

Juraj Spalek - Monika Molnárová *

POUŽITIE FUZZY LOGIKY V RIADENÍ KRITICKÝCH PROCESOV

USING FUZZY LOGIC IN THE CRITICAL PROCESS CONTROLLING

Pre riadenie bezpečnostne kritických procesov sa často používajú dvojkanálové riadiace systémy. V článku je ukázaný prínos fuzzy logiky pri komparovaní výstupných informácií takých systémov. Na príklade jednotky cieľového brzdenia trakčného vozidla je uvedený návrh fuzzy komparátora vstupných veličín a jeho optimalizácia metódou ANFIS. Poruchy systému sú simulované v prostredí Matlab-Simulink. Výsledkom je analýza vplyvu porúch na bezpečnosť riadenia jazdy vlaku.

1. Opis kritického procesu

Riadenie železničnej dopravy má všetky atribúty bezpečnostne kritického procesu [1]. Jeho subsystémom je sústava cieľového brzdenia trakčného vozidla umožňujúca zastaviť vlakovú súpravu v danom mieste trate s definovanou presnosťou. Podmienkou je vysoká vierochnosť informácií o okamžitej polohe i rýchlosťi súpravy.

Informácia o skutočnej rýchlosti vozidla je určujúcou pre cieľové brzdenie súpravy. Ak sú obidva subsystémy merania rýchlosť umiestnené na mechanicky odlišných prvkoch sústavy (snímanie otáčok trakčného motora, snímanie otáčok hnanej alebo vlečenej nápravy), možno vplyv oboch rušivých javov eliminovať.

S ohľadom na to, že správanie systému pri bezporuchovej činnosti je deterministické, ale pod vplyvom porúch sa stáva spravidla stochastickým, je využitie fuzzy logiky pre ich spracovanie a rozhodovanie opodstatnené, ba nevyhnutné. Riešenie konvenčnými prostriedkami by nebolo efektívne.

2. Modelovanie, optimalizácia a simulácia

Fuzzy komparátory sa obvykle navrhujú heuristickými postupmi, ktoré nezaručujú dosiahnutie optimálnych funkcií príslušnosti jednotlivých premenných. Úlohou je navrhnuť fuzzy komparátor údajov v_1, v_2 o okamžitej rýchlosťi, ktorého výstupom je informácia o miere vierochnosti prvej z nich. Miera vierochnosti nadobúda hodnoty z intervalu (0,1). Návrh fuzzy komparátora (obr. 1) je opísaný v [2]. Kvalitnejšie sú komparátory, ktorých cieľový tvar funkcií príslušnosti sa dosiahol algoritmickej, postupným učením sa systému na definovanej množine vzorových

In this paper the advantages of fuzzy logic used for two - channel systems output comparison in safety - related critical applications have been presented. The paper deals with the design of the fuzzy logic - based comparator that compares the data of traction vehicle velocity in target braking process and its optimisation using the ANFIS method. Some failures of the system in Matlab - Simulink environment have been simulated. The result is the analysis of failures consequences from the point of system safety.

1. Critical process description

The control of railway traffic has all the attributes of the safety critical process [1]. One of its subsystems is a unit for target braking of the traction vehicle that allows to stop the train at a designated position of rail-road line with defined precision. It is upon the condition that accordance of information on immediate position and velocity of the rolling stock is high. The traction vehicle is equipped with two independent units for measuring velocity. Information about real velocity of the vehicle is of determination for target braking of the rolling stock. If both subsystems of velocity measurement are placed on two mechanically different elements of the rolling stock, then it is possible to eliminate influence of both noisy effects. The system behaviour with regard to fault-free activity is deterministic but under the failure influence it becomes stochastic regular, therefore the use of fuzzy logic for their processing and reasoning is well-founded even unavoidable. Making solution with conventional means would not be effective.

2. Modelling, optimisation and simulation

Fuzzy comparators are usually designed by heuristic methods which do not guarantee the attainment of optimal membership functions of separate variables. The main problem is to design a fuzzy comparator of instantaneous velocities v_1 and v_2 with information about credibility rate of the first of them at its output. The design of the fuzzy comparator (Fig.1) is described in [2]. Comparators with the target shape of membership functions attained in an algorithmic way via adaptive learning of the system on the defined set of pattern I/O data pairs have higher quality

* Doc. Ing. Juraj Spalek, PhD., Ing. Monika Molnárová,

Department of Informatic and Safety Systems, Faculty of Electrical Engineering, University of Žilina,
Veľký diel - NF, 010 26 Žilina, Slovak Republic, tel. +421-89-655 559, e-mail: spale@fpedas.utc.sk, monika@kete.utc.sk

vstupno-výstupných dátových dvojíc [3]. Výsledkom takého príslušného rýchlosťou v_1 , absolútnej odchýlky Δv a mierou viero-

množnosti. Na uplatnenie metódy ANFIS je potrebná tréningová množina dát, na ktorých sa adaptívna sieť učí. Každý bod tréningovej množiny je definovaný príslušnou rýchlosťou v_1 , absolútou odchýlkou Δv a mierou viero-

ností. Výsledná plocha optimalizovaného fuzzy komparátora je na obr. 2.

Na overenie dynamických vlastností navrhnutého fuzzy komparátora bol v prostredí MATLAB, Fuzzy toolbox a Simulink vytvorený model sústavy [2]. Obsahuje dve jednotky merania rýchlosťi trakčného vozidla TACHO1 a TACHO 2, ktorých výstupními premennými sú okamžité rýchlosťi v_1 a v_2 s definovaným časovým priebehom, model fuzzy inferenčného systému (FIS) komparátora a zobrazovacie jednotky relevantných časových priebehov.

Pre simuláciu reálneho procesu sme zvolili exponenciálnu funkciu brzdenia trakčného vozidla (v_1) s počiatocnou hodnotou 200 km/h. Výstup v_2 jednotky TACHO 2 by mal v bezporuchovom stave rovnaký časový priebeh, ale implementáciou zvolenej dysfunkcie je jeho okamžitá hodnota vždy väčšia o 15 % (obr. 3). Možno predpokladať, že táto skutočnosť nepriaznivo ovplyvní vi-

reodnosť údaja o rýchlosťi v_1 . Ak by objektívna rýchlosť vozidla bola práve v_1 , t. j. odchýlka je zapríčinená chybou tachometra V_2 , musí byť entropia informácie v_1 korelovaná s okamžitou hodnotou zodpovedajúcej miery viero-

množnosti (< 1), lebo s rovnakou pravdepodobnosťou by mohol nastáť aj opačný jav. Graf časového priebehu výstupu fuzzy komparátora na obr. 4 ukazuje, že funkcia miery viero-

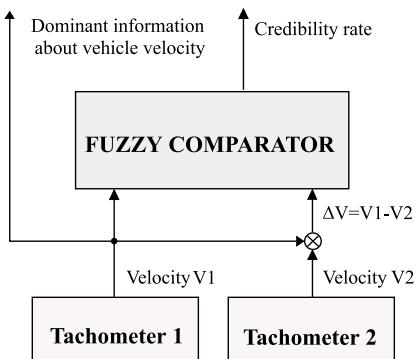
množnosti údaja v_1 je pri konštantnej relatívnej chybe merania nelineárna. Tvar krivky má dôležitú vysvetľiaciu hodnotu aj vo vzťahu k ploche fuzzy komparátora, pretože je trajektoriou súradnic spojitého technologického procesu. Krivka neobsahuje body s výraznou nespojitosťou funkcie, ani lokálne extrémy, čo svedčí o dobrých vlastnostiach fuzzy inferenčného systému [3].

3. Bezpečnosť cieľového brzdenia vlaku

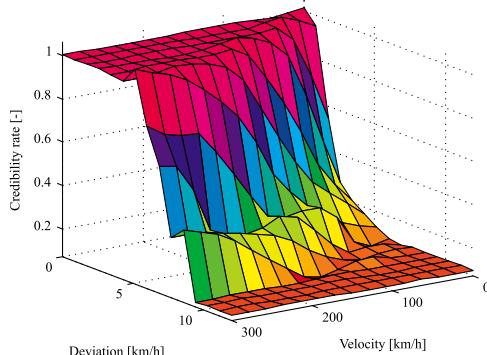
Najnovšie trakčné vozidlá disponujú regulátormi rýchlosťi začlenenými do vlastného riadiaceho systému. Princíp činnosti cieľového brzdenia spočíva v sledovaní okamžitej vzdialenosťi od

[3]. Such an approach results in adaptive neuro-fuzzy inference system ANFIS.

For using ANFIS it is necessary to have a training data set that contains desired input/output data pairs of the target system to be modelled. Each point of the training data set is defined by relevant velocity v_1 , absolute deviation Δv and credibility rate.



Obr. 1. Bloková schéma modelu
Fig. 1 The model block diagram



Obr. 2. Plocha FIS optimalizovaného komparátora
Fig. 2 Optimised FIS comparator surface

the credibility of the value of v_1 . If the objective vehicle velocity was exactly just v_1 , i. e., the deviation is caused by fault of TACHO2, redundancy of information v_1 would have to be correlated with the instantaneous value of the relevant credibility rate (< 1), because occurrence of the opposite phenomenon has the same probability. Fig. 4 shows the time course of the fuzzy comparator output. The figure of this curve has an important declaring meaning with respect to fuzzy comparator surface, because it is the trajectory of coordinates of the continuous technological process. This curve neither includes points of marked discontinuous function, nor local extremes. This fact testifies that characteristics of FIS are correct [3].

3. Safety of the train target braking

The latest traction vehicles dispose of a velocity regulator incorporated into the control system. The operation principle of the target braking is in following the instantaneous distance to the

cieľa (zvyšku dráhy do cieľa), generovaní nelineárnej funkčnej závislosti navádzacej rýchlosť vlaku a riadení regulátora rýchlosť so známou cieľovou funkciou.

Navádzacia funkcia cieľového brzdenia je parabolou 2. stupňa [4]:

$$v = 3,6 \sqrt{2.a_n.s}, \quad (1)$$

kde v je okamžitá rýchlosť [m/s], a_n je nominálne odrýchlenie [m/s^2], s je zbytok dráhy do cieľa [m].

Navedenie vlaku na navádzaciu krivku je charakterizované lineárnym nárastom odrýchlenia v čase ($(da/dt) = \text{konst.}$) a v závere cieľového brzdenia dochádza k lineárnemu poklesu odrýchlenia v čase na hodnotu cca 0,2 - 0,3 m/s^2 .

Regulácia rýchlosť navedie vlak na optimálnu navádzaciu krivku len za predpokladu, že jeho vstupmi sú vierochnodnotné informácie o okamžitej rýchlosť a zvyšku dráhy do cieľa. Vtedy vlak bezpečne dobrzdí vo vzdialnosti s od okamžitej polohy na trati:

$$s = \frac{v^2}{3,6^2 \cdot 2.a_n} \quad (2)$$

Fuzzy komparátor údajov o rýchlosť vlaku umožňuje kvantifikovať presnosť údaja o okamžitej rýchlosť pomocou parametra „miera vierochnodnosti“ (MV). Nech maximálna absolútна chyba merania rýchlosť pri danej hodnote MV je Δv_{MV} . Vlak bezpečne dobrzdí vo vzdialenosťi $s + \Delta s_{MV}$ od okamžitej polohy na trati, t. j., s presnosťou Δs_{MV} :

$$s + \Delta s_{MV} = \frac{(v + \Delta v_{MV})^2}{3,6^2 \cdot 2.a_n} \quad (3)$$

Maximálna pomerná chyba cieľového brzdenia je:

$$\varepsilon_{MV} = \frac{s}{s + \Delta s_{MV}} = \left(1 + \frac{\Delta v_{MV}}{v}\right)^2 \quad (4)$$

Maximálna pomerná chyba ε cieľového brzdenia pri γ -percentnej chybe konvenčného regulátora je daná pomerom skutočnej vzdialenosťi s cieľa a chybových zvyškov s' dráhy:

$$\varepsilon(\gamma) = \frac{s}{s'} = \left(1 + \frac{\gamma}{100}\right)^2 \quad (5)$$

target (to the rest of the trajectory to the target), generating non-linear functional dependency of the train's guidance velocity and controlling the velocity regulator with known target function.

The guidance function of the target braking is a second order parabolic function [4]:

$$v = 3,6 \sqrt{2.a_n.s}, \quad (1)$$

where v is the instantaneous velocity [m/s], a_n is the nominal deceleration [m/s^2], s is the rest of the trajectory to the target [m].

The train guidance to the guidance curve is characterised by linear deceleration rise in time and in tow of the target braking there is the linear deceleration decrease in time to the value about 0.2 to 0.3 [m/s^2].

The velocity regulator will lead the train to the optimal guidance curve just provided that its inputs hold veracious information about instantaneous velocity and the rest of trajectory to the target. Under these preconditions, the train will brake down to stop with safety in the distance s from the train instantaneous position at the railroad line:

$$s = \frac{v^2}{3,6^2 \cdot 2.a_n} \quad (2)$$

The fuzzy comparator of data on the train velocity enables to quantify the precision indication of the instantaneous velocity via

parameter “Credibility rate” (CR). Let's denote Δv_{CR} the maximum absolute error of the velocity measurement with the CR value given. Then the train will brake down to a stop with safety in the distance $s + \Delta s_{CR}$ from the instantaneous position at the railroad live, i.e. with precision Δs_{CR} :

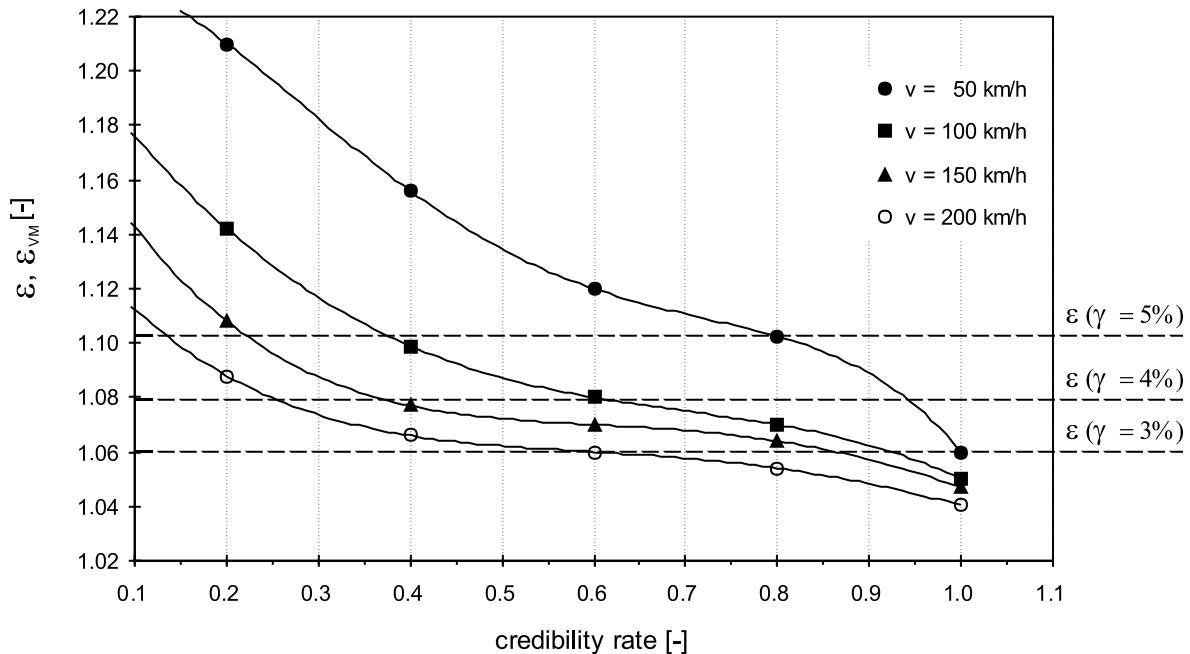
$$s + \Delta s_{CR} = \frac{(v + \Delta v_{CR})^2}{3,6^2 \cdot 2.a_n} \quad (3)$$

The maximum comparative error of the target braking is:

$$\varepsilon_{CR} = \frac{s}{s + \Delta s_{CR}} = \left(1 + \frac{\Delta v_{CR}}{v}\right)^2 \quad (4)$$

The maximum comparative failure ε of the target braking at γ -percent error of the conventional regulator is given as a ratio of the real target distance s and the error rests s' of the trajectory:

$$\varepsilon(\gamma) = \frac{s}{s'} = \left(1 + \frac{\gamma}{100}\right)^2 \quad (5)$$



Obr. 5. Pomerná chyba cieľového brzdenia fuzzy a konvenčného regulátora
Fig. 5 The comparative error of the target braking by the fuzzy vs. conventional comparator

Grafy rovníc (4), (5) pre hodnoty $\gamma = 3, 4$ a 5% , $v = 50, 100, 150$ a 200 [km/h] sú na obr. 5.

Diagrams resulting from equations (4) and (5) for values $\gamma = 3, 4$ a 5% , $v = 50, 100, 150$ a 200 [km/h] are shown in Fig.5.

4. Záver

Navrhovaný princíp komparácie vylučuje potrebu návratu k manuálnemu riadeniu procesu pri výskytte poruchy alebo ju výrazne redukuje. Aktuálna informácia o miere viero hodnosti meranej rýchlosťi vstupuje jednak do algoritmu riadenia jazdy, ale má aj arbitrázny význam pri analýze príčin prípadnej nehody.

Zovšeobecnením opísaných princípov možno dospieť ku kvantitativne vyššiemu stupňu komparácie, kedy je fuzzy inferenčný systém schopný generovať správny výstup za predpokladu, že aspoň jeden z prenosových reťazcov poskytuje viero hodnú informáciu o dynamike sledovaného procesu [2]. Taký riadiaci systém je potom schopný korigovať svoje chovanie pri výskytte definovaných porúch menej ohrozujúcim spôsobom.

Z výsledkov vyplýva:

- Ak sa vlak pohybuje v oblasti navádzania na navádzaciu krivku počiatočnou rýchlosťou 100 km/h, bude maximálna pomerná chyba cieľového brzdenia pomocou fuzzy komparátora menšia ako pri konvenčnom regulátori pracujúcom so 4 % - nou chybou len za predpokladu, že fuzzy komparátor bude pracovať s mierou viero hodnosti lepšou ako 0,60. Z princípu návrhu fuzzy komparátora vyplýva, že takej miere viero hodnosti zodpovedá odchýlka meraného údaja rýchlosťi $\pm 4,13$ km/h.

4. Conclusions

In the case of a system of target breaking of a traction vehicle the designed principle of a comparison excludes the requirement for return to the manual process control under a failure occurrence or reduces it significantly. Relevant information about credibility rate of the measured velocity enters not only the control algorithm of drive, but it also has an arbitrary meaning in casual accident analysis.

Generalising the all described principles, it is possible to reach a higher level of comparison quality when the FIS is able to generate correct output when assuming, that at least one of the transmission channels provides a reliable information about dynamism of the followed process [2]. Such a control system is able to correct its behaviour under occurrence of defined failures in a less threatening manner.

The following facts resulted:

- If the train's starting velocity is 100km/h in area guiding to the guidance curve, the maximum comparative error of the target braking with fuzzy comparator will be less than considering the conventional regulator, that is working with a 4 percent error, just with assumption that a fuzzy comparator will work with a better credibility rate than 0.60. The design principle of a fuzzy comparator results in a deviation of the measured velocity ± 4.13 km/h that corresponds to such a credibility rate.

- Ak bude fuzzy komparátor generovať údaj o miere viero hodnosti väčší ako 0,8 (max odchýlka je $\pm 5,13$ km/h), bude pri každej rýchlos ti vlaku maximálna pomerná chyba cieľového brzdenia menšia ako 5 % pri konvenčnej regulácii.

Snahou autorov bolo poukázať na možnos ti využitia redundancie u dvojkanálových systémov v bezpečnostne kritických aplíkaciach. Konvenčné komparátory sú schopné výskyt poruchy jedného z kanálov len konštatovať, fuzzy komparátor umožňuje systému pokračovať v predpokladanej funkcií. Z hľadiska bezpečnosti riadenia nie je ukázaný spôsob detekcie poruchy obmedzujúcim faktorom, lebo pri znalosti vlastností kritického procesu možno definovať medzne hodnoty miery viero hodnosti meraných údajov, pri ktorých je úroveň bezpečnosti riadenia postačujúca. Ide najmä o hierarchiu bezpečnosti jednotlivých funkcií systému. Zreteľný je aj pozitívny vplyv na prevádzkovú spoľahlivosť systému.

Literatúra

- [1] SPALEK, J. a kol.: Fuzzy rozhodovanie v kritických procesoch, zborník 1. vedeckej konferencie Riadenie tekutinových systémov, Žilinská univerzita, 1996, s. 103-113
- [2] MOLNÁROVÁ, M., SPALEK, J.: Fuzzy Logic - Based Comparison of Redundant Information, zborník konferencie Information Systems Modeling - MOSIS'98, Ostrava, Česká republika, 5/1998
- [3] MOLNÁROVÁ, M.: Adaptívny neuro-fuzzy inferenčný systém (ANFIS) a jeho použitie, diplomová práca, Katedra IZS, Žilinska univerzita, 5/1997
- [4] ŠULA, B.: Cílové brzdení a automatické vedení vlaku v ČR, NŽT 1996/2, s. 37 - 42

- If the fuzzy comparator generates data with a credibility rate higher than 0.8 (max deviation is ± 5.13 km/h), the maximum comparative error of the target braking at any train velocity will be smaller than 5 % in a conventional regulation.

In this paper a possibility of using redundancy in a double-channel system in the safety-critical applications is represented. Conventional comparators are able just to verify a failure occurrence on one of the channels, a fuzzy comparator enables a continuation of the system assumed function. From the point of a safety control the shown way of fault detection is not a limiting factor because under the known characteristics of a critical process we can define the limit values of a credibility rate of measured data where the level of safety control is sufficient. Safety hierarchy of individual system functions is mostly the point of question. The positive influence on operational reliability of the system is legible, too.

References

- [1] SPALEK, J. a kol.: Fuzzy rozhodovanie v kritických procesoch, In: Riadenie tekutinových systémov, 1. vedecká konferencia, strojnícka fakulta, Žilinská univerzita, 1996, pp. 103-113
- [2] MOLNÁROVÁ, M., SPALEK, J.: Fuzzy Logic - Based Comparison of Redundant Information, Proc. Information Systems Modeling - MOSIS'98, Ostrava, Česká Republika, 5/1998
- [3] MOLNÁROVÁ, M.: Adaptívny neuro-fuzzy inferenčný systém (ANFIS) a jeho použitie, diplomová práca, katedra IZS, Žilinska univerzita, 5/1997
- [4] ŠULA, B.: Cílové brzdení a automatické vedení vlaku v ČR, NŽT 1996/2, pp. 37 - 42