

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



**VYUŽITIE FUZZY KOGNITÍVNYCH MÁP V SITUAČNOM
RIADENÍ A MODELOVANÍ ZLOŽITÝCH SYSTÉMOV**

Prezentácia písomnej práce k dizertačnej skúške

Autor práce: Ing. Michal Puheim

Školiteľ: Dr. h. c. mult. prof. Ing. Ladislav Madarász, PhD.

Školiteľ špecialista: Dr. Ing. Ján Vaščák

Ciele písomnej práce k DS

1. Vypracovanie úvodu k využitiu metodiky situačného riadenia pri riadení a modelovaní zložitých systémov.
2. Prehľad možností využitia prostriedkov umelej inteligencie pri situačnom riadení a modelovaní.
3. Vypracovanie prehľadu problematiky fuzzy kognitívnych máp a ich využitia pri modelovaní a riadení technických systémov.
4. Prehľad perspektív využitia fuzzy kognitívnych máp a ich modifikácií pri modelovaní a riadení leteckých turbokompresorových motorov.
5. Stanovenie téz dizertačnej práce.

Obsah prezentácie

1. Situačné riadenie a modelovanie zložitých systémov.
2. Prostriedky umelej inteligencie pri situačnom riadení a modelovaní.
3. Fuzzy kognitívne mapy (FKM).
4. Perspektívy využitia FKM pri situačnom modelovaní a riadení leteckých motorov.
5. Záver a tézy budúcej dizertačnej práce.
6. Aktuálny stav riešených úloh.

Časť prvá

SITUAČNÉ RIADENIE A MODELOVANIE ZLOŽITÝCH SYSTÉMOV

Zložitý systém (ZS)

Zložitému systému prináležia nasledovné vlastnosti:

- veľký počet prvkov, ktorý sa môže meniť,
- vzťahy medzi prvkami definujúce štruktúru ZS sa môžu meniť,
- hierarchickosť organizačnej štruktúry prvkov ZS,
- právo autonómneho rozhodovania prvkov,
- zmena miesta (oblasti priestoru), v ktorom sa ZS nachádza a v ktorom pôsobí,
- zmena organizačnej štruktúry ZS

Riadenie a modelovanie ZS

ZS je možné ovplyvňovať (riadiť):

- pôsobením na jednotlivé prvky ZS,
- pôsobením na vzťahy medzi prvkami ZS.

Dôležitým predpokladom je schopnosť popisu ZS. Dostupné prostriedky:

- grafy a teória grafov,
- štruktúrne, interakčné (väzbové) matice.

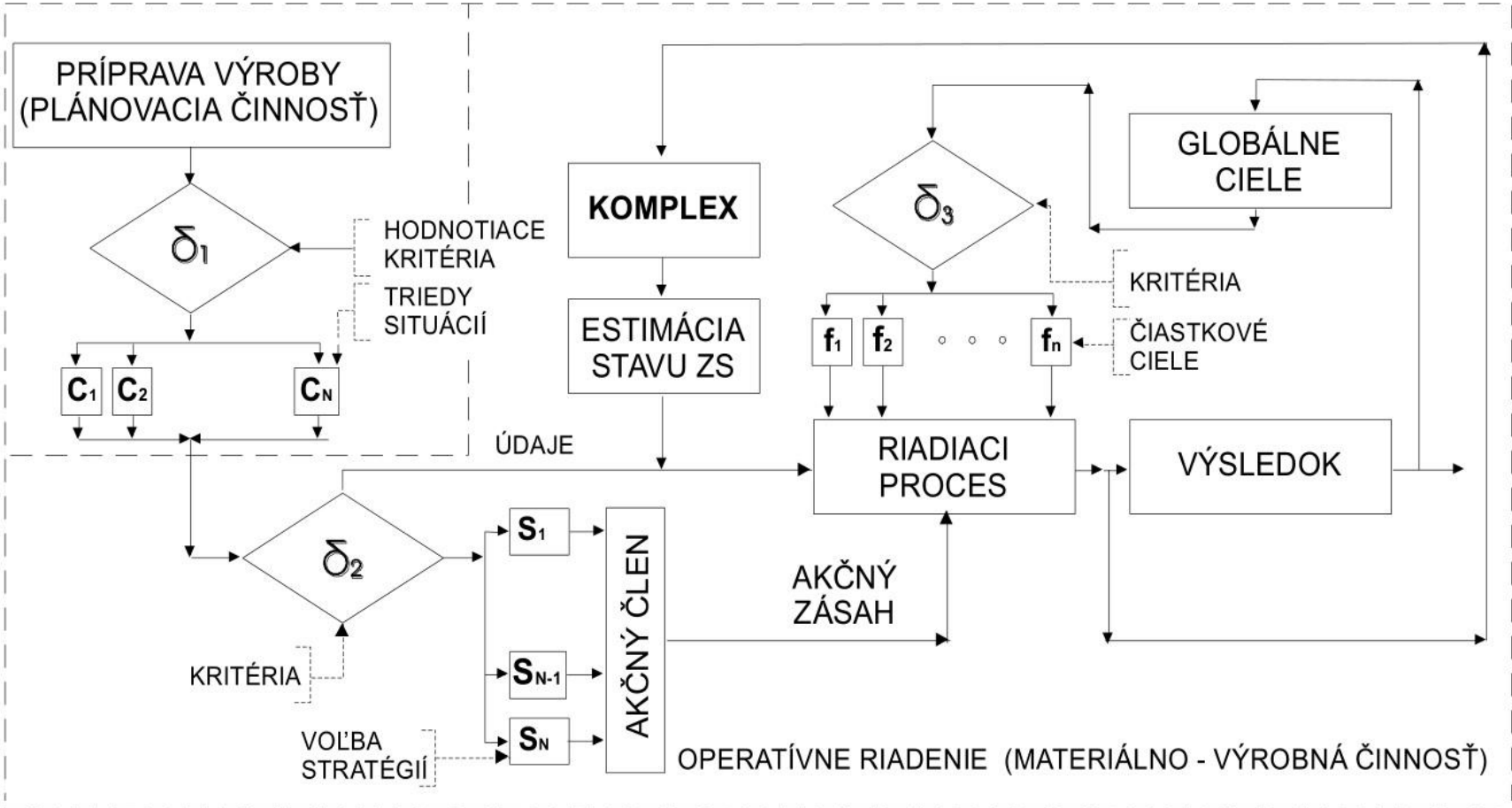
Metodika situačného riadenia (SR)

Východiskom pri využití metodiky SR je predpoklad, že riadený ZS sa môže nachádzať principiálne v nekonečne veľkom množstve stavov, pričom objem prostriedkov umožňujúcich jeho riadenie je zvyčajne obmedzený. Pri použití princípu situačného riadenia je do riadiaceho systému integrovaný formálny model, ktorý umožňuje predvídať následky jednotlivých rozhodnutí a zvoliť tak najvhodnejšie riešenie s ohľadom na zvolené kritériá.

Proces riadenia ZS sa člení na dve etapy:

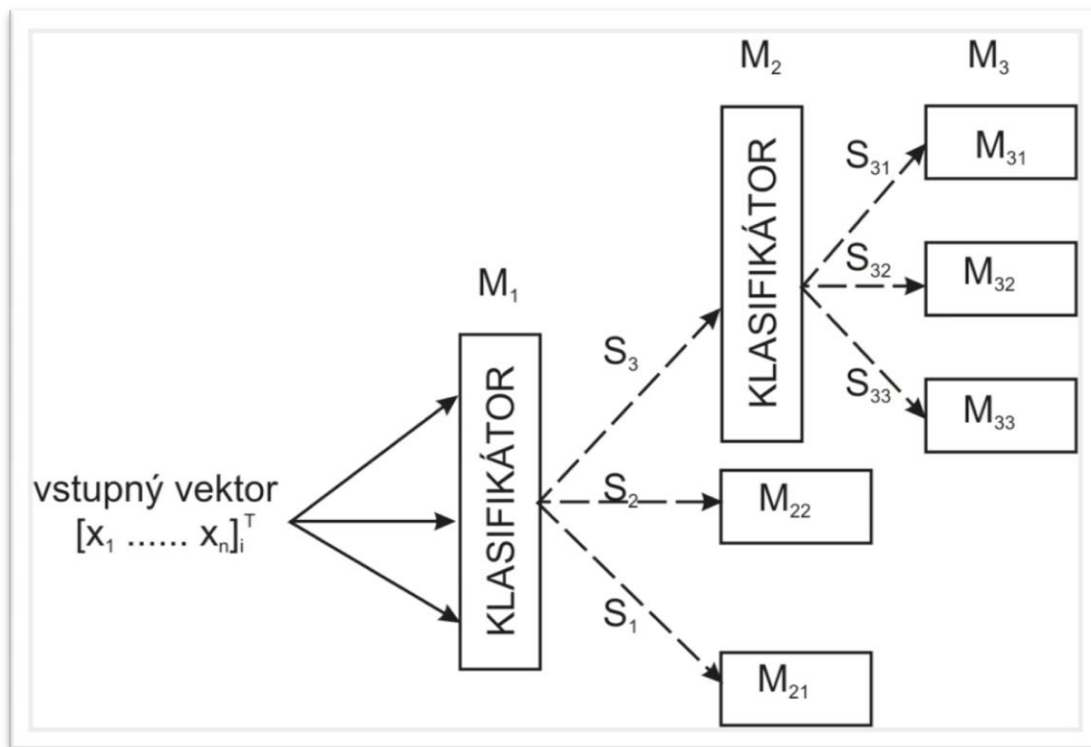
- Plánovanie riadiaceho procesu,
- Operatívne riadenie

Štruktúra procesu riadenia ZS



Situačné modelovanie

Metódy využívajúce situačnú klasifikáciu je možné ich aplikovať aj pri tvorbe modelov dynamických systémov.



Vysvetlivky:

x_i – parametre systému
(vstupy, výstupy, stavy)

S_{ij} – klasifikácia vstupov podľa situácií

M_i – jednotlivé úrovne modelov

M_{ij} – lokálne modely

Časť druhá

VYUŽITIE PROSTRIEDKOV UMELEJ INTELIGENCIE V SITUAČNOM RIADENÍ

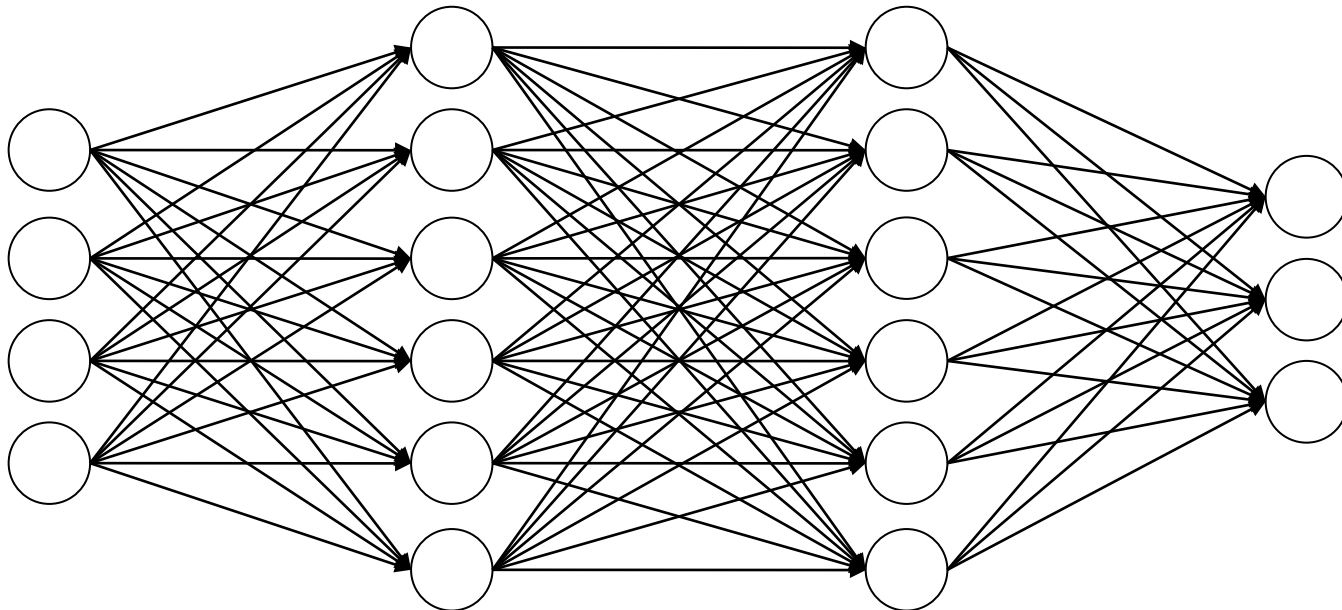
Výpočtová inteligencia

Subsymbolická inteligencia („Computational Intelligence,“ „Soft Computing“)

- Súbor moderných metód charakteristických nesymbolickou reprezentáciou poznatkov.
- Používa prístup „zdola nahor“ („bottom-up“), ktorý je inšpirovaný prevažne nízkoúrovňovými percepčnými procesmi, biologickými procesmi, evolučnými princípmi a prírodnými javmi.
- Prevládajúcou filozofiou je tzv. *konekcionizmus* („connectionism“), ktorý predpokladá, že z jednoduchých častí je možné spájaním poskladať sofistikované systémy z vysokou abstraktnou inteligenciou.
- Prostriedky:
 - Neurónové siete,
 - Fuzzy systémy,
 - Evolučné algoritmy.

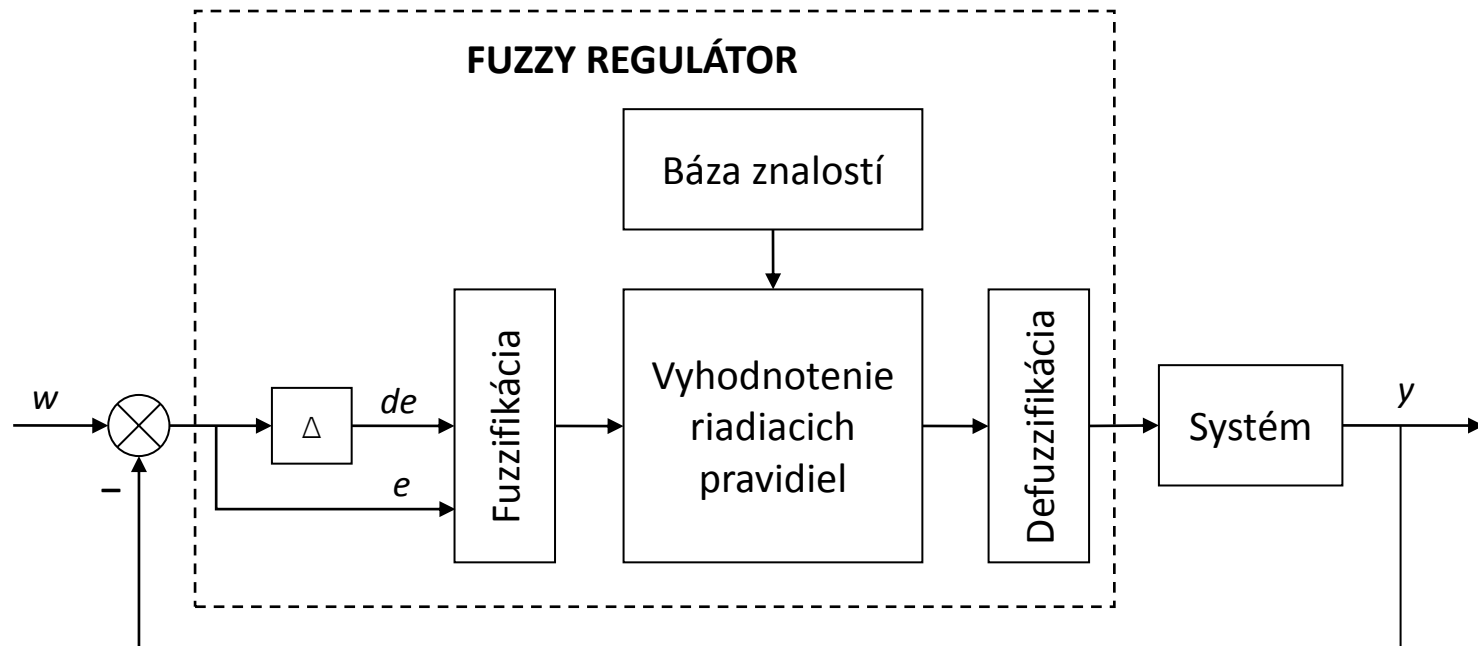
Neurónové siete

- Umelá neurónová sieť (NS) je masívne paralelný procesor, ktorý dokáže uchovávať znalosti o probléme a neskôr ich využiť na jeho riešenie.



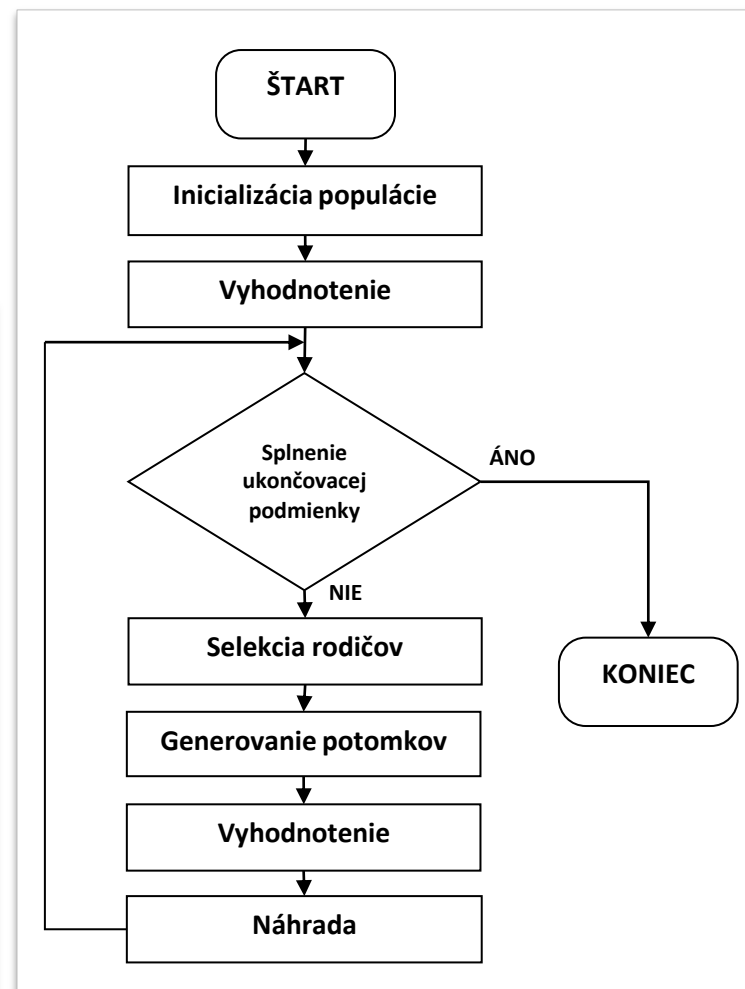
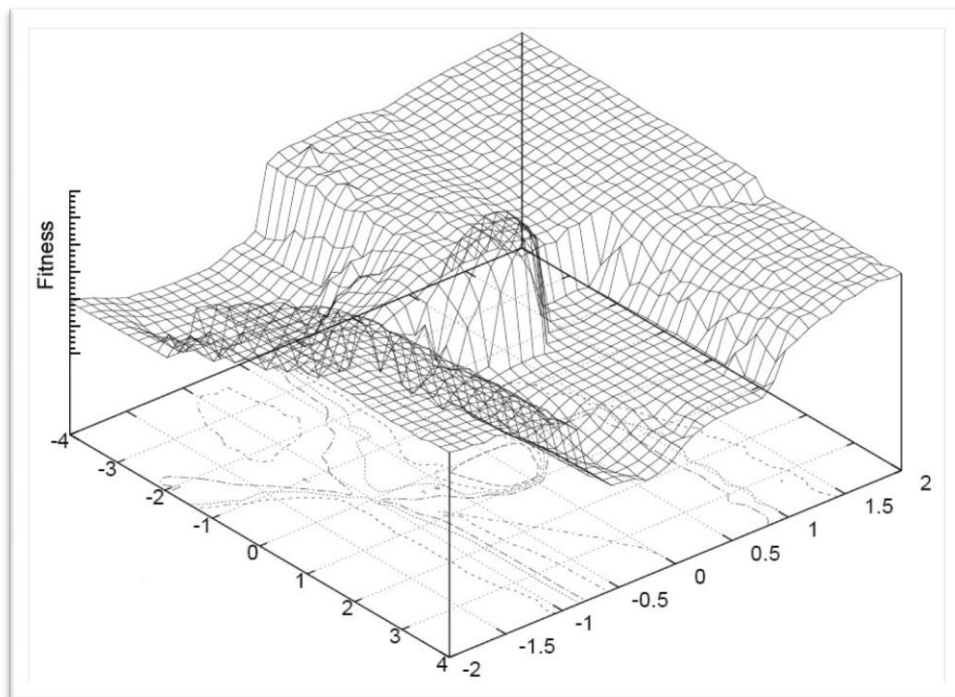
Fuzzy systémy

- Fuzzy inferenčný systém je množina produkčných pravidiel, ktorých výsledky sa sčítajú s využitím metód založených na fuzzy logike a fuzzy množinách.

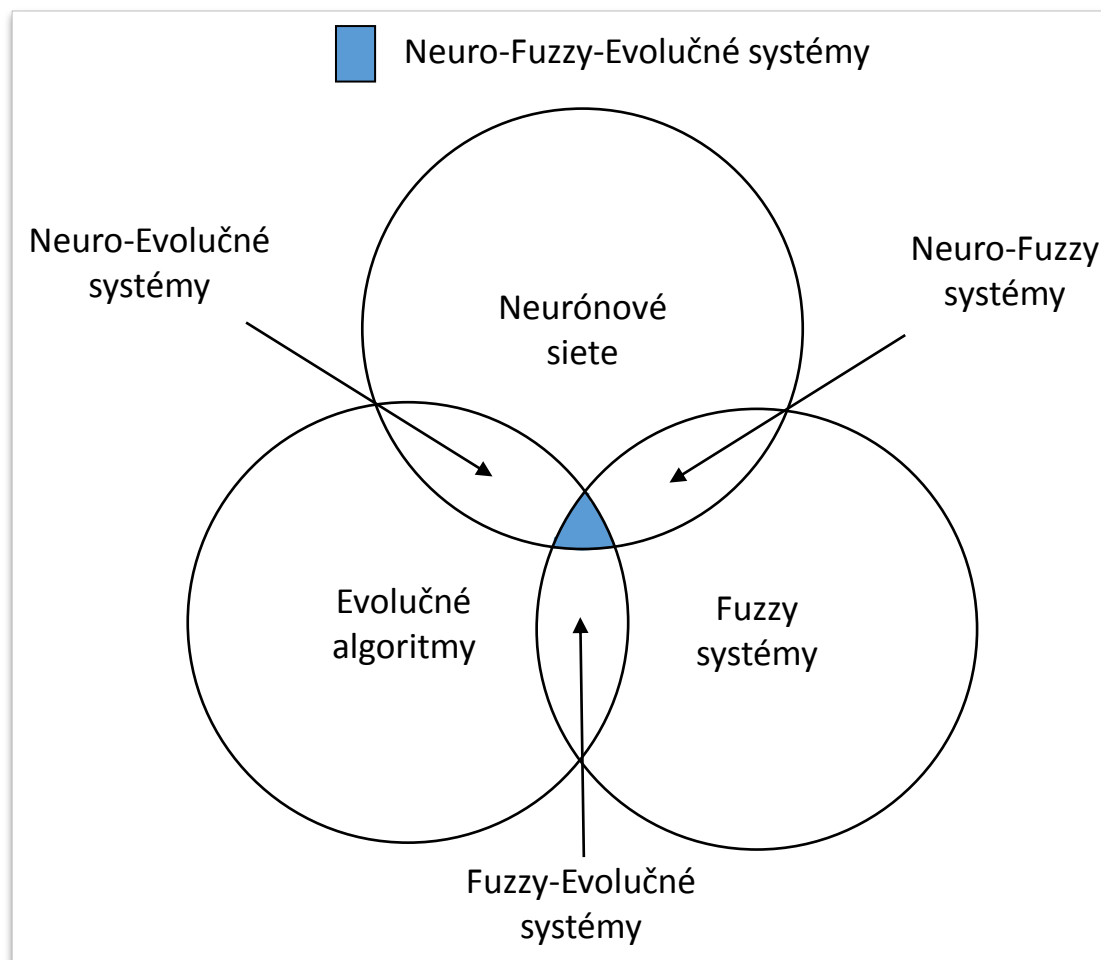


Evolučné algoritmy

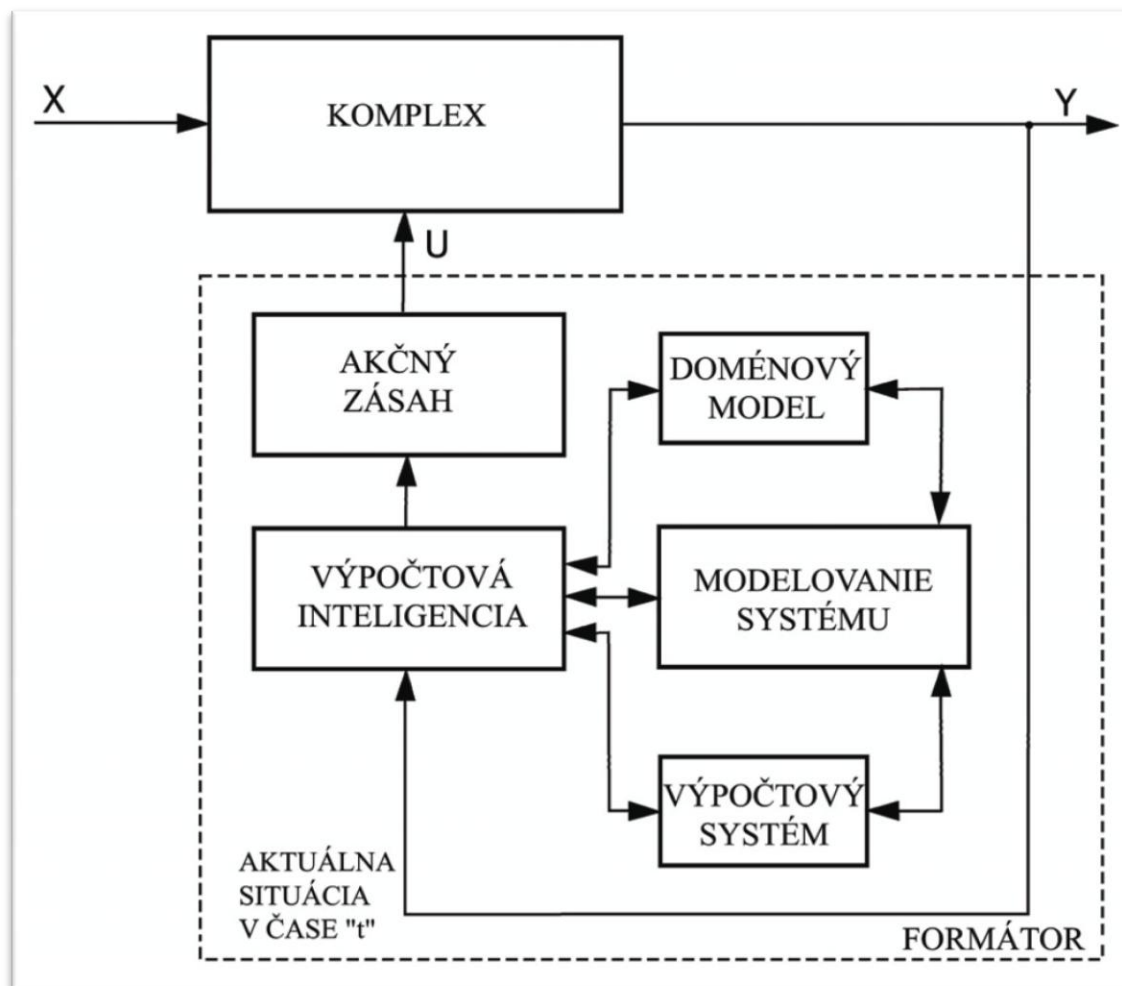
- Evolučné algoritmy (EA) umožňujú optimalizáciu parametrov riadiacich systémov.
- Sú založené na simulovaní evolúcie populácie jedincov reprezentujúcich jednotlivé riešenia optimalizačného problému.



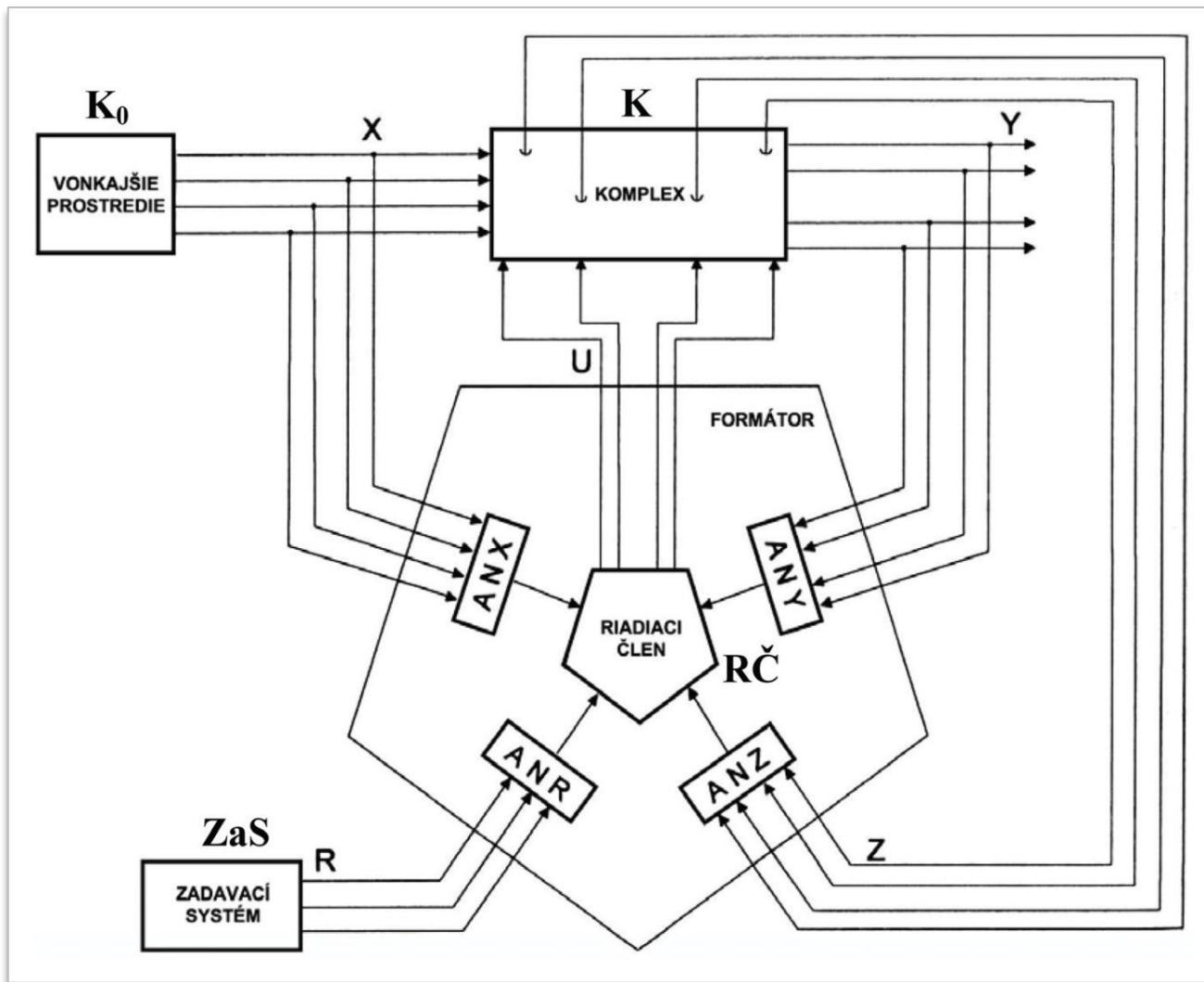
Hybridné prostriedky UI



Využitie prostriedkov UI v situačnom riadení



Riadenie ZS formátorom

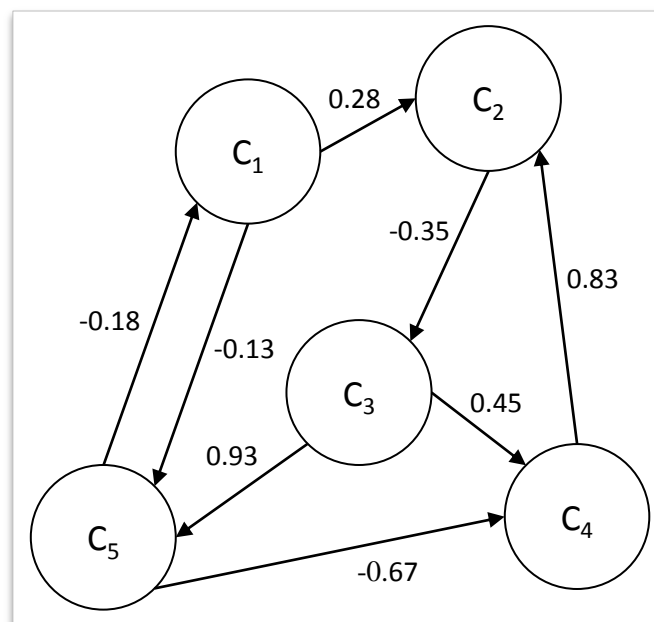


Časť tretia

FUZZY KOGNITÍVNE MAPY

Fuzzy kognitívne mapy (FKM)

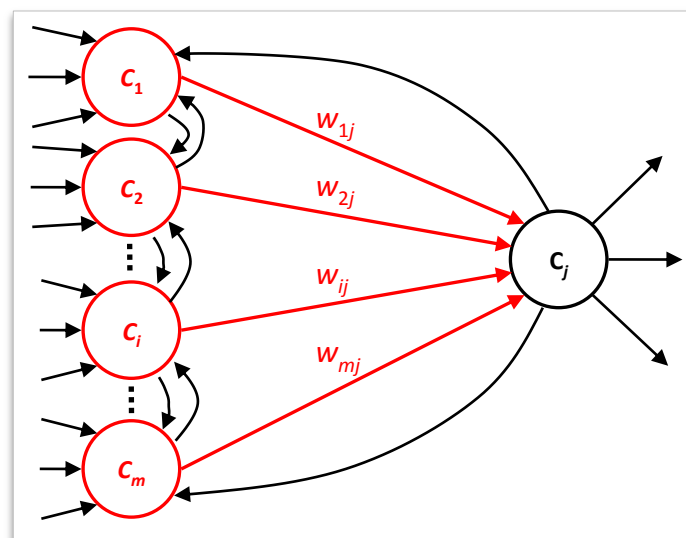
- Fuzzy kognitívne mapy (FKM) sú orientované grafy, ktoré modelujú systém a jeho správanie použitím konceptov a ich vzájomných vzťahov.
- Zohľadňujú stupeň vplyvu (váhu) vzťahov vyjadrený príslušnou hodnotou zo spojitého intervalu $\langle -1, 1 \rangle$.
- Okrem zobrazenia FKM vo forme grafu je možné použiť aj reprezentáciu vo forme matice prepojení konceptov, resp. matice váh W .
- Štruktúra a možné formy zápisu FKM (graf, resp. matica) plne korešpondujú s požiadavkami na popis štruktúry ZS.



$$W_{FKM} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0,28 & 0 & 0 & -0,13 \\ 0 & 0 & -0,35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,45 & 0,93 \\ 0 & 0,83 & 0 & 0 & 0 \\ -0,18 & 0 & 0 & -0,67 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Inferenčný mechanizmus FKM

- Koncept C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) indikuje stav, procedúru, udalosť alebo premennú systému a jeho hodnota je z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$.
- Priama väzba (prepojenie) medzi konceptami C_i a C_j určuje kauzalitu medzi týmito konceptami a je reprezentovaná váhou w_{ij} , ktorá je určená fuzzy hodnotou z intervalu $\langle -1, 1 \rangle$.
- Všeobecné pravidlo pre určenie hodnoty konceptu C_j v každom simulačnom kroku je výpočet vplyvu ostatných konceptov C_i .



Výpočet aktivačnej hodnoty konceptu:

$$A_j(t+1) = p \left(A_j(t) + \sum_{i=1; i \neq j}^n w_{ij} A_i(t) \right)$$

Úlohy riešiteľné pomocou FKM (1)

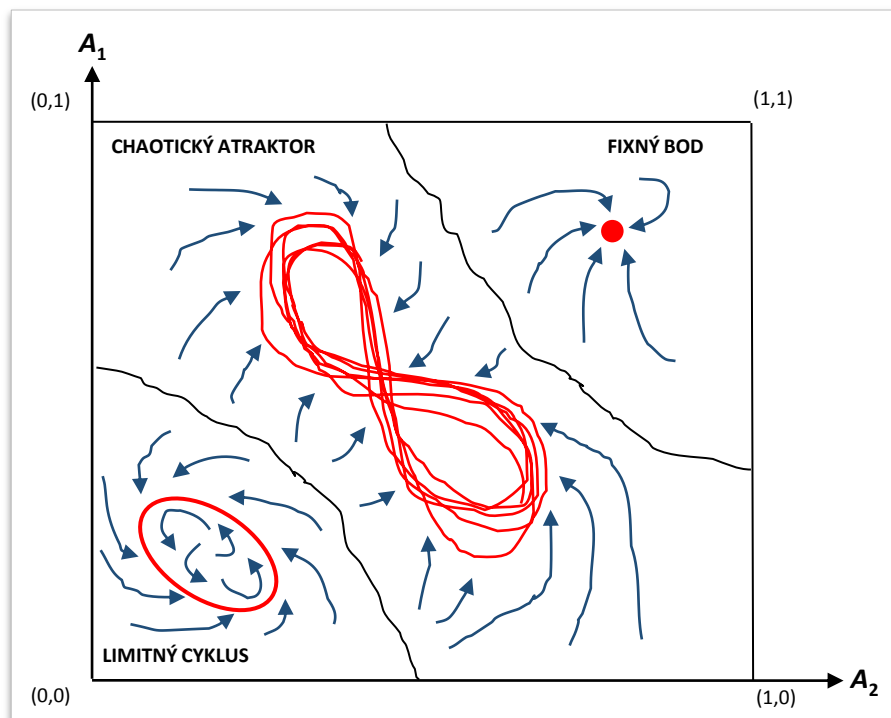
FKM sú vhodné na riešenie dvoch hlavných tried úloh, ktorými sú:

- tvorba regresného modelu systému,
- zakódovanie atraktora k vybranému cieľovému stavu systému.

Úloha *prvého typu* (regresia) je najfrekvencovanejšou úlohou, na riešenie ktorej sa FKM využívajú. Jej cieľom je nastaviť parametre FKM (ktorými sú zvyčajne váhy na prepojeniach medzi konceptmi) s cieľom vytvorenia odpovedajúceho modelu reálneho systému.

Úlohy riešiteľné pomocou FKM (2)

Úloha *druhého typu* (definovanie atraktora) sa dotýka oblastí určovania stability (a v konečnom dôsledku aj riadenia) FKM. Cieľom tejto úlohy je zakódovať do parametrov FKM schopnosť konverencie z ľubovoľného počiatočného stavu do žiadaného cieľového stavu, pričom tento stav je určený špecifickými hodnotami vybranej skupiny riadených konceptov.



Výhody a prednosti FKM

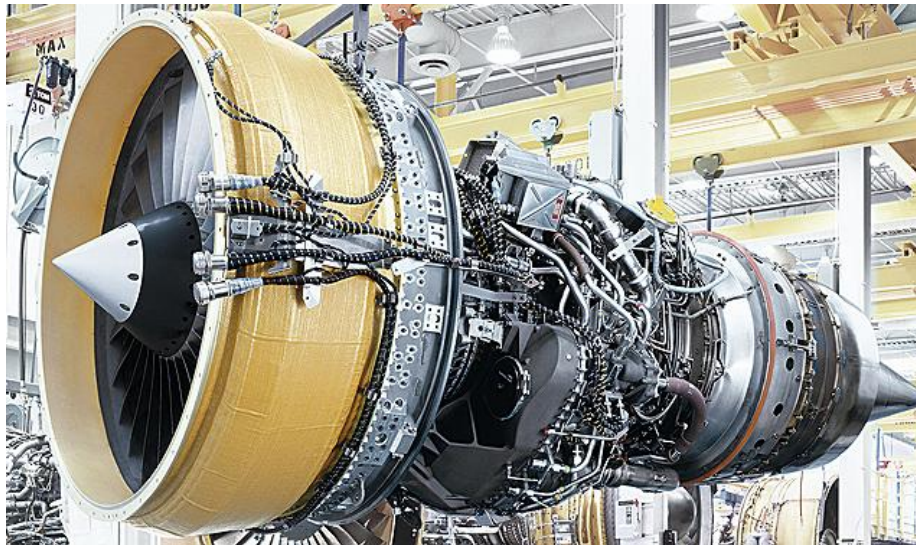
- jednoduchosť návrhu a určenia parametrov,
- flexibilitu reprezentácie (je možné jednoducho pridávať/odoberať nové koncepty),
- jednoduchosť použitia, zrozumiteľnosť a transparentnosť pre netechnických expertov,
- nízka výpočtová náročnosť,
- zvládnutie dynamických efektov vďaka spätно-väzobnej štruktúre.
- vhodná kombinácia vlastností fuzzy pravidlových systémov (interpretabilita) a neurónových sietí (aproximačné schopnosti)

Časť štvrtá

PERSPEKTÍVY FKM PRI MODELOVANÍ A RIADENÍ LETECKÝCH MOTOROV

Letecké prúdové motory

- Letecké turbokompresorové motory (LTKM) predstavujú špecifickú triedu zložitých systémov.
- Sú to mnohorozmerné objekty so zložitými vnútornými termomechanickými procesmi.

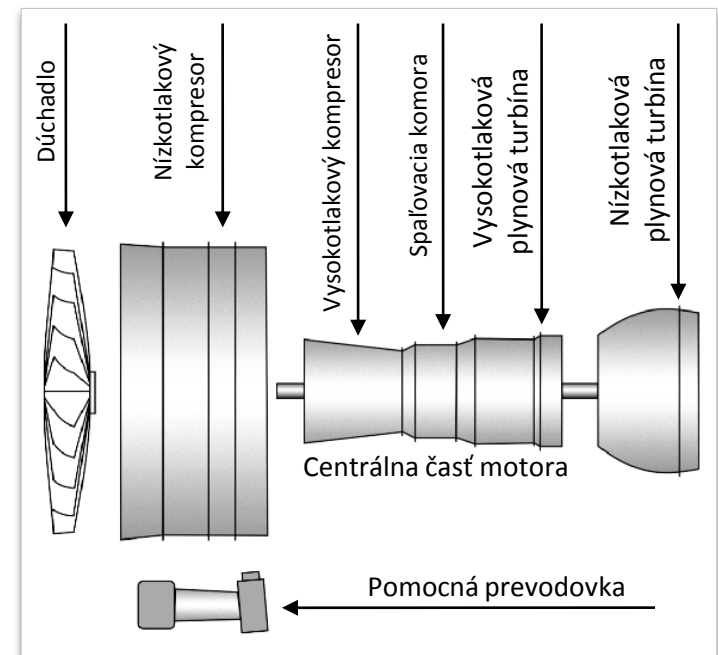


Letecký turbokompresorový motor GE-90 firmy General Electric Aviation.

Modulárna štruktúra LTKM

LTKM pozostávajú z hlavných komponentov, ktoré menia stav prúdenia plynov v sekvencii termodynamického pracovného cyklu motora. Dizajn moderného LTKM predpokladá viacprvkovú modulárnu koncepciu. V súčasnosti typický dvojhriadeľový motor pozostáva z nasledujúcich hlavných modulov :

- dúchadlo („fan“),
- modul nízkotlakového kompresora,
- jadro motora („core engine“):
 - vysokotlakový kompresor,
 - spaľovacia komora (plynový generátor),
 - vysokotlaková plynová turbína,
- modul nízkotlakovej plynovej turbíny,
- pomocná prevodovka.

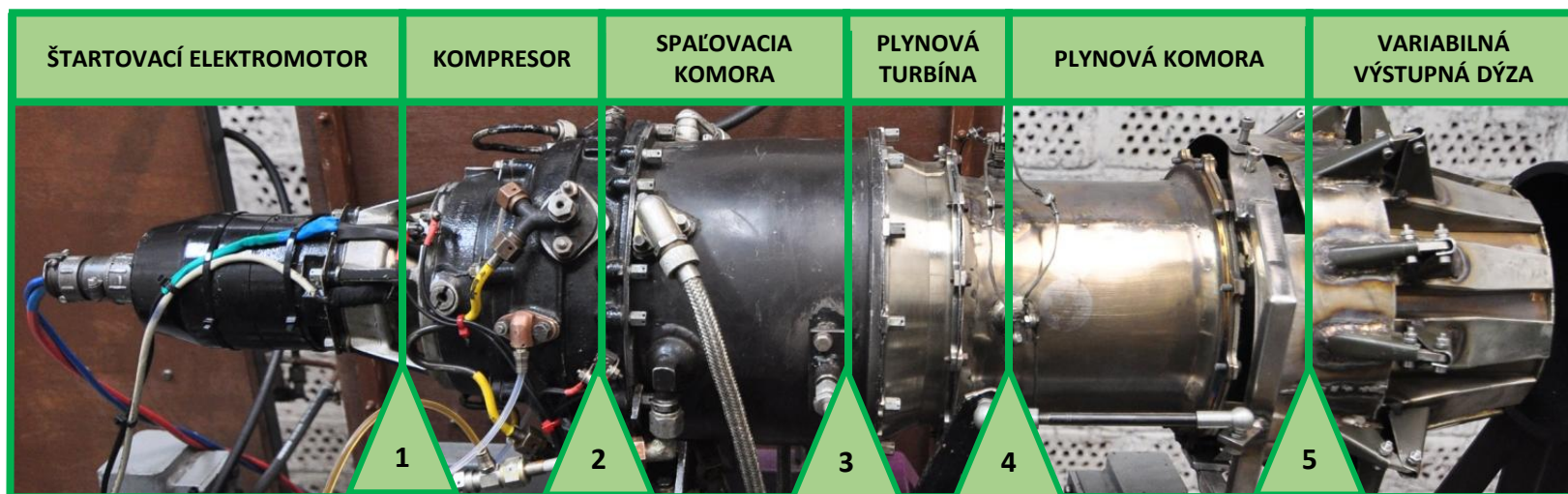


Riadiace systémy LTKM

- Elektronické riadiace systémy LTKM sú označované ako systémy digitálneho riadenia motora (DEC – „Digital Engine Control“).
- Podmnožinu týchto systémov tvoria systémy riadenia motora s plnou autoritou (FADEC – „Full Authority Digital Engine Control“).
- Systémy FADEC autonómne zabezpečujú optimálnu prevádzku motora vo zvolenom režime s ohľadom na letové podmienky, ktoré definujú vstupné parametre motora.
- Pri návrhu takýchto riadiacich systémov v budúcnosti je predpoklad využitia metód automatického riadenia a umelej inteligencie.
- Systémy FADEC odpovedajú filozofii situačného riadenia.

Malý prúdový motor ISTC-21V

- Malý prúdový motor (MPM) s typovým označením ISTC-21V je jednoprúdový, jednohriadeľový letecký turbokompresorový motor s jednostupňovým, jednostranným radiálnym kompresorom, združenou spaľovacou komorou, jednostupňovou, nechladenou plynovou turbínou a variabilnou výstupnou dýzou.
- Vznikol postupnou evolúciou MPM s typovým označením MPM-20, ktorý bol pôvodne vytvorený z turbo spúšťača TS-21 používaného v lietadlách typu Mig-23, Su 7 a Su 22 na roztočenie hlavných motorov.
- Hoci je rozmerovo menší ako normálne LTKM, jeho charakteristiky sú veľmi podobné.



Merací reťazec ISTC-21V

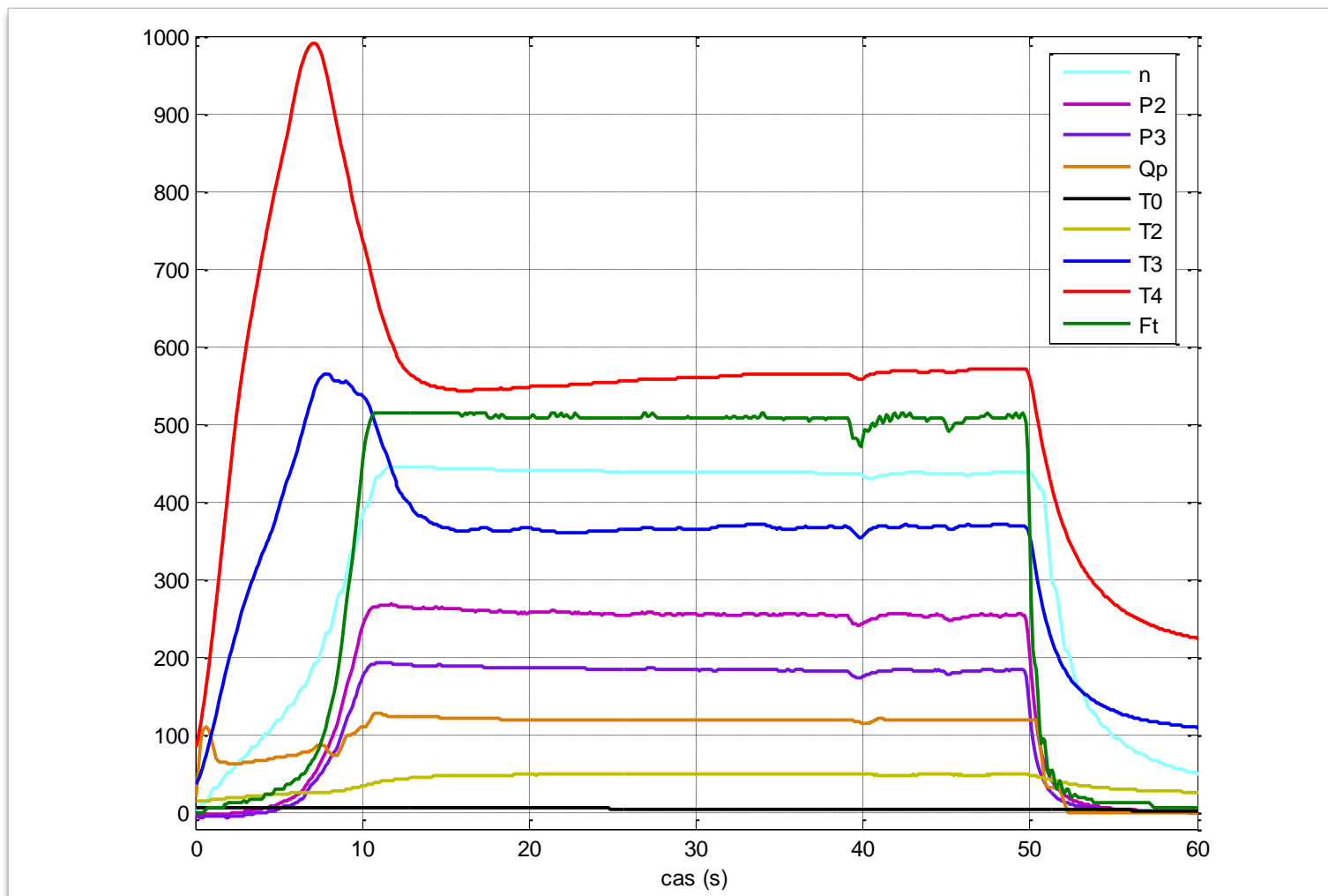
Riadenie motora ISTC-21V je možné vykonávať prostredníctvom dvoch parametrov:

- dodávka paliva do spaľovacej komory (hlavný regulačný prvok činnosti motora),
- nastavenie priemeru výstupnej dýzy (jeho zmena umožňuje na výstupe meniť zaťaženie motora a predstavuje druhý stupeň riadenia motora).

Pre riadenie je zároveň nevyhnutá schopnosť určiť stav motora, ktorý je závislý aj od ďalších parametrov. Medzi merané parametre patrí:

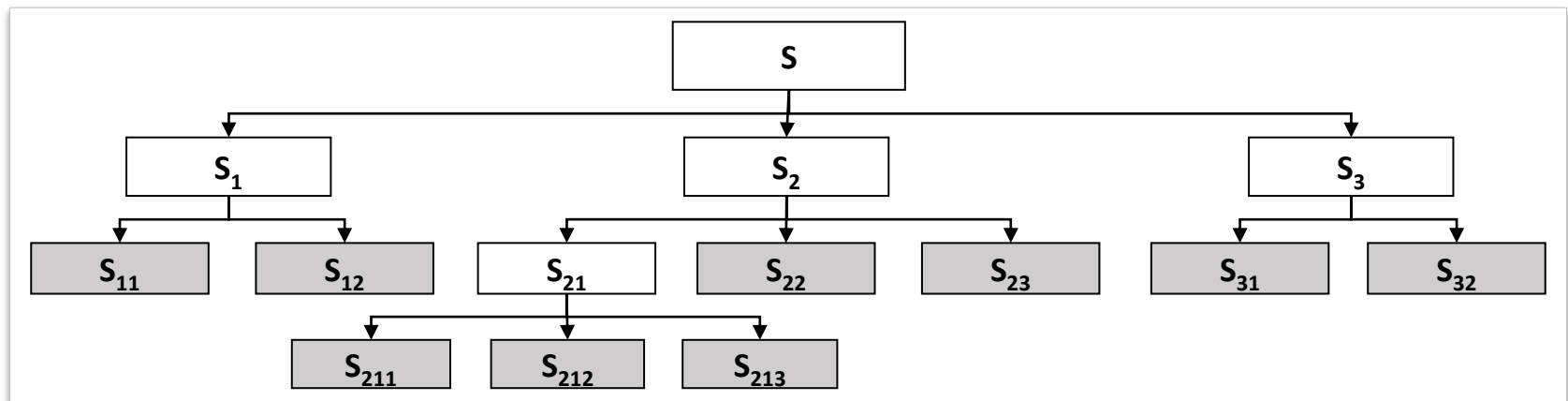
- p_H – atmosférický tlak [Pa],
- p_{2C} – celkový tlak za radiálnym kompresorom [Pa],
- p_{3C} – celkový tlak pred turbínou [Pa],
- p_{pal} – tlak paliva [Pa],
- p_{ol} – tlak oleja [Pa],
- t_H – vonkajšia teplota okolia motora [°C],
- t_{1C} – teplota na vstupe do kompresora [°C],
- t_{2C} – teplota na výstupe z kompresora [°C],
- t_{3C} – teplota v spaľovacej komore [°C],
- t_{4C} – teplota za turbínou [°C],
- t_{ol} – teplota oleja [°C],
- n – otáčky rotora turbo-kompresora [min⁻¹],
- F_t – ťah motora [N],
- Q_{pal} – dodávka paliva [l/min],
- A_5 – priemer výstupnej dýzy [%].

Parametre MPM počas jeho chodu

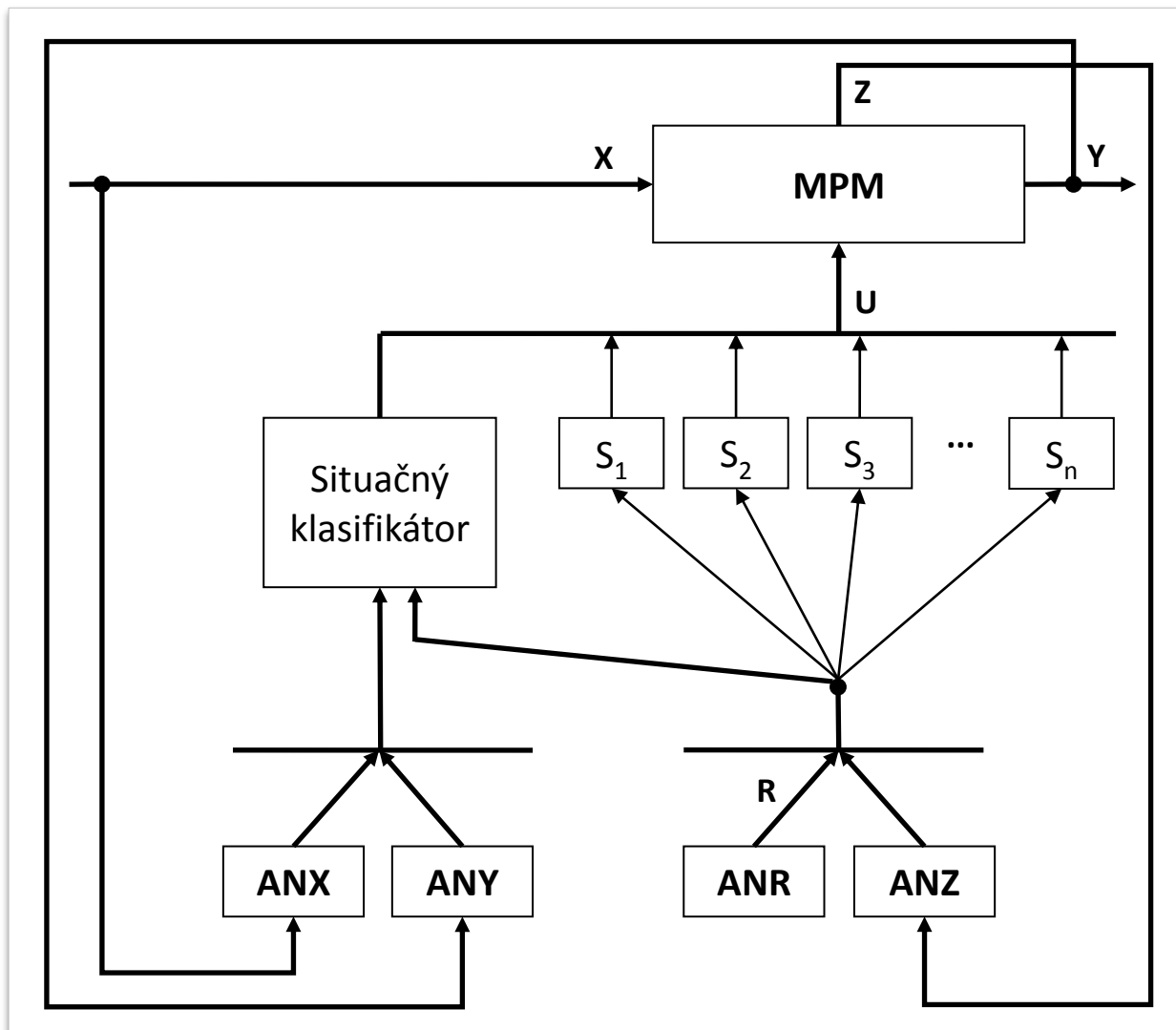


Situačná dekompozícia stavov MPM

- S_1 – rozbeh motora:
 - S_{11} – prekročenie medzných teplôt pri spustení,
 - S_{12} – nedostatočné stlačenie kompresora,
- S_2 – stabilná prevádzka motora:
 - S_{21} – atypický stav:
 - S_{211} – pokles stlačenia kompresora,
 - S_{212} – pokles dodávky paliva,
 - S_{213} – nestabilné otáčky,
 - S_{22} – akcelerácia motora,
 - S_{23} – decelerácia motora,
- S_3 – dobeh motora:
 - S_{31} – zhasnutie motora,
 - S_{32} – porucha pri dobehu.



Situačné riadenie MPM



UI pri riadení a modelovaní MPM

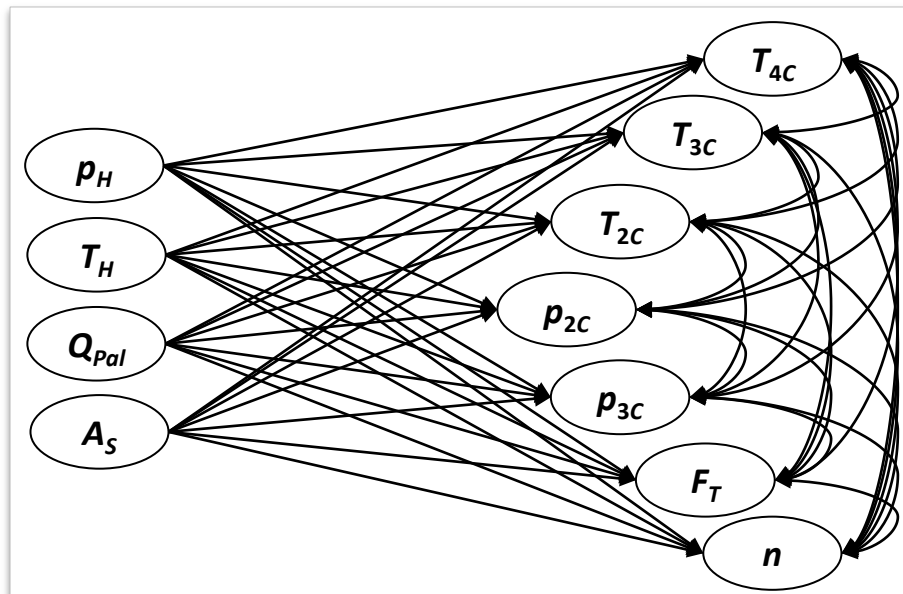
Využitie metód umelej inteligencie pri situačnom riadení MPM je možné pri:

- situačnej klasifikácii aktuálneho stavu do príslušnej situačnej triedy,
- návrhu inteligentných riadiacich metód pre niektoré operačné stavy,
- návrhu modelov použitých pri diagnostike stavu motora.

FKM ako prostriedok UI sú využiteľné vo všetkých uvedených oblastiach.

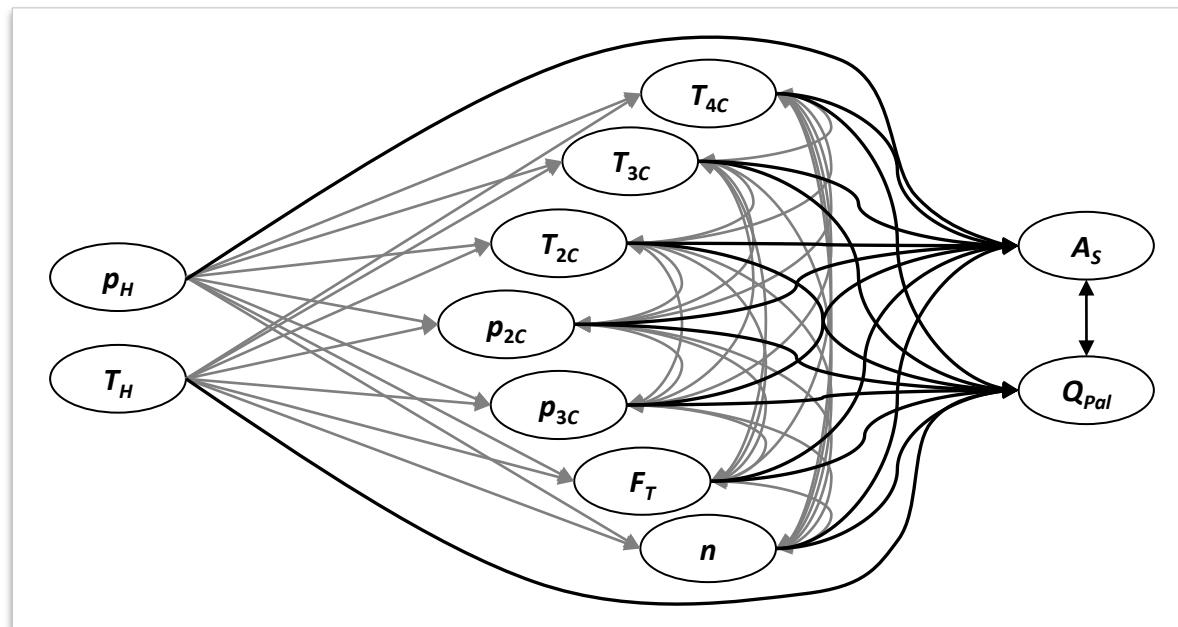
FKM pri modelovaní MPM

- Klasické FKM s lineárnymi váhami sa môžu uplatniť ako čiastkové modely pre jednotlivé situačné rámce.
- V prípade realizácie modelu MPM pre konkrétny situačný rámec sú ako koncepty FKM použité merané parametre motora (po normalizácii, resp. fuzzifikácii na interval $<0, 1>$).



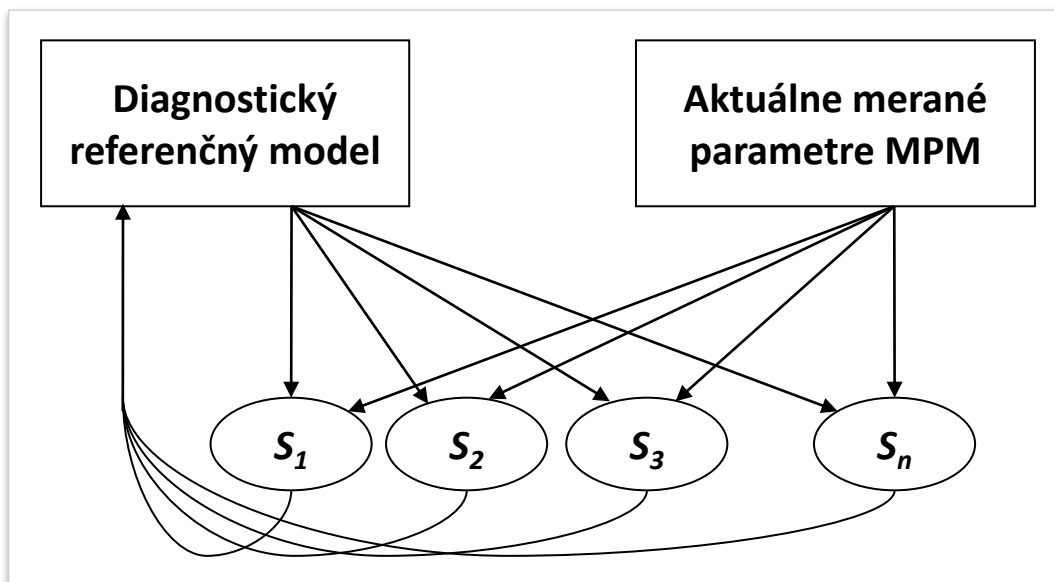
FKM pri riadení MPM

- Cieľom je riešiť úlohu zakódovania atraktora, t. j. hľadať také hodnoty váh radiacích parametrov, pri ktorých sa FKM po určitom čase dostane z ľubovoľného počiatočného stavu do žiadaného cieľového stavu (resp. stabilného limitného cyklu).



Situačná klasifikácia pomocou FKM

- Pri využití FKM v úlohe situačného klasifikátora sú okrem konceptov reprezentujúcich model MPM použité aj koncepty odpovedajúce jednotlivým situačným triedam.
- Situačné koncepty sú aktivované v závislosti od stavu motora (t. j. hodnôt jeho parametrov).
- Najsilnejšie aktivovaný koncept predstavuje aktuálnu situačnú triedu.



ZÁVER A TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Záver

- V predloženej práci sú zosumarizované poznatky nevyhnutné k ďalšiemu výskumu v oblasti situačného riadenia MPM s využitím FKM.
- Do budúcnosti je cieľom pokúsiť sa implementovať jednotlivé navrhnuté modely a overiť ich v experimentálnych podmienkach.
- Súčasne bude potrebné vytvoriť vhodný prostriedok, v ktorom budú tieto modely implementované (univerzálnu programovú knižnicu podporujúcu výpočty pomocou FKM).
- Okrem využitia základných FKM s lineárnymi váhami bude ďalším cieľom overiť možnosti využitia modifikovaných FKM (napríklad s váhami realizovanými pomocou neurónových sietí).
- Dôležitou výskumnou úlohou je hľadanie progresívnych metód učenia FKM.

Tézy budúcej dizertačnej práce

- 1) Modifikovať základnú koncepciu FKM s cieľom umožniť modelovanie zložitých nelineárnych dynamických systémov.
- 2) Vytvoriť programovú knižnicu podporujúcu výpočty pomocou FKM, ktorá bude kompatibilná s existujúcimi systémami realizujúcimi riadenie malého prúdového motora ISTC-21V.
- 3) Vytvoriť situačný model malého prúdového motora ISTC-21V s využitím FKM.
- 4) Navrhnuť štruktúru systému situačného riadenia malého prúdového motora ISTC-21V s využitím FKM.
- 5) Implementovať systém situačného riadenia malého prúdového motora ISTC-21V realizovaný s využitím FKM a overiť jeho použiteľnosť v experimentálnych podmienkach.

Appendix

AKTUÁLNY STAV RIEŠENÝCH ÚLOH

Bod č. 1 téz DzP

- 1) Modifikovať základnú koncepciu FKM s cieľom umožniť modelovanie zložitých nelineárnych dynamických systémov.
- Je vyriešený v publikácii:
Three-Term Relation Neuro-Fuzzy Cognitive Maps /
Michal Puheim, Ján Vaščák, Ladislav Madarász -
2014.In: CINTI 2014: 15th IEEE International
Symposium on Computational Intelligence and
Informatics: Proceedings: November 19-21, 2014,
Budapest. - Danvers: IEEE, 2014 P. 477-482. - ISBN
978-1-4799-5337-0

Bod č. 2 téz DzP

- 1) Vytvoriť programovú knižnicu podporujúcu výpočty pomocou FKM, ktorá bude kompatibilná s existujúcimi systémami realizujúcimi riadenie malého prúdového motora ISTC-21V.
- Je riešený v publikácii:
A Proposal for Multi-Purpose Fuzzy Cognitive Maps Library for Complex System Modeling / Michal Puheim, Ján Vaščák, Ladislav Madarász - 2015. In: SAMI 2015: 13th IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics: Proceedings: January 22-24, 2015, Herlany. - Danvers: IEEE, 2015 P. 175-180. - ISBN 978-1-4799-8220-2

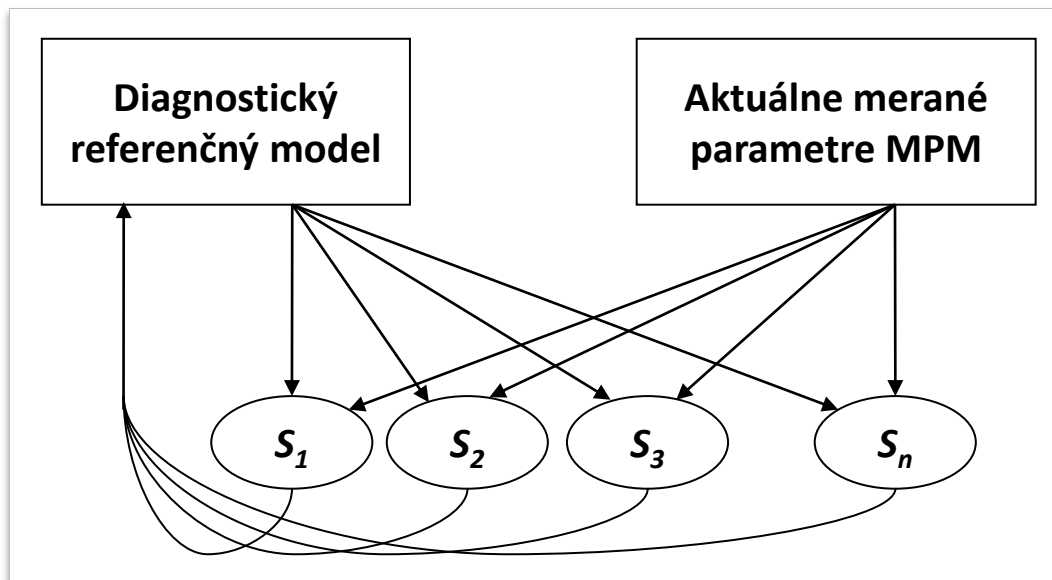
Ďakujem za pozornosť!

Appendix

OTÁZKY OD OPONENTA

Otázka č. 1

„Na obrázku 38 objasnite prepojenie medzi konceptami S_1 až S_n s diagnostickým referenčným modelom, teda prečo je výstup konceptov prepojený len s diagnostickým referenčným modelom?“



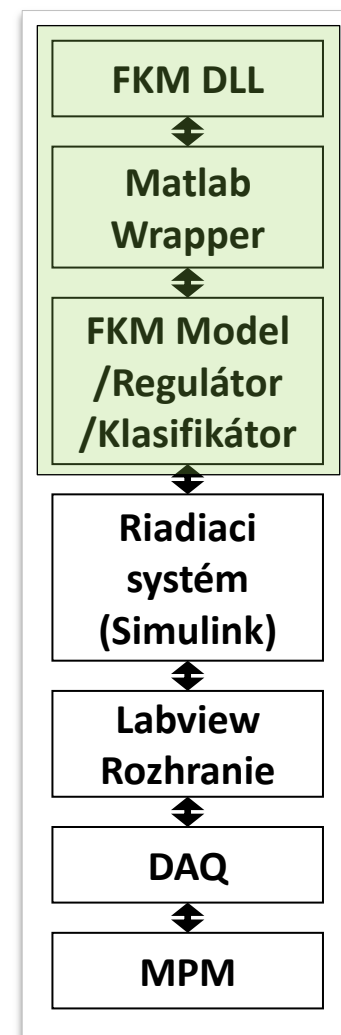
Vítězný koncept
(situačná trieda):

$$S_{actual} = \operatorname{argmax}_{i=1}^n (S_i)$$

Otázka č. 2

„Riadiace algoritmy MPM sú realizované v pseudo/reálnom čase. Popíšte možnosti prepojenia FKM ako riadiaceho systému so súčasným riadiacim systémom a analyzujte jeho možnú zložitosť a dopad na prácu celého riadiaceho systému v reálnom čase, prípadne obmedzenia z toho vyplývajúce.“

- Obmedzenie časovou konštantou systému (resp. periódou vzorkovania) -> **$\tau = 0.1s$**
- Aktualizácia stavu FKM musí byť realizovaná v tomto čase.
- Možnosť paralelizácie výpočtov na viac jadier CPU.



Otázka č. 2

- Určenie výpočtovej náročnosti:
 - Výkon CPU = bežne 3.0 GHz = **300 000 000 cyklov za 0.1s**
 - Súčet/násobenie dvoch čísel ≈ 10 cyklov
 - Výpočet aktivácie konceptu: ----->

$$A_j(t+1) = p \left(A_j(t) + \sum_{i=1; i \neq j}^n w_{ij} A_i(t) \right)$$

 - n súčinov + n súčtov + prahovanie $\approx 10n + 10n + 100 \approx \mathbf{20n+100}$
 - Výpočet aktivácie mapy:
 - počet konceptov * $(20n+100) \approx \mathbf{p(20n+100)}$

Počet konceptov	Poč. vstupov/koncept	Počet cyklov CPU	Vyťaženosť CPU
20	20	10 000	0.003%
200	40	180 000	0.060%
2 000	400	16 200 000	5.400%
15 000	995	300 000 000	100%
30 000	2 000	1 203 000 000	401%

Otázka č. 3

„Analyzujte možný prínos aplikácie FKM z pohľadu presnosti a schopnosti adaptácie v porovnaní s použitím dopredných neurónových sietí (FF ANN).“

FKM

- Zvládnutie dynamických javov vďaka spätnoväzobnej štruktúre.
- Nižšia presnosť modelu (z dôvodu lineárnych vzťahov medzi konceptami).
- Lepšia adaptácia na zmenené podmienky.
- Lepšia čitateľnosť modelu.
- Možnosť odvodenia základných pravidiel správania systému.
- Náročnejšie učenie.
- Zložitejšia implementácia.

FF ANN

- Absencia spätnej väzby.
- Nevyhnutnosť vyššej presnosti modelu.
- Problém s adaptáciou na zmenené podmienky.
- Nízka čitateľnosť modelu.
- Jednoduchšie učenie.
- Jednoduchšia implementácia.