

# Úvahy a zamyslenia na tému kybernetika a teória riadenia (1)

V predkladanej sérii článkov, ktoré hovoria o histórii, vývoji a súčasnom stave kybernetiky, teórie riadenia a príbuzných disciplín, ako aj o niektorých metodologických problémoch s tým spojených, budú postupne uvedené tieto články:

Paradigmy teórie automatického riadenia, Existuje vôbec teória automatického riadenia, Kybernetika a teória riadenia: minulosť a budúcnosť a Idea univerzity 21. storočia – zjednotenie vedy a vzdelávania. Cieľom týchto článkov, ktorých obsah od jedného autora môže byť len subjektívny, je pokúsiť sa vidieť niektoré problémy z nadhľadu a vyvolať prípadnú diskusiu.

## Paradigmy teórie automatického riadenia

### 1. Klasické paradigmy TAR

Problémy vývinu vedy a osobitne vývinu vedeckých teórií sú jednou z najdiskutovanejších otázok v súčasnej metodológii vied. Metodológia je náuka (teória) o vedeckých a výskumných metódach práce, postupov, pomocou ktorých sa buduje vedecký systém; veda o postupoch vedeckého poznávania. Osobitne vystúpil tento problém v novodobej revolúcii, ktorá prebieha v prírodných vedách v 19. a 20. storočí. N. Bohr pri rozpracovaní svojej teórie atómu sformuloval „princíp korešpondencie“, ktorý sa dnes pokladá za jeden z najdôležitejších všeobecných princípov metodológie vied. Bohrov princíp vyjadrujúci korešpondenciu medzi starou teóriou  $T_1$  a novou teóriou  $T_2$  predpokladá:

1. do krajnosti využiť pojmy starej teórie pri konštruovaní teoretického modelu novej teórie;
2. ak vznikajú antinómie, treba do starej teórie zaviesť nové postuláty, ktoré umožnia ich prekonanie;
3. vybudovanie novej teórie  $T_2$ , z ktorej sa dá v určitom limitnom prípade odvodiť systém  $T'_1$ , korešpondujúci s jadrom pôvodnej teórie  $T_1$ , pričom  $T'_1$  nemusí byť totožné s  $T_1$ .

### Filozoficko-metodologické koncepcie

Pozrime sa, ako riešia vyššie uvedené problémy niektoré súčasné filozoficko-metodologické koncepcie:

- a) Logický pozitivizmus vychádza z princípov krajného empirizmu a verifikacionizmu, pričom inklinuje ku klasickému kumulativizmu.
- b) Popperova filozofia vedy vychádza z niektorých antagonistických postojov voči pozitivizmu, napr. stavia proti indukcionizmu dedukcionizmus, proti empirizmu kritický racionalizmus a najmä tzv. metodologický falzifikacionizmus. Rast vedeckého poznania podľa Poppera môžeme vyjadriť schémou  $P_1 \rightarrow TT \rightarrow FF \rightarrow P_2$ , kde  $P_1$  sú problémy, ktoré treba riešiť,  $TT$  sú predbežné teórie, potom je etapa eliminácie chýb, ktoré generujú nové problémy  $P_2$ .
- c) Historická škola (Kuhn, Lakatos, Feyerabend). Predstavitelia tejto školy ostro odsudzujú empirizmus, ahistorizmus, kumulativizmus a pod. Vo svojich koncepciách zdôrazňujú nevyhnutnosť historickej analýzy vedy ako činnosti spoločenstva vedcov.

Nosnými pojmami Kuhnovej koncepcie sú pojmy „paradigmy“ a „vedecké spoločenstvo“. Štruktúru paradigmy tvoria isté metafyzické (ontologické) tvrdenia, hodnoty a vzory, vzorové spôsoby riešenia konkrétnych úloh. Vedecké spoločenstvo je skupina (skupiny) vedcov, ktorí vyznávajú a veria v istú paradigmu. Odtiaľ vzniká aj pojem „normálnej vedy“, ktorá spočíva v klasicky kumulativistickom rozvíjaní paradigmy a pojem „vedeckej revolúcie“, ktorá spočíva v nahradení starej paradigmy novou a má antikumulativistický charakter. Kuhnov cyklus vedeckého poznania prebieha obdobím „normálnej vedy“ (uplatnenie paradigmy na známe fakty, rozširovanie jej hraníc, jej spresňovanie, riešenie hlavolamov, výklad v učebniciach), obdobím „kríz“

(hlavolamy prerastajú do anomálií nevysvetliteľných v rámci danej paradigmy) a obdobím „revolúcie“ (vedecké spoločenstvo prestane veriť v starú paradigmu a začne veriť v novú). Vedecká revolúcia je riešenie kvalitatívnych zmien vo vývine vedeckého poznania.

Ďalej sa pokúsime na báze už uvedených poznatkov charakterizovať vývoj teórie automatického riadenia (TAR), určiť jeho paradigmy a na základe takejto analýzy určiť miesto TAR v ďalšom období.

### Paradigma klasickej TAR

Vývoj TAR, jeho história je predmetom veľkého počtu prác, v ktorých sú uvedené základné etapy jeho vývoja, prínosy jednotlivých vedcov, prognózy ďalšieho vývoja. Aj keď hodnotenia a prístupy jednotlivých autorov sú rôzne, predsa len možno sledovať hlavnú vývojovú líniu TAR. Ako sa konštatuje aj v encyklopédii kybernetiky, základy TAR ako vedy sú položené v prácach anglického fyzika G. Maxwella, ruského vedca I. A. Vyšnogradského, slovenského inžiniera A. Stodolu a ruského vedca A. A. Ljapunova. Táto prvá vývojová etapa (dobře spracovaná najmä v knihe M. Tolle: *Regelung der Kraftmaschinen*. Berlin, Springer, 1905) sa končí na začiatku 20. storočia. Podľa A. A. Androva veľmi významnú úlohu v rozvoji TAR mal A. Stodola, zatiaľ čo práce Tolleho hodnotí ako kompilačné a pedagogické. Uvedenú etapu môžeme nazvať v zmysle T. Kuhna „paradigmou klasickej TAR“. V ďalšom období sa TAR neustále rozvíja, zdokonaľuje a dopĺňa (etapa „normálnej vedy“), napr. diagramy Nyquista (1932), Michajlova (1938), Nejmarka (1947), kritériá stability Routh-Schura, Hurwitz (na popud A. Stodolu); riešia sa problémy linearizácie nelineárnych systémov, problémy autonómnosti a invariantnosti, ako aj problémy súvisiace s pôsobením náhodných porúch. Ťažkosti, ktoré vznikali najmä pri riešení zložitejších úloh syntézy mnohoparametrových systémov, viedli k istému nahromadeniu problémov, ktoré môžeme chápať v zmysle T. Kuhna ako isté krízové obdobie.

### Paradigma teórie optimálneho a adaptívneho riadenia

Vyriešenie veľkej časti týchto problémov priniesla ďalšia etapa vývoja TAR v 50-tych rokoch. Túto etapu môžeme charakterizovať ako istú revolúciu a zmenu paradigmy, ktorú môžeme nazvať „paradigmou teórie optimálneho a adaptívneho riadenia“ (v šesťdesiatych rokoch sa často používal názov „moderná teória riadenia“). Zmena paradigmy mala typické znaky vedeckej revolúcie. Uvedme aspoň niektoré z nich: zavedenie pojmu stav (stavový priestor); namiesto opisu jednoparametrových systémov (najmä vo frekvenčnej oblasti) dôsledné používanie stavového opisu vo forme vektorových a maticových diferenciálnych rovníc (namiesto klasických skalárnych); využívanie exaktných matematických metód (variačný počet, Bellmanove dynamické programovanie, Pontrjaginov princíp maxima, Kalmanova filtrácia) namiesto rôznych intuitívnych graficko-výpočtových metód na určovanie parametrov regulátorov. Súčasne je rozpracovaná teória riadenia adaptívnych a učiacich sa systémov a začína sa využívanie výpočtovej techniky na navrhovanie, ako aj riadenie uvedených systémov.

mov. Z dnešného hľadiska išlo o skutočne revolučnú zmenu paradigmy aj z časového hľadiska (trvanie klasickej paradigmy niekoľko desaťročí, zmena paradigmy niekoľko rokov).

### Paradigma riadenia zložitých dynamických systémov

Koncom 60-tych rokov čoraz častejšie vznikajú požiadavky riešiť úlohy, ktoré sa vyznačujú väčšou „zložitou“ (napr. u nás tzv. automatizované systémy riadenia – ASR). V oblasti riadenia zložitých dynamických systémov dochádza v prvej polovici sedemdesiatych rokov k ďalšiemu skoku – k ďalšej zmene paradigmy. Nastupuje „paradigma riadenia zložitých dynamických systémov“.

Všetky klasické postupy sú založené na všeobecnom predpoklade centrálnosti, informácia o systéme, ako aj výpočty založené na tejto informácii sú centralizované.

Zdôraznime, že z teoretického hľadiska pojem centrálnosti je spoločný pre klasickú teóriu regulácie, ako aj pre moderné metódy riadenia a estimácie (filtrácie). Či už používame pre jednoparametrové sústavy riadenia napr. Nyquistove diagramy alebo pre stochastické optimálne regulátory princíp maxima alebo dynamické programovanie, vždy využívame predpoklad centrálnosti.

Pri riadení zložitých systémov predpoklad centrálnosti sčasti zlyháva pre nedostatok centralizovanej informácie alebo pre nedostatok kapacity centrálného výpočtového systému. Decentralizované riadenie vzniklo ako reakcia na tieto ťažkosti. Základnou charakteristikou decentralizovaného riadenia je existencia interakcií medzi podsystémami. Základným problémom decentralizovaných metód riadenia je dekompozícia. Zložitý systém treba rozdeliť (dekomponovať) na  $N$  jednoduchších podsystémov. Každý podsystém má svoj cieľ a jeho činnosť je v súlade s týmto cieľom. Ciele jednotlivých podsystémov môžu byť protichodné. Preto dekompozícia vyvoláva koordináciu podsystémov. Koordinátor (riadiaca jednotka, ktorá koordináciu vykonáva) riadi činnosť jednotlivých podsystémov tak, aby bol splnený globálny (celkový) cieľ.

## 2. Nové paradigmy TAR

### Paradigma DEDS

Na začiatku 80-tych rokov začína prudký rozvoj automatizácie diskrétnych výrobných procesov, najmä v strojárstve. Veľké výskumné tímy riešia úlohy riadenia robotov a tzv. pružných výrobných systémov. Pre tieto oblasti sa väčšina metód TAR opísaná v predchádzajúcich paradigmách ukázala ako nevhodná. Táto krízová situácia viedla k vzniku „paradigmy DEDS“ (Discrete Events Dynamic Systems).

Klasické systémy, ktoré boli a sú predmetom TAR, zahŕňajú najmä spojité systémy, ktoré sa dajú dobre opísať pomocou diferenciálnych alebo diferenciálnych rovníc. Existujú však systémy a situácie, v ktorých takéto modely nie sú vôbec vhodné. Sú to najmä systémy, ktoré zahŕňajú rôzne diskrétne premenné vrátane logických, čiže ide v podstate o hybridné modely (roboty, subsystém riadenia automobilu a pod.). Ďalšiu triedu tvoria už spomínané DEDS. Príklady takýchto systémov sú: pružné výrobné systémy (Flexible Manufacturing Systems), počítačové siete, dopravné systémy. Stav týchto systémov sa mení asynchrónne v diskrétnych okamihoch. Aj keď pre tieto systémy existujú rôzne modely, neexistujú metódy riadenia podobné ako v spojitých dynamických systémoch. To je spôsobené aj tým, že pre klasické spojité procesy boli ich modely vypracované počas veľmi dlhého obdobia (počnúc Newtonovou klasickou mechanikou, fyzikou, elektrotechnikou a pod.), zatiaľ čo ostatné sa skúmajú až v posledných rokoch.

Riadenie hybridných dynamických systémov vyžaduje teóriu, ktorá bude zahŕňať spojité aj diskrétne premenné, pričom musí zahŕňať aj pôsobenie ľudského činiteľa. Rozhodovacie procesy zahŕňajú:

1. diskrétnu množinu alternatívnych interpretácií pozorovaných údajov;
2. model pre každú z týchto alternatív;
3. procesory, ktoré generujú z daných údajov štatistické veličiny, umožňujúce rozhodnutie.

Táto vyššia úroveň rozhodovania bezprostredne ovplyvňuje riadenie (spätoväzobné) jednotlivých systémov. Takýto riadiaci člen na vyššej úrovni musí reagovať na rôzne situácie v procese riadenia a zabezpečiť napr. vhodnú rekonfiguráciu systému alebo alternatívne spôsoby činnosti. Musí pôsobiť ako „interpret“, ktorý je schopný transformovať lingvistické inštrukcie z vyššej úrovne na nominálne trajektórie a spätoväzobné riadiace algoritmy a naopak spracovať údaje zo snímačov na lingvistické premenné. V tomto smere musí byť vyvinutá vhodná symbolická reprezentácia príkazov na vyššej úrovni.

Čo sa týka dynamických systémov s diskrétnymi udalosťami (DEDS), treba vyvinúť nové modely týchto procesov, ako aj metódy analýzy a syntézy ich riadenia. Hoci sa v tomto smere dosiahol značný pokrok najmä použitím markovovských procesov, teórie hromadnej obsluhy, Petriho sietí, ako aj metód simulácie, nezodpovedá to stavu teórie riadenia pre spojité dynamické systémy. Príkladom takýchto problémov riadenia sú napr. dynamické adaptívne rozvrhovanie výroby v pružných výrobných systémoch (PVS), smerovanie informácií v rekonfigurovateľných komunikačných sieťach, decentralizované riadenie toku informácií a pod. Výskum v tejto oblasti by mal integrovať teóriu riadenia dynamických systémov s novými prístupmi, využívajúcimi formálnu logiku, jazyky, teóriu hromadnej obsluhy, ako aj nové možnosti v oblasti počítačov.

### Princíp korešpondencie v TAR

Analyzujeme, ako sa uplatňuje princíp korešpondencie vo vývoji TAR. Pre jednoduchosť a stručnosť si ukážme niektoré príklady. Klasická TAR (teória  $T_1$  neumožňovala úplne jednoznačne a teoreticky odôvodnene riešiť problém optimálneho riadenia mnohoparametrových dynamických systémov. Výsledok, ktorý bol na základe variačného počtu dosiahnutý v tzv. analytickom konštruovaní regulátorov (Letov, Kalman), je vyjadrený známym vzťahom  $u = -R^{-1}B^TKx$  (teória  $T_2$ ). Z teórie  $T_2$  možno pre klasické jednoparametrové systémy na základe uvedeného vzťahu odvodiť potrebné vzťahy (teória  $T'_1$ ), ktoré čiastočne alebo úplne korešponujú s klasickou teóriou  $T_1$ .

Analogické príklady môžeme nájsť aj medzi paradigmatom riadenia zložitých dynamických systémov a paradigmatom optimálneho a adaptívneho riadenia. Pri veľkom počte stavových premenných vznikajú pri syntéze riadenia problémy pri riešení problémov stability, resp. kvality riadeného systému, pretože treba riešiť veľký počet rovníc (teória  $T_1$ ). Východiskom je dekompozícia a využitie metód decentralizovaného riadenia (teória  $T_2$ ). Takéto riadenie dekomponovaného systému korešponduje, ba v niektorých prípadoch je totožné s pôvodným centralizovaným návrhom (teória  $T_1$ ).

### Paradigma multiagentových systémov

Rozvoj moderných informačných a riadiacich systémov, najmä zložitých technologických procesov, je v súčasnosti veľkou výzvou pre vedecko-technickú komunitu v oblasti kybernetiky a príbuzných odborov. Treba riadiť čoraz zložitejšie systémy, ktoré nemožno opísať tradičnými modelmi klasickej teórie riadenia. Tieto systémy sa vyznačujú najmä tým, že ich správanie určujú zložité interakcie medzi podsystémami, v ktorých sa vyskytujú diskrétne náhodné udalosti. Paradigma diskrétnych dynamických hybridných systémov ako multiagentových je dnes v teórii automatického riadenia dominujúca. Stav takýchto systémov sa menia v asynchrónnych okamihoch a udalosti vznikajúce v systéme (napr. porucha akčného člena, snímača, prekročenie dovoleného

rozsahu nejakej veličiny a pod.) môžu byť reprezentované množinou čísel, diskretných premenných alebo aj nenumerických premenných.

Pre takéto a podobné systémy treba rozpracovať metodiku tvorby matematických alebo tzv. kvalitatívnych modelov, ich simuláciu, ako aj metódy a algoritmy riadenia a rozhodovania. Riadenie multiagentových hybridných dynamických systémov vyžaduje teóriu, ktorá bude zahŕňať spojité aj diskretné premenné, pričom v niektorých prípadoch musí zohľadniť aj vplyv ľudského činiteľa. Implementácia takýchto riadiacich systémov vyžaduje integráciu programových a technických prostriedkov, ako aj inteligencie systému riadenia (reprezentovanej algoritmi, rôznymi heuristikami, metódami umelej inteligencie a pod.). Akademická komunita v oblasti teórie riadenia nereaguje na takéto a podobné potreby praxe vždy optimálne. Pri implementácii systému riadenia sa vyžaduje komplexný prístup, najmä interakcia s oblasťou počítačovej techniky a spracovania signálov (signal processing).

Výskum metód riadenia zložitých hybridných systémov by mal teda integrovať metódy teórie riadenia (decentralizované optimálne a adaptívne algoritmy riadenia) s metódami z oblasti formálnej logiky, teórie rozhodovacích procesov, teórie grafov a pod. a mal by byť v tesnej súvislosti s metódami počítačovej a komunikačnej techniky, ako aj umelej inteligencie.

V oblasti tvorby metód a algoritmov riadenia ide najmä o rozpracovanie nových prístupov pre uvedené modely. V tomto kontexte môže byť prínosom najmä vytvorenie algoritmov riadenia a rozhodovania agentov v maximálne decentralizovanej autonómnej forme. To sa prejaví napr. v tvare algoritmov decentralizovaného riadenia s riadením spoľahlivosti, ktoré zabezpečia optimálnu činnosť systému aj v rôznych „nenominálnych stavoch“. Na vyšších úrovniach riadenia musia týmto algoritmom zodpovedať decentralizované algoritmy rozhodovania s využitím fuzzy prístupov, neurónových sietí a expertných systémov. Riadenie takýchto modulárnych podsystemov s ich permanentnými interakciami je naďalej otvoreným problémom.

### Anticipácia ďalšieho možného vývoja

Analýza paradigiem TAR umožňuje anticipáciu možného vývoja TAR v zmysle nastolenia novej paradigmy. Poukazujú na to mnohé problémy vznikajúce pri riadení zložitých systémov v pôvodnom kybernetickom zmysle tohto pojmu.

Jednou z rozhodujúcich zložiek fungovania zložitých systémov sú siete (v praxi napr. dopravné, komunikačné, energetické a pod.). Počítače použité pri riadení tvoria počítačové siete a tieto tvoria základ distribuovaných systémov riadenia. Analýza a optimalizácia sietí je mostom medzi TAR a operačným výskumom.

Zložitost' a rôznorodosť uvažovaných systémov vyžaduje použitie pre návrh a realizáciu metódy modelovania a simulácie zložitých systémov. V nadväznosti na simuláciu je nutnou zložkou analýzy a návrhu experimentovanie (vrátane simulovaných experimentov). To je nutné najmä v systémoch (napr. DEDS), kde neexistuje stáročná tradícia v modelovaní.

Uvedené poznatky z oblasti kybernetiky a riadenia zložitých systémov majú skromný cieľ: upozorniť na fakty, že tieto vedné oblasti môžu poskytnúť niektoré metodologické východiská pri riešení zložitých problémov súčasnosti. Tým sa otvára pred teóriou riadenia nová paradigma – „paradigma riadenia neobyčajne zložitých (kybernetických) systémov“. Táto buduca etapa teórie riadenia (už nielen automatického) v súlade s princípom korešpondencie musí zahŕňať všetky výsledky rozvoja TAR a príbuzných vedných oblastí, metódy modelovania, simulácie, umelej inteligencie a pod. Teoretické výsledky teórie riadenia by sa mali využiť prostredníctvom analógií a výsledkov modelovania na objekty a predmety príslušných vied nie priamo, ale pomocou zloži-

tej procedúry interpretácie v rámci tej vedy, ktorá skúma daný objekt (napr. v takých oblastiach, ako sú ekologické a ekonomické systémy, manažment, biologické vedy a pod.). Uvedená paradigma otvára aj nové možnosti vo vedecko-výskumných programoch a ich využitie v pedagogickom procese.

### Literatúra

- [1] SARNOVSKÝ, J.: New Paradigms of control theory. Proceedings of International Carpathian Control Conf. High Tatras, Slovak Republic, 2000, pp. 38 – 43.
- [2] VICENÍK, J.: Disputes about Character of Methodology of Science (on Slovak). Pravda, 1988.
- [3] BUNGE, M.: Philosophy of Physics. D. Reidel, Publishing Company Dordrech, 1973.
- [4] FRAENKEL, A. A., BAR-HILLEL, Y.: Foundations of Set Theory (in Russian). Mir, Moscow, 1966.
- [5] MESAROVIC, M. D., TAKAHARA, Y.: General System Theory. Academic Press, New York, 1975.
- [6] PONTRJAGIN, L. S.: Mathematical Theory of Optimal Processes. SNTL Prague, 1964.
- [7] VESELÝ, V., MURGAŠ, J.: Decentralized Adaptive Stabilization of Nonlinear Systems. Int. J. Control, vol. 58, 6, 1993, 1445 – 1460.
- [8] KALMAN, R. E., FALB, P. L., ARBIB, M. A.: Topics in Mathematical System Theory. Mc Graw-Hill Comp., New York, 1969.
- [9] ŠTĚPÁN, J.: The Uncertainty Problem in Control Theory. Part I. Models of Theories, Kybernetika, Volume 26, 1, 1990, 31 – 46.
- [10] WILLSKY, A. S.: Some Solutions, Some Problems, and Some Questions. IEEE Contr. Magazine, September 1982, 4 – 16.
- [11] BRISTOL, E.: Process Control: An Application Theorist's View of Control. IEEE Contr. Magazine, March 1982, 3 – 15.
- [12] ASHBY, W. R.: Introduction to Cybernetics. Chapman & Hall. London, 1956
- [13] SARNOVSKÝ, J.: Some Philosophical and Methodological Problems of Cybernetics Artificial Intelligence and Complex Systems (in Slovak). Cybernetics and Informatics Vol. 3, No. 2., 1990, pp. 1 – 18.
- [14] BELANGER, P. R.: Editorial on Controllable and Observable Theory. IEEE Trans. AC, vol. AC-32, No. 7, July 1987.
- [15] BEER, S.: Cybernetics and Management (in Czech). Svoboda, Praha, 1966.
- [16] BOASSON, M.: Control Systems Software. IEEE Trans. on AC, Vol. 38, No. 7, July 1993.
- [17] TALUKDAR, S. and all: Multiagent Organizations for Real-Time Operations. Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 5, May 1992.
- [18] FEYERABEND, P. K.: Against Method. Verso, London, 1993.
- [19] TENNEY, R. R., SANDELL, N. S.: Structures for Distributed Decisionmaking. IEEE Trans. on SMC, Vol. SMC-11, No. 8, August 1981.

*Pokračovanie v budúcom čísle.*

**prof. Ing. Ján Sarnovský, CSc.**

**34**

**Technická univerzita  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a umelej inteligencie  
Letná 9/B, 042 01 Košice  
e-mail: jan.sarnovsky@tuke.sk**