnosť, že je voľne dostupná tu: https://viterbi-web.usc.edu/~ioannou/RobustAdaptiveBook95pdf/Robust_Adaptive_Control.pdf.

2 Schémy Adaptívneho riadenia

Túto časť možno chápať aj ako veľmi stručné¹ rozdelenie Adaptívneho riadenia.

2.1 Základná schéma AR

Priebeh výstupnej veličiny obsahuje informáciu o stave x systému a o parametroch systému. Preto by nejaký sofistikovaný spätnoväzbový riadiaci systém mal byť schopný vysporiadať sa so zmenami v riadenom systéme a zabezpečiť dosiahnutie požadovaného cieľa riadenia. Tieto myšlienky viedli k návrhu spätnoväzbovej štruktúry riadenia, ktorá je základom adaptívneho riadenia.

V štandardnom regulačnom obvode (v uzavretom regulačnom obvode – URO) je použitý regulátor, ktorého parametre (zosilnenia) je možné meniť (aj v počas činnosti). K uzavretému obvodu je pridaný mechanizmus pre nastavovanie zosilnení regulátora. Podľa spôsobu určenia zmeny zosilnení regulátora (v reakcii na zmenu parametrov riadeného systému a teda na zmenu v dynamike sústavy a porúch) sa odlišujú rôzne typy schém adaptívneho riadenia.

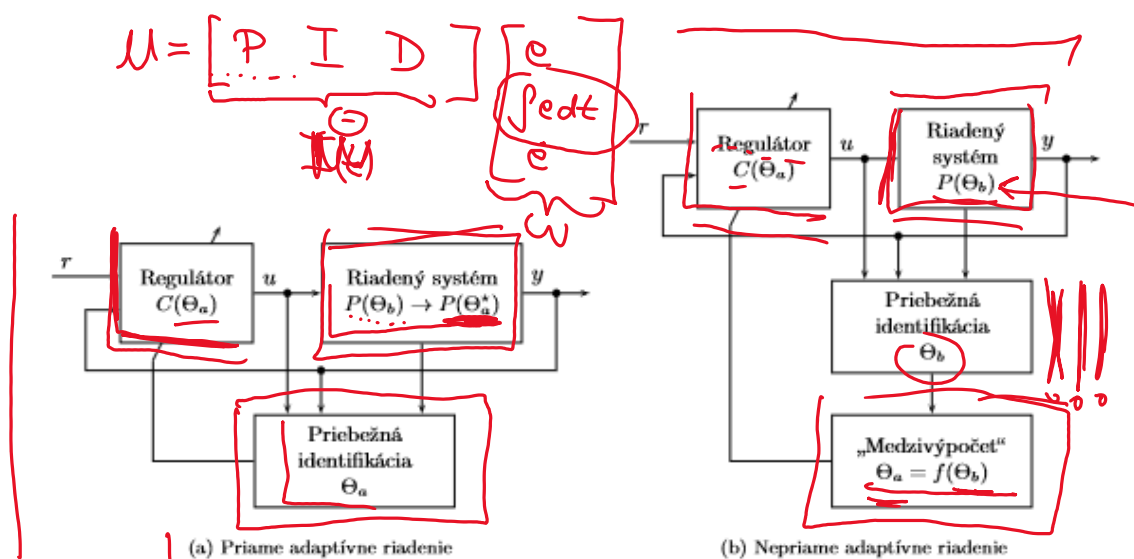
2.1.1 Robustné riadenie

Pre vysporiadanie sa so zmenami parametrov riadeného systému môže byť navrhnutý aj regulátor s konštantnými zosilneniami — týmto sa zaoberá *Robustné riadenie*. Regulátor navrhnutý metódami robustného riadenia sa však nepovažuje za adaptívny regulátor aj keď dokáže zvládnuť zmenu parametrov sústavy.

2.2 Gain Scheduling

Uvažujme, že v pracovnom bode i sú parametre modelu lietadla A_i , B_i , C_i a D_i známe. Pre daný pracovný bod teda vieme určiť regulátor, ktorý zabezpečí vyšpecifikované

¹Všetko je tu akosi veľmi stručné...



Obr. 2: Principiálne schémy priameho a nepriameho adaptívneho riadenia

ciele. Zosilnenia takého regulátora označme Θ_i . Pri uvažovaní viacerých pracovných bodov máme množinu zosilnení: $\Theta_1, \dots, \Theta_i, \dots, \Theta_N$, kde N je počet uvažovaných pracovných bodov.

Po detegovaní pracovného bodu sa na regulátore nastaví (prepne) príslušné zosilnenie (parametre regulátora). Tento spôsob adaptácie sa nazýva „Prepínanie parametrov regulátora“ — *Gain Scheduling* (GS).

Prechody medzi pracovnými bodmi sa riešia napríklad interpoláciou určených zosilnení alebo zvýšením počtu uvažovaných (detegovaných) pracovných bodov.

Dvomi prvkami, ktoré sú charakteristické pre GS sú *Look-up Table* (Vyhľadávacia tabuľka — tabuľka, v ktorej sa vyhľadávajú príslušné zosilnenia) a *meranie pomocných veličín*, takých ktoré sú vo vhodnom vzťahu s pracovným bodom. Na základe merania pomocných veličín sa rozhoduje (určuje), v ktorom pracovnom bode sústava operuje a podľa toho sa vyhľadávajú a prepne príslušné zosilnenia regulátora.

Výhodou GS je, že zosilnenia regulátora sa menia okamžite po detegovaní nového pracovného bodu. Výhodou je teda rýchlosť nájdenia teoreticky správnych parametrov regulátora. Časté a rýchle zmeny zosilnení regulátora však môžu viesť k nestabilite celého systému. Preto sa pridávajú obmedzenia pre frekvenciu prepínania.

Nevýhodou je, že mechanizmus prepínania a zosilnenia sú určené vopred (off-line) a teda kompenzácia prípadnej odchýlky od predpokladaného správania nie je možná. Nepredvídateľné zmeny dynamiky sústavy môžu viesť k zhoršeniu kvality riadenia alebo až k úplnému zlyhaniu. Ďalšou nevýhodou sú vysoké náklady na návrh a najmä na implementáciu, ktoré narastajú so zvyšujúcim sa počtom pracovných bodov.

2.3 Priame a nepriame AR

Vo všeobecnosti, adaptívny regulátor sa skladá z on-line estimátora (priebežná identifikácia) neznámych parametrov a zákona riadenia (algoritmus riadenia, regulátor). Zákon riadenia je motivovaný prípadom keď hodnoty parametrov sústavy sú známe, avšak konštantné zosilnenia sú nahradené časovo premenlivými.

Spôsob akým je on-line estimátor, nazývaný *Zákon adaptácie*, skombinovaný so zákonom riadenia určuje jeden z dvoch prístupov v adaptívnom riadení: Priame adaptívne riadenie a Nepriame adaptívne riadenie.

Pri nepriamom adaptívnom riadení sa priebežne identifikujú parametre uvažovaného modelu systému a následne sú tieto použité pri výpočte zosilnení zákona riadenia. Predpokladá sa pri tom, že identifikované parametre systému sú istotne ekvivalentné so skutočnými parametrami systému. Medzivýpočet potrebný pre výpočet parametrov zákona riadenia charakterizuje nepriame adaptívne riadenie.


Pri priamom adaptívnom riadení je model systému parametrizovaný z hľadiska parametrov zákona riadenia. Rovnica modelu systému je vyjadrená tak, že obsahuje

ideálne parametre zákona riadenia. Práve tieto parametre sú priebežne identifikované (pretože ideálne parametre sú neznáme) – adaptované. Výstupom priebežnej identifikácie (zákona adaptácie) sú teda priamo parametre zákona riadenia. Nie je potrebný medzivýpočet ako v prípade nepriameho adaptívneho riadenia.

Literatúra

- [1] P. Ioannou a B. Fidan. *Adaptive Control Tutorial*. Society for Industrial and Applied Mathematics, USA., 2006.
- [2] P. Ioannou a J. Sun. *Robust Adaptive Control*. Prentice Hall, Inc, 1996. URL: http://www-rcf.usc.edu/~ioannou/Robust_Adaptive_Control.htm.

3 Otázky a úlohy

1. Nakreslite základnú schému adaptívneho riadenia.
2. Nakreslite schému Gain Scheduling.
3. Nakreslite schému priameho adaptívneho riadenia. 
4. Nakreslite schému nepriameho adaptívneho riadenia.
5. Vysvetlite rozdiel medzi priamym a nepriamym adaptívnym riadením.