

Adaptivni neuro fazi sistemi u identifikaciji, modelovanju i upravljanju – pregled stanja u oblasti istraživanja

MITRA V. VESOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd,

RADIŠA Ž. JOVANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

Pregledni rad

UDC: 004.896

DOI: 10.5937/tehnika2204439V

Adaptivni neuro fazi sistemi zaključivanja (eng. Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems) ANFIS imaju sve veću tendenciju upotrebe u naučnim istraživanjima i praktičnim primenama. Digitalizacija proizvodnje i pojava Industrije 4.0 omogućila je razvoj ovog trenda, pre svega, zbog sposobnosti prilagođavanja zadatku integrisanjem veštačkih neuronskih mreža i fazi logike, čime se potencijalno mogu iskoristiti prednosti obe tehnike u jedinstvenim okvirima. Ovaj pristup olakšao je procese modelovanja, analize podataka, klasifikacije i upravljanja. Pogodnost ANFIS sistema, u odnosu na konvencionalne metode, se ogleda u mogućnosti predviđanja izlaza na osnovu skupa ulaza i baze pravila. Takođe, ovi sistemi su pogodni za korišćenje u upravljanju, jer pružaju mogućnost za podešavanje parametara upravljačkog sistema. U ovom radu je predstavljena struktura ANFIS sistema i dat je detaljan prikaz dosadašnjih dostignuća, kroz komparativnu analizu, pri čemu su istaknute neke moguće sfere interdisciplinarnih primene. Razmatrane su mogućnosti za varijacije, poboljšanja i inovacije algoritma, kao i smanjenja složenosti same arhitekture mreže. Prikazani su predlozi za neke nove, još neiskorišćene kombinacije sa metaheurističkim metodama optimizacije. Konačno, date su bitne smernice o tome kada i gde je korisno primeniti ANFIS sisteme.

Ključne reči: ANFIS, adaptivni sistemi, fazi logika i upravljanje, neuronske mreže, optimizacija

1. UVOD

Usled pojave četvrte industrijske revolucije, automatizacije, digitalizacije i optimizacije proizvodnje, sve složenije količine elektronskih podataka onemogućavaju istraživačima da stvore apsolutni metod analize koji se može univerzalno koristiti. Tradicionalne tehnike su neretko vremenski zahtevne i ne pružaju jasnu vizualizaciju velikih skupova podataka. Modelovanje sistema zasnovano na konvencionalnim matematičkim metodama nije dovoljno prilagođeno za rad sa loše definisanim sistemima [1]. Važne prednosti koju savremene metode mogu ponuditi u odnosu na tradicionalne ogledaju se u situacijama u kojima: (a) ima mnogo ulaznih veličina, a malo uzoraka; (b) postoje ekonzistentne vrednosti ili su podaci heterogeni i sadrže više tipova; (v) se mora naći nelinearna ulazno–izlazna zavisnost. Baš kao i tradicionalni modeli, savreme-

ne tehnike mogu pružiti poznate statističke metode za procenu dobijenog učinka. Jedna od tih savremenih tehnika je upravo veštačka inteligencija. Ona uključuje algoritme koji sadrže elemente ljudskog načina razmišljanja i rešavanja problema, kao što su: algoritmi fazi logike, veštačke neuronske mreže, metaheuristički algoritmi, kao i ekspertske sistemi [2]. Termin fazi logika uveo je Lotfi Zade 1965. godine. Zade razvija teoriju fazi skupova koja se zasniva na shvatanju da je svaka činjenica prisutna ili odsutna do određenog stepena. U tom smislu fazi teorija svodi crno-belu matematiku i logiku na posebne slučajeve sivih relacija [2]. Fazi sistemi zaključivanja (eng. Fuzzy Inference Systems - FIS) koriste fazi pravila za preslikavanje ulaznih podataka na izlazne podatke [2]. S druge strane, metoda veštačkih neuronskih mreža (eng. Artificial Neural Networks - ANN) može se koristiti kao alternativna metoda u oblastima analize i predviđanja, jer omogućava rukovanje velikim i složenim sistemima sa mnogo međusobno povezanih parametara [3]. U literaturi su široko proučavane prednosti i mane FIS i ANN sistema [2]. Očigledno je da nijedan pristup nije savršen i da ima dve strane – dobru i lošu. Prirodno se pojavila potreba za stvaranjem tzv. Hibridnih sistema

Adresa autora: Mitra Vesović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 15

e-mail: m.vesovic@mas.bg.ac.rs

Rad primljen: 21.07.2022.

Rad prihvaćen: 08.08.2022.

koji rezultuju boljim performansama u odnosu na svoje pojedinačne članove. Sinergijom ANN i FIS se kombinuju pogodnosti obučavanja koje poseduju neuronske mreže sa donošenjem odluka nalik ljudskoj metodologiji. Istovremeno, eliminiše se mana crne kutije tj. ponašanje mreža je jasnije, dok fazi sistemi dobijaju mogućnost učenja. Neki od sistema koji su nastali na ovaj način su: fazi adaptivna neuronska mreža (eng. Fuzzy Adaptive Learning Control Network FALCON), ANFIS, neuro fazi upravljanje (eng. Neuro Fuzzy Control NEFCON), samokonstruišući neuro fazi sistem zaključivanja (eng. Self Constructing Neural Fuzzy Inference Network SONFIN), kao i mnoga njihova poboljšanja. ANFIS se često koristi u različitim tehnikama istraživanja podataka, mašinskog učenja i upravljanja. Našao je primenu u poslovanju i ekonomiji [4], zaštiti na internetu [5], potrošnji goriva [6], energetici i zaštiti životne sredine [7], prehrambenoj industriji [8], predviđanju mašinske obrade [9], predviđanju evapotranspiracije [10], u proceni koeficijenta snage vroturbina [11] i mnogim drugim oblastima.

2. PREDNOSTI I MANE ANFIS–A

Da bi se demonstrirala superiornost ANFIS metode u odnosu na FIS i ANN pojedinačno, navodi se istraživanje prikazano u [6], gde je korišćenjem sve tri tehnike urađeno predviđanje potrošnje goriva za različite marke i modele automobila. Broj epoha nije bio ograničen, a za grešku se uzimala razlika između dobijenog i stvarnog izlaza. Rezultati su pokazali da je trajanje ANFIS obučavanja vrlo kratko u poređenju sa ANN. Ovo znači da bi za sistem sa ogromnim brojem podataka upotreba ANFIS–a umesto neuronske mreže bila itekako opravdana. Takođe, primenom ANFIS–a dobijeni su rezultati sa minimalnom ukupnom greškom u poređenju sa drugim metodama, zbog čega se može reći da je za rešavanje široke klase problema ANFIS bolji sistem od FIS i ANN. Istraživanje prikazano u [12] pokazuje da je sistem električnog pogona za objekt s više masa, koji je upravljani ANFIS–om, robusniji i otporniji na poremećaje u odnosu na sistem sa konvencionalnim PI upravljačkim sistemom.

U mnogim komparativnim istraživanjima neuronskih mreža i ANFIS modela navode se još i prednosti kao što su: sposobnost prilagođavanja problemu, sposobnost brzog učenja i zaključivanja o prirodi ulaza na osnovu izlaza [2], [3], [7]. Ovde se još i navodi da je ANFIS projektovan tako da omogućava istovremeno obavljanje radnji (eng. parallel computing) i da poseduje mogućnosti usvajanja prethodnog znanja i donošenja zaključaka, veliku brzinu konvergencije algoritma i mogućnost širokog izbora funkcija pripadnosti. Još jedna bitna pogodnost, o kojoj će biti više reči kasnije, je ta što je ANFIS kompatibilan sa mnogim metodama, klasičnim upravljačkim sistemima i

optimizacionim algoritmima. ANFIS kao upravljački sistem je u mnogim radovima testiran i u slučaju delovanja poremećaja, a rezultati su potvrdili da se ova metoda može primeniti za poboljšanje upravljačkih performansi nelinearnih sistema [1]. Iz svega gore navedenog mogu se sumirati prednosti ANFIS strukture: daje zadovoljavajuće rezultate u nelinearnim okruženjima; predstavlja reprezentaciju znanja, prilagodljivu različitim izazovima; za visoku složenost mreže postiže se relativno mala greška u konvergenciji koja je kratka; zahteva manje podesivih parametara od ostalih neuronskih mreža; omogućava paralelno računanje; nudi veliki broj funkcija pripadnosti; omogućava odličnu integraciju sa drugim metodama sinteze upravljanja i omogućava upravljanje sa nepotpunim ulaznim podacima i u prisustvu poremećaja. Pored prednosti, u literaturi se, dosta ređe, mogu pronaći i neke mane ANFIS pristupa [4]: obučavanje može biti računarski zahtevno i usporiti konvergenciju; nedostatak jedinstvenog algoritma za odabir parametara sistema u cilju dobijanja bolje ekstrapolacije; za postizanje manje greške potreban je veliki broj uzoraka, što može usporiti i otežati rad, kao i vidljivost rada sistema. Iako je ANFIS jedan od najboljih kompromisa između fazi sistema i neuronskih mreža, može imati ograničenja u vidu velike računarske složenosti, Slika 1.



Slika 1 - Sposobnost ANFIS–a prema zahtevima modela

3. ARHITEKTURA ANFIS MREŽE

Prvi ANFIS model razvio je Jang [1]. Strukturu ANFIS–a čine pet slojeva, a uobicaeno je da se u radovima prikazuje struktura sa dve ulazne i jednom izlaznom veličinom, Slika 2. To je slučaj i u ovom radu, pri čemu je izabran prikaz sa dve funkcije pripadnosti i dva pravila. Tipičan skup pravila se tada može napisati kao:

Ako x_1 je A_1 i x_2 je B_1 onda $f_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$

Ako x_1 je A_2 i x_2 je B_2 onda $f_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$

Prvi sloj

Prvi sloj na izlazu daje stepene pripadnosti ulaza odgovarajućim funkcijama pripadnosti, koje se potom

dodeljuju drugom sloju. Ukupan broj slojeva se označava sa L , a izlaz čvora na i -toj poziciji u k -tom sloju označava se sa O_i^k . Prema tome, za prvi sloj važi:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x_1), O_{i+2}^1 = \mu_{B_i}(x_2), i=1,2. \quad (1)$$

gde su μ_{A_i} i μ_{B_i} funkcije pripadnosti za $i=1,2$, sledstveno. Svi čvorovi u ovom sloju su adaptivnog karaktera, pa se oblik funkcije pripadnosti može menjati tokom procesa obučavanja.

U literaturi se najčešće nailazi na Gausove ili zvonaste funkcije pripadnosti, a isprobane su i mnoge druge, među kojima najčešće trouglaste i trapezoidne funkcije [4].

Npr. Gausova funkcija pripadnosti je data pomoću dva parametra kao:

$$G(x, \alpha, \beta) = e^{-\beta(x-\alpha)^2}. \quad (2)$$

Drugi sloj

Za razliku od prethodnog sloja, čvorovi drugog sloja su fiksni.

Drugi sloj na izlazu daje stepene aktivacije pravila w_i :

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x_1) \cdot \mu_{B_i}(x_2), i=1,2. \quad (3)$$

Ovi stepeni aktivacije imaju ulogu težinskih koeficijenata, gde njihove velike vrednosti označavaju da je pravilo dominantnije u odlučivanju o konačnom izlazu.

Treći sloj

Kao i prethodni sloj, i ovaj sadrži isključivo fiksne čvorove. U njemu se izračunavaju normalizovane vrednosti težinskih koeficijenata, a izlaz O_i^3 dat je sa:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i=1,2 \quad (4)$$

Četvrti sloj

Ovaj sloj je iste prirode kao i prvi – adaptivne. Izlaz svakog čvora može se opisati funkcijom sledećeg tipa:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i), \quad (5)$$

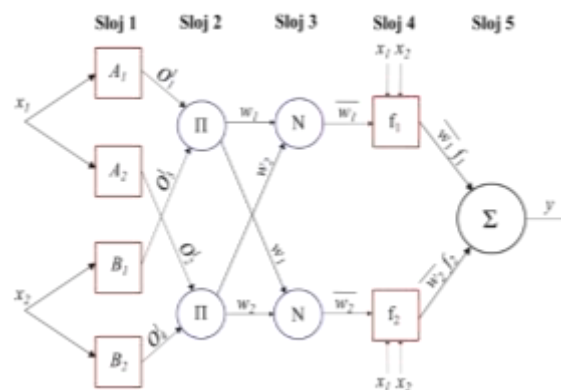
gde $\{p_i, q_i, r_i\}$ predstavlja skup parametara zaključka. Broj parametara zaključka svakog pravila za jedan je veći od broja ulaza [13].

Peti sloj

Poslednji, izlazni sloj, sadrži samo jedan fiksni čvor u kojem se svi dolazeći signali sabiraju. Izlaz se može izraziti na sledeći način:

$$O_i^5 = y = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}. \quad (6)$$

$$y = (\bar{w}_1 x_1) p_1 + (\bar{w}_1 x_2) q_1 + \bar{w}_1 r_1 + (\bar{w}_2 x_1) p_2 + (\bar{w}_2 x_2) q_2 + \bar{w}_2 r_2 \quad (7)$$



Slika 2 - Primer ANFIS structure

U zavisnosti od primene i potreba ANFIS se modifikovao, pa se tako u literaturi mogu pronaći modeli koji podržavaju proširenje osnovnih principa: dozvoljavajući više izlaznih veličina – CANFIS (eng. Coactive Neuro Fuzzy Inference System) i MANFIS (eng. multiple adaptive neuro fuzzy inference system); inkorporaciju talasne transformacije WANFIS (eng. Wavelet-Adaptive Neuro Fuzzy Inference System), ili obučavanje pomoću analitičke metode poznate kao ekstremno mašinsko učenje ELANFIS (eng. Extreme Learning Machine–ELM).

4. METODE OBUČAVANJA

ANFIS struktura sadrži dve grupe parametara: parametre premise i parametre zaključka pravila. Obučavanje ANFIS mreže podrazumeva određivanje ovih parametara korišćenjem nekog optimizacionog algoritma i od prvog razvoja ANFIS-a predloženi su različiti pristupi obučavanju: zasnovani na izvodu (gradijentni) [1], heuristički [4], [13] i hibridni. Jedan algoritam optimizacije se može koristiti za podešavanje svih parametara ili se parametri u premisi ANFIS-a podešavaju jednim, a parametri zaključka drugim algoritmom.

4.1. Gradijentne metode obučavanja

U izvornom radu [1] predložena su četiri načina za podešavanje parametara: 1) samo gradijentna metoda (eng. gradient descent GD). Problem koji se javlja kod gradijentne metode je nedovoljno velika brzina i opasnost od zarobljavanja u lokalnom minimumu. Iako postoje istraživanja u kojima su svi parametri podešeni samo ovim algoritmom [13], ovakav način podešavanja se najčešće koristi u kombinaciji sa nekim

drugim; 2) GD i metoda najmanjih kvadrata (eng. least square estimate LSE), gde se LSE primenjuje samo za pronalaženje početnih vrednosti parametara zaključka da bi kasnije GD ažurirao sve parametre; 3) GD i LSE (hibridni) gde se prvo prolaskom unapred podešavaju parametri zaključka, dok se parametri premise drže fiksnim. Zatim se prolaskom unazad podešavaju parametri premise, dok se parametri zaključka ne menjaju. Ovo je ujedno, kroz radove, najviše korišćen pristup; 4) samo LSE kojim se ANFIS linearizuje, a proširen Kalmanov filter (eng. Extended Kalman Filter EKF) se koristi za dobijanje parametara. Takođe, poznate su i varijacije ovih algoritama, a jedna od najpoznatijih je rekurzivna metoda najmanjih kvadrata RLSE.

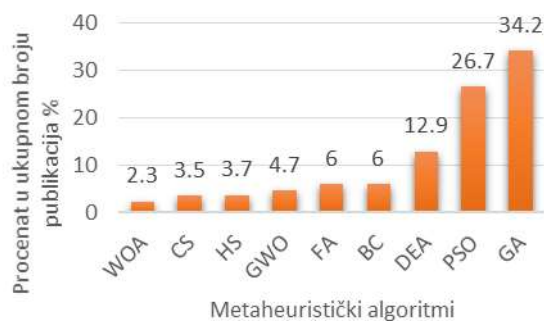
4.2. Metaheurističke metode obučavanja

Prilikom korišćenja nekog od gradijentnih algoritama postoji rizik od zaglavlivanja u lokalnom minimumu i upravo ovo je otvorilo put metaheurističkim algoritmima [4]. Opsežan pregled novije literature pokazuje da su metaheuristički algoritmi daleko zastupljeniji od gradijentnih i da njihov broj i dalje raste, Slika 3. U najpoznatije i najčešće korišćene spadaju genetski algoritam (eng. Genetic Algorithm GA) i optimizacija rojem čestica (eng. Particle Swarm Optimization PSO), kao i optimizacije po ugledu na kretanje sivih vukova (eng. Grey Wolf Optimizer, GWO) i kitova (eng. Whale Optimization Algorithm WOA), diferencijalna evolucija (eng. differential evolution DE), harmonijska pretraga (eng. harmony search HS), algoritam svitaca (eng. firefly algorithm FA), princip eksplozije mina (eng. mine blast algorithm MBA), algoritam pretrage kukavica (eng. cuckoo search CS) i algoritam kolonije pcela (eng. artificial bee colony ABC).

U [14] GA se koristi za podešavanje parametara ANFIS modela za predviđanje raspodele veličine čestica gomile blata nakon miniranja, i ovo predstavlja prvi rad takve vrste, što potvrđuje aktuelnost GA-ANFIS kombinacije. GA-ANFIS je našao primenu i u predviđanju performansi motora [15] i za podešavanje dizajna lopatice vazdušne turbine [16]. Kako je GA veoma rasprostranjen algoritam, u cilju unapređenja pojavile su se i mnoge njegove modifikacije. Uglavnom su sve našle primenu i u optimizaciji ANFIS parametara. PSO ima istu efikasnost u pronalaženju globalnog optimalnog rešenja kao GA, ali je dosta manje računarski zahtevan.

Njegova prednost se pre svega ogleda u malom broju parametara za podešavanje i u potencijalnoj kombinaciji sa nekim drugim metaheurističkim algoritmima za dobijanje novih prilaza, npr. uparivanjem sa GA optimizovan je ANFIS upravljačkog sistema za dobijanje željene brzine u motoru jednosmerne struje [17]. U [18] autori su optimizovali

parametre funkcije pripadnosti za pronalaženje optimalnog pravila i tako smanjili vreme potrebno za pokretanje algoritma. Jedna poznatija varijanta PSO je kvantum PSO (eng. Quantum behaved Particle Swarm Optimization – QPSO) [19]. Dalje, ANFIS je kombinovan sa DE algoritmom za uklanjanje artefakta iz EEG signala [20] i sa FA algoritmom u cilju upravljanja brzina motora [21]. Karabodža je 2005. godine razvio i koristio ABC algoritam za određivanje ANFIS parametara [22]. Naknadno, ovaj algoritam je poboljšan, uvođenjem adaptivnog algoritma AABC čime su dobijeni još bolji rezultati. Pored nabrojanih, ostali metaheuristički algoritmi su takođe našli primenu u kombinaciji sa ANFIS-om: GWO za procenu nosivosti [23] i WOA za sečenje laserom [24]. Najnovija istraživanja odnose se na model zasnovan na kombinaciji mBA-ANFIS (eng. mutation-based Bees Algorithm) za predviđanje i prognozu potvrđenih slučajeva COVID-19 [25].

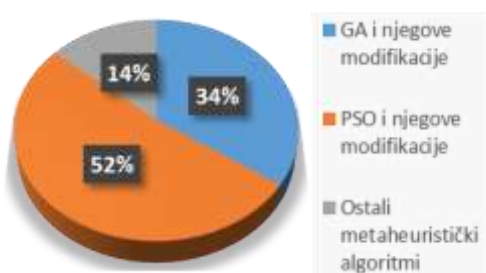


Slika 3 - Procenat broja radova na KOBSON-u kada se za ključne reči unesu ANFIS i dati metaheuristički algoritmi

4.3. Hibridne metode obučavanja

Korišćenjem prednosti gradijentnih i metaheurističkih algoritama, hibridne metode uglavnom daju bolje rezultate. Uočeno je da GA i PSO imaju važno mesto i u hibridnim algoritmima. Nasuprot tome algoritmi ABC, HS, FA, MBA i veštački imulonološki sistem (eng. Artificial Immune System AIS) nikada nisu korišćeni u hibridnom algoritmu do danas. Nove studije su potrebne da bi se sagledao uticaj drugih metaheurističkih algoritama. U hibridnim algoritmima metaheuristički prilaz se koristi za obuku parametara premise, a gradijentni u obučavanju linearnih parametara zaključka, jer se time eliminiše problem zaglavlivanja u lokalnom minimumu i poboljšavaju se performanse sistema. Kombinacija kojom se dobija ANFIS obučan hibridnim metodama može biti mnogo. Bilo koja od gradijentnih metoda se može kombinovati sa bilo kojom metaheurističkom. Rad [4] daje dobar pregled iz ove oblasti do 2016. godine, a rad [13] do 2018, pa će se ovde navesti samo novija dostignuća, gde se primećuje smanjen broj hibridnih modela

ANFIS–a i porast čisto metaheurističkih (druge grupe). Jedna od već postojećih kombinacija koje predlaže literatura je GA i dekompozicija singularnih vrednosti (eng. singular value decomposition SVD) [26]. Kombinacija GA/SVD je verovatno najviše korišćena u literaturi, a sigurno je najstarija. S druge strane, PSO/LSE metod je primenjen za identifikaciju nelinearnog sistema [27], a CS/LSE za navigaciju više mobilnih robota [28]. Za pronalaženje radova korišćena je SCOPUS baza. U polju pretrage, ANFIS i ostali pojedinačni metaheuristički algoritmi optimizacije su birani za ključne reči. Takođe, korišćen je Google Scholar, Slika 4.



Slika 4 - Odnos zastupljenosti metaheurističkih algoritama u hibridnim ANFIS strukturama

U grupi optimizacionih algoritama nalaze se i neki novi algoritmi optimizacije, bazirani na kretanju trupa gorila (eng. gorilla troupe optimizer GTO) i afričkih lešinara (eng. African vultures optimizer AVOA). Kako još nema radova na ovu temu, bilo bi interesantno videti poređenje standardnog i ANFIS–a optimizovanog sa ovim novim metaheurističkim prilazom.

4.4. Optimizacija baze pravila

Ukupan broj pravila i njihovi linearni koeficijenti povećavaju se kako se povećava broj ulaza i funkcija pripadnosti, što nameće potrebu optimizacije baze pravila. Postoji jako malo radova na ovu temu [4] jer optimizacija baze pravila nije intuitivno lak zadatak, a programerski je dosta zahtevniji od optimizacije parametara. Neki autori su dokazali da se na ovaj način dobija visoka preciznost [18]. Treba voditi računa o tome da najbolja optimizacija po jednom kriterijumu ne mora to biti po nekom drugom. U novijoj literaturi postoji određen broj radova koji se bavio ovim pitanjem. Jedan od istaknutih jeste [29] gde je korišćen FA algoritam, na već potvrđenom ANFIS modelu, za tri različita uslova optimizacije baze pravila.

5. IDENTIFIKACIJA I UPRAVLJANJE

Različite pretpostavke usvojene tokom analize sistema često dovode do nedovoljno tačnog matematičkog modela. ANFIS može imati veliku ulogu u identifikaciji najuticajnijih parametara nekog procesa, a efikasnost ANFIS–a dokazana je i potvrđena i za nelinearne i nestabilne sisteme kao što su translatorno

i rotaciono obrnuto klatno [30]. Dobijeni rezultati pokazuju zadovoljavajući učinak ANFIS modela u radnom opsegu na kome je obučavan, dok je manje odstupanje vidljivo izvan njega. Istraživanje [31] pokazuje primenu u prepoznavanju govora u svrhu upravljanja robota. ANFIS, pored identifikacije, takođe može biti iskorišćen za rešavanje široke klase problema u oblasti upravljanja. Npr. može obezbediti podešavanje PID parametara [32], gde ANFIS daje superiorne rezultate u smislu implementacije, efikasnosti izračunavanja, stabilne konvergencije i robusnosti. Pregled primene upravljanja induktivnih motora ANFIS–om dat je u [33]. U literaturi se mogu naći radovi gde ANFIS zamenjuje neki konvencionalni upravljački sistem u upravljanju obrnutog rotacionog klatna, za translatorno (gde su dobijene performanse nadmašile standardni fazi US Sugeno tipa) i za rotaciono (gde je ANFIS upravljanje nadmašilo standardni LQR) [34]. Kao multifunkcionalne programabilne mašine koje su u stanju da obavljaju čitav spektar kompleksnih zadataka, inteligentni roboti i njihovo kretanje česta su tema radova. ANFIS se koristi na sistemima adaptivnih tempomata, jer smanjuje potrošnju energije vozila i poboljšava efikasnost uz prilagođavanje različitim uslovima puta. Za obučavanje se uglavnom ulazimaju udaljenosti od prepreke kao ulazne veličine, a kao izlaz ugao upravljanja (eng. steering angle) [28], [35]. Podešavanjem parametara funkcija pripadnosti robot ostvaruje kretanje uz malo odstupanje od kretanja dobijenog simulacijom rada robota. Simulacije i eksperiment su pokazali dobro slaganje [28] uz obezbeđivanje minimalne greške. Prikupljanje obučavajućih podataka uglavnom se vrši pokretanjem programa koji je napravljen u Arduino softveru [35]. U radovima je, pored klasičnog, korišćena i optimizacija ANFIS–a npr. pretragom kukavica za navigaciju više mobilnih robota CS-ANFIS [36]. Ovakva konfiguracija ima za cilj da projektuje i implementira MANFIS u polju pokretnih prepreka, jednakih ili manjih brzina od robota. Još jedan rad [37], gde je za izlaz uzeta brzina (linearna i ugaona), a kao jedan od ulaza zakrivljenost puta koristi kaskadno fazi + ANFIS upravljanje. Bilo bi interesantno videti primenu ANFIS–a na primeru ležajeva, kao u [38], gde je prikazana primena fazi–neuronskih mreža u proceni troškova reciklaže.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je dato opsežno istraživanje i prikaz stanja u oblasti ANFIS sistema zaključivanja. Kao rezultat, u radu se može naći: poređenje fazi sistema i neuronskih mreža; različite vrste neuronskih mreža predstavljene fazi parametrima; prednosti i mane ANFIS–a; arhitektura i model ANFIS mreže; algoritam učenja, metode obučavanja i njihova zastupljenost;

oblasti primene i poseban osvrt na mašinstvo, motor jednosmerne struje, klatno i robote; smernice za dalji rad u oblasti fazi neuronskih mreža.

Oblasti u kojima se preporučuje primena ANFIS–a su: identifikacija; problemi koji uključuju nejasne atribute ili opisne metode (npr. kod podešavanja parametara upravljačkog sistema); složene, loše uslovljene ili multivarijabilne sisteme (matematičko klatno); nepoznati ili izrazito nelinearni modeli sistema izloženi spoljašnjim poremećajima (kretanje robota u prostoru); problemi koji uključuju fizičke zavisnosti koje su poznate ali toliko kompleksne da je projektovanje klasičnog upravljanja gotovo nemoguće.

Nakon što se utvrdi da je ANFIS tehnika odgovarajuće rešenje za dati problem, potrebno je pridržavati se nekih osnovnih smernica kako bi se dobili najpouzdaniji rezultati. Prva smernica o kojoj se diskutuje u svim radovima jeste skup podataka za obuku i validaciju.

Veoma je bitno pravilno izvršiti odabir odgovarajućih ulaznih veličina, pre svega da bi se izbegao gubitak važnih informacija o sistemu koji se modeluje/upravlja. Takođe, previše ulaznih veličina može negativno uticati na mogućnosti generalizacije modela. Nakon odabira ulaznih veličina sledi izbor odgovarajućeg broja i vrsta funkcija pripadnosti, podela podataka na obučavajući, validacioni i skup za testiranje.

Na kraju se razmatra odabir najboljeg algoritma optimizacije ili se radi više njih, pa se vrši poređenje. Pravljenje kompromisa između sofisticirane tehnike koja je sposobna da precizno predvidi rezultate i generalizuje ih na skup podataka za koje nije obučavana i opasnosti od njene kompleksnosti i izostavljanja suštinskih informacija se obično postiže znanjem i iskustvom čoveka.

Kako su potrebe industrije danas praćene savremenim generacijama digitalizovanih fabrika, veštačka inteligencija i mašinsko učenje se optimizuju pre svega za potrebe razumevanja interpretacije fizičkog okruženja, i humanoidnog faktora.

Na kraju istraživanja, donosi se zaključak da je primena pomenute tehnike izuzetno uspešna u rešavanju različitih složenih problema, a ujedno je i od posebnog značaja za mašinstvo i modernu Industriju 4.0.

7. ZAHVALNICA

Ovde prikazani rezultati su rezultat istraživanja podrzanog od strane MPNTR RS po Ugovoru 451-03-68/2022-14/200105 od dana 04. 02. 2022, TR 35004, kao i na projektu VI – MISSION4.0 (evidencioni broj: 6523109) koji je finansijski podržan od strane Fonda za nauku Republike Srbije, 2020.

LITERATURA

- [1] J. S. Jang, ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, t. 23, br. 3, pp. 665-685, 1993.
- [2] R. Jovanović, *Fazi logika, modelovanje i upravljanje*, Beograd, Mašinski fakultet, Univerziteta u Beogradu, 2020.
- [3] R. Ž. Jovanović i I. O. Božić, Feedforward neural network and ANFIS-based approaches to forecasting the off-cam energy characteristics of Kaplan turbine, *Neural Computing and Application*, t. 30, br. 8, pp. 2569-2579, 2018.
- [4] M. N. M. Salleh i K. Hussain, A Review of Training Methods of ANFIS for Applications in Business and Economics, *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*, t. 9, br. 7, pp. 165-172, 2016.
- [5] M. A. Adebawale, K. T. Lwin, E. Sánchez i M. A. Hossain, Intelligent Web-Phishing Detection and Protection Scheme using integrated Features of Images, Frames and Text, *Expert Systems With Applications*, t. 115, pp. 300-313, 2018.
- [6] H. Atmaca, B. Cetisli i H. S. Yavuz, The comparison of fuzzy inference systems and neural network approaches with ANFIS method for fuel consumption data, u Second international conference on electrical and electronics engineering papers *ELECO*, Vol. 6, pp. 1-4, 2001.
- [7] A. Mosavi, M. Salimi, S. F. Ardabili, T. Rabczuk, S. Shamshirband i A. R. Varkonyi-Koczy, State of the art of machine learning models in energy systems, a systematic review, *Energies*, t. 12, br. 7, p. 1301, 2019.
- [8] S. Nosratabadi, S. Ardabili, Z. Lakner, C. Mako i A. Mosavi, Prediction of Food Production Using Machine Learning Algorithms of Multilayer Perceptron and ANFIS, *Agriculture*, t. 11, br. 5, p. 408, 2021.
- [9] S. O. Sada i S. C. Ikpeseni, Evaluation of ANN and ANFIS modeling ability in the prediction of AISI 1050 steel machining performance, *Heliyon*, t. 7, br. 2, p. e06136, 2021.
- [10] R. T. G. del Cerro, M. S. Subathra, N. M. Kumar, S. Verrastro i S. T. Thomas, Modelling the daily reference evapotranspiration in semi-arid region of South India: A case study comparing ANFIS and empirical models, *Information Processing in Agriculture*, t. 8, br. 1, pp. 173-184, 2021.
- [11] D. Petković, Ž. Čojbašić i V. Nikolić, Adaptive neuro-fuzzy approach for wind turbine power coefficient estimation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 28, pp. 191-195, 2013.

- [12]D. V. Lukichev, G. L. Demidova, A. Y. Kuzin i A. V. Saushev, Application of adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) controller in servodrive with multi-mass object, *25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED)*, IEE, pp. 1-6, 2018.
- [13]D. Karaboga i E. Kaya, Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey, *Artificial Intelligence Review*, t. 52, br. 4, pp. 2263-2293, 2019.
- [14]J. Zhou, C. Li, A. A. Arslan, M. Hasanipanah i H. B. Amnieh, Performance evaluation of hybrid FFA-ANFIS and GA-ANFIS models to predict particle size distribution of a muck-pile after blasting, *Engineering with computers*, t. 37, br. 1, pp. 265-274, 2021.
- [15]A. A. Rai, P. S. Pai i S. B. Rao, Prediction models for performance and emissions of a dual fuel CI engine using ANFIS, *Sadhana*, t. 40, br. 2, pp. 515-535, 215.
- [16]A. Mahrooghi i E. Lakzian, Optimization of Wells turbine performance using a hybrid artificial neural fuzzy inference system (ANFIS)-Genetic algorithm (GA), *Ocean Engineering*, t. 108861, p. 226, 2021.
- [17]K. Premkumar i B. V. Manikandan, GA-PSO optimized online ANFIS based speed controller for Brushless DC motor, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, t. 28, br. 6, pp. 2839-2850, 2015.
- [18]D. P. Rini, S. M. Shamsuddin i S. S. Yuhaniz, Balanced the Trade-offs problem of ANFIS Using Particle Swarm Optimisation, *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, t. 11, br. 3, pp. 611-616, 2013.
- [19]M. S. Alajmi i A. M. Almeshal, Prediction and Optimization of Surface Roughness in a Turning Process Using the ANFIS-QPSO Method, *Materials*, t. 13, p. 2986, 2020.
- [20]F. S. Sheniha, S. S. Priyadharsini i S. E. Rajan, Removal of artifact from EEG signal using differential evolution algorithm, u *International Conference on Communication and Signal Processing*, 2013.
- [21]K. Prathibanandhi i R. Ramesh, Hybrid control technique for minimizing the torque ripple of brushless direct current motor, *Meas. Control* (United Kingdom), t. 51, br. 7-8, p. 321-335, 2018.
- [22]D. Karaboga i E. Kaya, Training ANFIS by using the artificial bee colony algorithm, *Turk J Electr Eng*, t. 25, br. 3, p. 1669-1679, 2017.
- [23]A. Dehghanbanadaki, M. Khari, S. T. Amiri i D. J. Armaghani, Estimation of ultimate bearing capacity of driven piles in c- ϕ soil using MLP-GWO and ANFIS-GWO models: a comparative study, *Soft Computing*, t. 25, br. 5, pp. 4103-4119, 2021.
- [24]D. Rajamani, M. S. Kumar, E. Balasubramanian i A. Tamilarasan, Nd: YAG laser cutting of Hastelloy C276: ANFIS modeling and optimization through WOA, *Materials and Manufacturing Processes*, pp. 1-15, 2021.
- [25]S. Saif, P. Das i S. Biswas, A Hybrid Model based on mBA-ANFIS for COVID-19 Confirmed Cases Prediction and Forecast, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, pp. 1-14, 2021.
- [26]H. Bonakdari, I. Ebtehaj, A. Mosav, S. H. A. Talesh i B. Gharabaghi, Hybrid Model of Singular Value Decomposition, ANFIS and Genetic Algorithm for Prediction of Sediment Transport in Sewers, 10.20944/preprints202001.0312.v1, 2020.
- [27]C.-Y. Chen i Y.-J. Lin, Development of a data-driven ANFIS model by using PSO-LSE method for non-linear system identification, *Intelligent Automation and Soft Computing*, t. 25, br. 2, pp. 319-327, 2019.
- [28]P. K. Mohanty i D. R. Parhi, A new hybrid optimization algorithm for multiple mobile robots navigation based on the CS-ANFIS approach, *Memetic Computing*, t. 7, br. 4, pp. 255-273, 2015.
- [29]S. Z. Abghari, Sensitivity Analysis and Development of a Set of Rules to Operate FCC Process by Application of a Hybrid Model of ANFIS and Firefly Algorithm, *Journal of Petroleum Science and Technology*, t. 9, br. 33, pp. 10-26, 2019.
- [30]I. Chawla i A. Singla, ANFIS based system identification of underactuated systems, ANFIS based system identification of underactuated systems, t. 21, br. 7-8, pp. 649-660, 2020.
- [31]M. W. Sanjaya, D. Anggraeni i I. Purna, Speech recognition using linear predictive coding (LPC) and adaptive neuro-fuzzy (ANFIS) to control 5 DoF arm robot, *Journal of Physics: Conference Series*, t. 1090, br. 1, p. 012046, IOP Publishing, 2018.
- [32]K. Premkumar i B. V. Manikandan, Stability and performance analysis of ANFIS tuned PID based speed controller for brushless DC motor, *Current Signal Transduction Therapy*, t. 13, br. 1, pp. 19-30, 2018..
- [33]M. K. Masood, W. P. Hew i N. A. Rahim, Review of ANFIS-based control of induction motors, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, t. 23, br. 4, pp. 143-158, 2012.
- [34]M. A. Al-Mekhlafi, H. Wahid i A. A. Aziz, Adaptive Neuro-Fuzzy Control Approach for a Single Inverted Pendulum System, *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, t. 8, br. 5, pp. 3657-3665, 2018.

- [35]M. S. Gharajeh i H. B. Jond, An intelligent approach for autonomous mobile robots path planning based on adaptive neuro-fuzzy inference system, *Ain Shams Engineering Journal*, t. 13, br. 1, p. 101491, 2021.
- [36]A. Pandey, A. K. Kashyap, D. R. Parhi i B. K. Patle, Autonomous mobile robot navigation between static and dynamic obstacles using multiple ANFIS architecture, *World Journal of Engineering*, 2019.
- [37]M. Imen, M. Mansouri i M. A. Shoorehdeli, Tracking control of mobile robot using ANFIS, u *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2011.
- [38]V. V. Todić, I. P. Ćosić, Z. M. Tešić, B. B. Lalić, N. Z. Tasić, Assessing the Recycling Costs in the Product Development Phase, *Tehnika*, Special Edition, ISSN 0040 – 2176, pp. 105-112, 2017.

SUMMARY

ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEMS IN IDENTIFICATION, MODELING AND CONTROL – THE STATE-OF-THE-ART

Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems ANFIS have an increasing tendency to be used in scientific research and practical applications. The digitization of production and the emergence of Industry 4.0 enabled the development of this trend, primarily due to the ability to adapt to the task by integrating artificial neural networks and fuzzy logic, which can potentially use the advantages of both techniques in unique frameworks. This approach facilitated the modeling, data analysis, classification and control processes. The advantage of the ANFIS, compared to conventional methods, is reflected in the ability to predict the output based on a set of inputs and on the rule base. Also, these systems are suitable, because they provide the possibility to adjust the parameters of the control system. This paper presents the structure of the ANFIS system and gives a detailed review of the achievements so far, through a comparative analysis, where some possible spheres of interdisciplinary application are highlighted. Possibilities for variations, improvements and innovations of the algorithm, as well as reducing the complexity of the network architecture itself, are discussed. Proposals for some new, as yet unused combinations with metaheuristic optimization methods are presented. Finally, important guidelines are provided on when and where it is useful to apply ANFIS systems.

Key Words: ANFIS, adaptive systems, fuzzy logic and control, neural networks, optimization