

**PRIMENA MAŠINSKOG UČENJA U ANALIZI RELEJNE ZAŠTITE PRI STARTU ASINHRONIH MOTORA****APPLICATION OF MACHINE LEARNING IN RELAY PROTECTION DURING THE START OF ASYNCHRONOUS MACHINES**Milorad Maksimović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U radu se razmatra primena mašinskog učenja u analizi sigurnosti relejne zaštite pri startu asinhronih motora. Cilj je da se prikažu prednosti i različite pogodnosti primene ovakve vrste analize u odnosu na standardne proračune pri startu asinhronih motora. Razmatranja su izvršena na velikom broju različitih topoloških struktura u cilju dobijanja što preciznijeg modela predviđanja.

**Ključne reči:** mašinsko učenje, sigurnost relejne zaštite, asinhroni motori, mašinsko učenje

**Abstract** – This paper deals with application of machine learning in relay protection during the start of asynchronous machines. The goal is to show advantages and different benefits of this type of analysis in regards to standard calculations during the motor start. Considerations have been made on a large number of different topologies in order to achieve the most accurate prediction model.

**Keywords:** machine learning, relay protection safety, asynchronous machines, machine learning

**1. UVOD**

U ovom radu razmatra se realizacija algoritma metoda potpornih vektora u analizi sigurnosti relejne zaštite pri startu asinhronih motora. Sigurnost predstavlja zahtev da se zaštitom ne deluje kada ne treba (nekorektno delovanje pri normalnim pogonskim uslovima) [1]. Pokretanje velikih asinhronih motora može da izazove ozbiljne probleme u radu samog motora, ali i ostalih već priključenih motora kao i bilo kog potrošača u blizini priključenja motora, usled prvenstveno propada napona u čvorovima lokalne mreže.

Uobičajena situacija jeste da motor krene u start bez problema, ali onda odreaguje relejna zaštita i isključi motor od sistema pre nego što postigne punu brzinu. Relejna zaštita ne bi trebala da odreaguje u ovakvim situacijama, jer se start asinhronog motora ubraja u normalno pogonsko stanje. Sa razvojem brzih i efikasnih algoritama, kao i modela zasnovanih na analizi podataka koji omogućavaju obradu u realnom vremenu, mašinsko učenje je u stanju da analizira velike količine podataka i na osnovu njih izvrši tačna i precizna predviđanja. Ovo je obrađeno u drugom delu rada.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Duško Bekut, redovni profesor.

U trećem delu obrađena je problematika pokretanja motora, a u četvrtom je ispitano i primenjeno formiranje modela predviđanja sigurnosti relejne zaštite, zasnovanog na prethodno opisanim mehanizmima veštačke inteligencije. U poslednjim delovima rada izneseni su zaključak i prednosti ovakvog vida analize kvaliteta relejne zaštite, kao i literatura korišćena za izradu ovog rada.

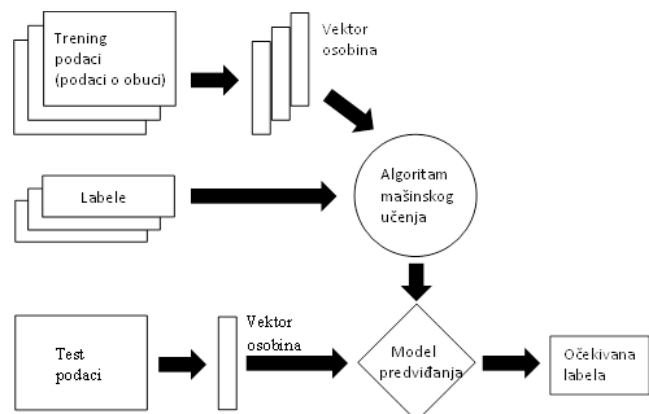
**2. MAŠINSKO UČENJE – ALGORITAM METODA POTPORNIH VEKTORA**

Mašinsko učenje, ili kako se još naziva automatizovano učenje, je posebna podoblast nauke informacionih tehnologija. Naziv „mašinsko učenje“ odnosi se na automatizovano uočavanje smislenih obrazaca u velikom skupu podataka. Razvijena iz raznih studija o prepoznavanju obrazaca i računarske teorije učenja u veštačkoj inteligenciji, mašinsko učenje predstavlja posebnu granu koja se bavi otkrivanjem i razvijanjem algoritama koji mogu da uče i izvode pretpostavke na osnovu ulaznih podataka. Jednu od definicija mašinskog učenja je dao *Arthur Samuel*, naučnik koji je i skovao termin „mašinsko učenje“. Ona glasi: „Mašinsko učenje daje računarima sposobnost učenja bez njihovog eksplicitnog programiranja“ [2].

Danas postoji veliki broj razvijenih algoritama mašinskog učenja. Razlikuju se 3 vrste algoritama prema načinu učenja:

- 1) nadgledano učenje,
- 2) nenadgledano učenje,
- 3) polu-nadgledano učenje.

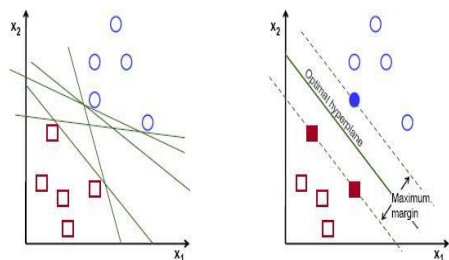
Na slici 2.1 je prikazan princip nadgledanog učenja.



Slika 2.1 – Princip nadgledanog učenja

Algoritam metoda potpornih vektora (engl. *Support vector machines*) [3] predstavlja jedan od najpoznatijih i najčešće korišćenih algoritama mašinskog učenja, zbog brojnih prednosti koje ima u odnosu na druge algoritme. Osnovni cilj metoda potpornih vektora jeste pronalaženje funkcije koja aproksimira odnos između ulaznih i izlaznih podataka, tj. formiranje hiper-ravni razdvajanja između klasa objekata. Metode potpornih vektora predstavljaju binarni klasifikator, koji dodeljuje objekte nekoj od klasa.

Na slici 2.2 prikazane su razne mogućnosti izbora hiper-ravni razdvajanja, kao i optimalna hiper-ravan.



Slika 2.2 – Mogućnosti izbora hiper-ravni razdvajanja i optimalna hiper-ravan [4]

### 3. ASINHRONI MOTORI – POKRETANJE

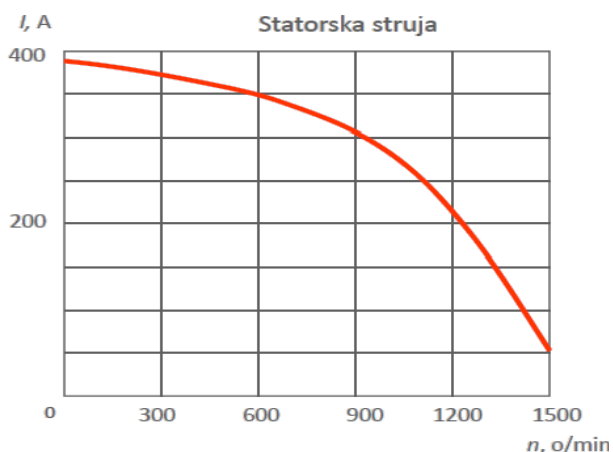
U ovom poglavlju predstavljene su tehnike pokretanja asinhronog motora razmazrane u ovom radu. To su neke od najčešće primjenjivanih tehnika pokretanja asinhronih motora i u njih spadaju:

- 1) pokretanje direktnim priključenjem na mrežu,
- 2) pokretanje zvezda-trougao preklopkom,
- 3) pokretanje preko autotransformatora.

Sve tehnike pokretanja se svode na to da se izvrši uspješan zalet motora i pogona uz što manje struje zaleta i što kraće trajanje zaleta. Uticaj na mrežu mora biti u prihvatljivim granicama dozvoljenog pada napona izazvanog strujom polaska motora.

#### 3.1 POKRETANJE DIREKTNIM PRIKLJUČENJEM NA MREŽU

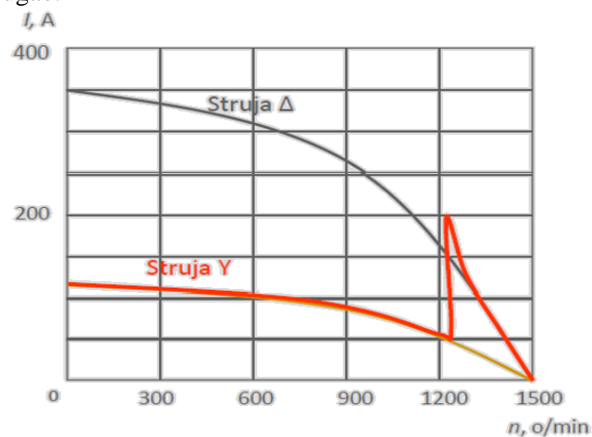
Pokretanje asinhronog motora direktnim priključenjem na mrežu je najjednostavniji i najjeftiniji način pokretanja, ali je praćen najvećim polaznim strujama motora. Na slici 3.1 je prikazana statorska struja pri startu asinhronog motora.



Slika 3.1 – Statorska struja asinhronog motora pri direktnom priključenju na mrežu

#### 3.2 Pokretanje zvezda – trougao preklopkom

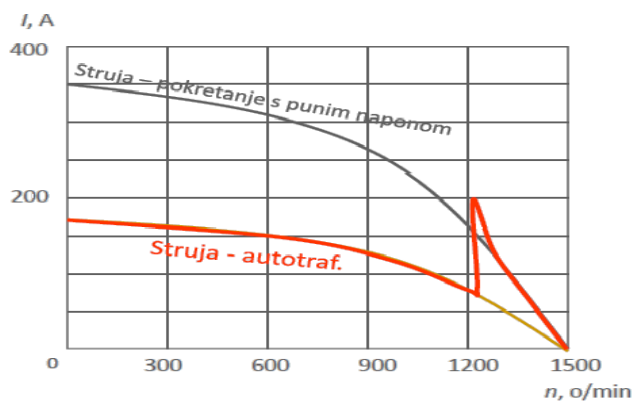
Kavezni asinhroni motor za trajan rad u vezi trougao ( $\Delta$ ), pri pokretanju se veže u zvezdu (Y). Napon po faznom namotaju je  $\sqrt{3}$  puta manji pa kroz namotaj teče  $\sqrt{3}$  puta manja struja, a struja iz mreže je još  $\sqrt{3}$  puta manja jer se iz jednog faznog voda napaja samo jedan namotaj. U spoju Y iz mreže se povlači 1/3 polazne struje u spoju  $\Delta$ . Kada se obavi zalet u zvezdi, motor se spoji u vezu trougao.



Slika 3.2 – Statorska struja asinhronog motora pri startu zvezda-trougao preklopkom

#### 3.3 POKRETANJE ASINHRONOG MOTORA PREKO AUTOTRANSFORMATORA

Pri pokretanju asinhronog motora preko autotransformatora zatvoreni su prekidači koji statorske namotaje povezuju sa mrežom preko autotransformatora, dok su u normalnom pogonu zatvoreni prekidači koji direktno povezuju statorske namotaje sa mrežom.



Slika 3.3 – Statorska struja asinhronog motora pri startu preko autotransformatora

### 4. PRIMENA ALGORITMA U ANALIZI RELEJNE ZAŠTITE

U ovom poglavlju biće predstavljena mogućnost primene algoritma metoda potpornih vektora na određivanje sigurnosti relejne zaštite pri startu asinhronih motora. Opisana je primena algoritma na primerima pokretanja asinhronog motora direktnim priključenjem, zvezda-trougao preklopkom i pomoću autotransformatora. Kao što je već rečeno, pokretanje asinhronog motora je normalno pogonsko stanje sistema i relejna zaštita bi trebala radi pouzdanosti i sigurnosti u takvim uslovima rada.

U standardnim tehnikama učenja, „učeniku“ (algoritmu) je potrebno obezbediti/definirati proizvoljan skup  $X$ , koji predstavlja skup ulaznih objekata u algoritam kojima je potrebno dodeliti odgovarajuću labelu. Ovaj skup se naziva domenski skup, a elementi skupa se nazivaju instance (objekti). U ovom slučaju, skup  $X$  predstavlja skup raznih topologija mreže sa priključenim asinhronim motorom. Cilj je na osnovu ulazne topologije odrediti kvalitet relejne zaštite na počecima izvoda na koje je priključen asinhroni motor, bez proračuna tokova snaga. Ove topologije su predstavljene vektorom obeležja  $O$ . Ovaj vektor sadrži podatke o snazi asinhronog motora, nominalnom naponu motora, udaljenosti mesta priključenja asinhronog motora od relejne zaštite na početku izvoda i tipu starta asinhronog motora.

Stoga, vektor obeležja se zapisuje na sledeći način:

$$O = [S_{AM}, V_n, Z_{thev}, \alpha_s], \quad (4.1)$$

gde su:

- $S_{AM}$  – snaga asinhronog motora,
- $V_n$  – nominalni napon asinhronog motora,
- $Z_{thev}$  – vrednost Tevenenove impedanse sa mesta priključenja asinhronog motora,
- $\alpha_s$  – tip starta (direktno, zvezda-trougao, autotransformator).

Važno je primetiti da ovaj vektor ne sadrži podatke o vrednostima struja kroz prekidače na počecima izvoda, što je i bio cilj.

S obzirom da se radi o nadgledanom učenju, poznati su željeni rezultati algoritma. Druga bitna stvar koju je potrebno definisati je skup labela  $Y$ . Taj skup, u ovom slučaju će sadržati samo dva elementa i to:

$$Y \in \left\{ \begin{array}{l} -1, \text{ loša sigurnost zaštite} \\ +1, \text{ dobra sigurnost zaštite} \end{array} \right\}, \quad (4.2)$$

Važno je kao mogući rezultat imati skup od dva elementa, jer je zadatak algoritma mašinskog učenja da kreira binarni klasifikator sposoban da odgovori na pitanje pripadnosti određene topologije nekoj od klasa (-1 ili +1).

Da bi se efikasno primenio algoritam metoda potpornih vektora, potrebno je formirati ulazni skup obučavajućih podataka. U ovom slučaju, formira se sledeći skup:

$$S = (x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m), \quad (4.3)$$

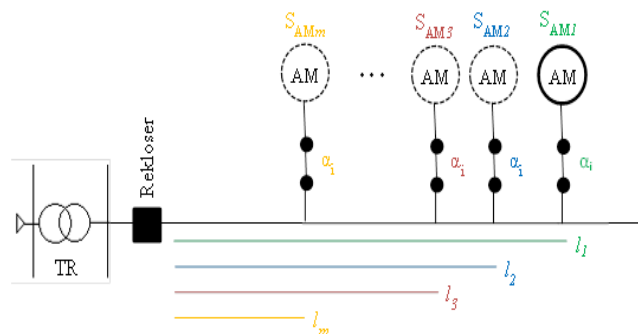
gde su:

- $S$  – skup podataka o obuci,
- $x_i$  –  $i$ -ta topologija,
- $y_i$  –  $i$ -ta labela za datu topologiju,
- $m$  – broj obrađenih topologija sa poznatim labelama.

Dakle, trening skup sadrži uređene parove topologija-labela. Formira se premeštanjem asinhronog motora kroz čvorove na određenom izvodu, dobijajući tako uvek novu topološku strukturu mreže. Takođe, pored ove promene obeležja  $l$ , ujedno je moguće menjati snagu i napon priključenog asinhronog motora, kao i tip starta motora, i tako dobiti raznovrstan skup podataka za obuku.

Na slici 4.1 šematski je prikazana mogućnost izbora različitih topologija, priključivanjem asinhronog motora u bilo koji čvor na datom izvodu (bilo koji asinhroni motor je nacrtan isprekidanom linijom). Sa  $S_{AMi}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )

su označene različite snage asinhronog motora, a sa  $l_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) su označene različite udaljenosti asinhronog motora od relejne zaštite na početku izvoda. Sa  $\alpha_i$  ( $i$ =direktno, zvezda-trougao, autotransformator) je označen tip priključenja i pokretanja asinhronog motora.



Slika 4.1 – Primeri različitih topoloških struktura korišćenih prilikom obučavanja

Drugi deo uređenih parova, labele, dobijaju se klasičnim postupcima za određivanje kvaliteta relejne zaštite pri startu asinhronih motora. Ti postupci podrazumevaju simulaciju tokova snaga i poređenje struje kroz zaštitnu opremu na početku izvoda i podešenja relejne zaštite, za svaku topologiju iz obučavajućeg skupa.

Ovaj postupak se ponovi za svaku topologiju iz obučavajućeg skupa i na osnovu pomenutih poređenja se dolazi do korektnih labela za poznate topologije.

Na taj način je formiran skup podataka o obuci, i ovi skupovi predstavljaju ključne podatke za algoritam. Od algoritma se zahteva da na osnovu njih kreira model predviđanja, ili funkciju klasifikacije  $f: X \rightarrow Y$ , koja će biti korišćena svaki sledeći put kada kao ulaz u algoritam dođe nepoznata topologija.

Dobro istreniran algoritam će kreirati kvalitetan model predviđanja koji ima mogućnost da gotovo trenutno prilikom priključenja asinhronog motora na mrežu pruži informaciju o kvalitetu relejne zaštite na početku izvoda, klasifikujući do tad neviđenu topologiju u jednu od klasa (dobra ili loša sigurnost).

Time se željeni rezultat dobija bez dugotrajnog i komplikovanog proračuna tokova snaga, uz veliku uštedu kako vremena, tako i hardverskih i softverskih resursa.

U nastavku rada će biti predstavljeni rezultati simulacije formiranog modela predviđanja kvaliteta relejne zaštite pri startu asinhronih motora.

Obučavanje algoritma, formiranje modela predviđanja i klasifikacija novih ulaznih topologija je izvršena koristeći programski paket MATLAB.

Skup obučavajućih podataka (izraz 4.3) je formiran na već opisan način, i ima sledeći oblik:

$$X_i(a,b,c,d) = \left\{ \begin{array}{l} (0.5,10,0.90673,1), (0.5,10,0.90673,2), \\ (0.5,10,0.90673,3), (1,10,0.90673,1), (1,10,0.90673,2), \\ (1,10,0.90673,3), (1.5,10,0.90673,1), (1.5,10,0.90673,2), \\ (1.5,10,0.90673,3), (2,10,0.90673,1), (2,10,0.90673,2), \\ (2,10,0.90673,3), (2.5,10,0.90673,1), (2.5,10,0.90673,2), \\ (2.5,10,0.90673,3), (3,10,0.90673,1), (3,10,0.90673,2), \\ (3,10,0.90673,3), (3.5,10,0.90673,1), (3.5,10,0.90673,2), \\ (3.5,10,0.90673,3), (4,10,0.90673,1), (4,10,0.90673,2), \\ (4,10,0.90673,3), (4.5,10,0.90673,1), (4.5,10,0.90673,2), \\ (4.5,10,0.90673,3), (5,10,0.90673,1), (5,10,0.90673,2), \\ (5,10,0.90673,3), (0.5,10,1.00398,1), (0.5,10,1.00398,2), \\ (0.5,10,1.00398,3), (0.5,10,1.00398,1), (0.5,10,1.00398,2), \\ (0.5,10,1.00398,3), (1,10,1.00398,1), (1,10,1.00398,2), \\ (1,10,1.00398,3), (1.5,10,1.00398,1), (1.5,10,1.00398,2), \\ (1.5,10,1.00398,3), (2,10,1.00398,1), (2,10,1.00398,2), \\ (2,10,1.00398,3), (2.5,10,1.00398,1), (2.5,10,1.00398,2), \\ (2.5,10,1.00398,3), (3,10,1.00398,1), (3,10,1.00398,2), \\ (3,10,1.00398,3), (3.5,10,1.00398,1), (3.5,10,1.00398,2), \\ (3.5,10,1.00398,3), (4,10,1.00398,1), (4,10,1.00398,2), \\ (4,10,1.00398,3), (4.5,10,1.00398,1), (4.5,10,1.00398,2), \\ (4.5,10,1.00398,3), (5,10,1.00398,1), (5,10,1.00398,2), \\ (5,10,1.00398,3), (1,10,3.97122,1), (1,10,3.97122,2), \\ (1,10,3.97122,3), (2,10,3.97122,1), (2,10,3.97122,2), \\ (2,10,3.97122,3), (3,10,3.97122,1), (3,10,3.97122,2), \\ (3,10,3.97122,3), (0.5,20,2.27532,1), (0.5,20,2.27532,2), \\ (0.5,20,2.27532,3), (1,20,2.27532,1), (1,20,2.27532,2), \\ (1,20,2.27532,3), (1.5,20,2.27532,1), (1.5,20,2.27532,2), \\ (1.5,20,2.27532,3), (2,20,2.27532,1), (2,20,2.27532,2), \\ (2,20,2.27532,3), (2.5,20,2.27532,1), (2.5,20,2.27532,2), \\ (2.5,20,2.27532,3), (3,20,2.27532,1), (3,20,2.27532,2), \\ (3,20,2.27532,3), (3.5,20,2.27532,1), (3.5,20,2.27532,2), \\ (3.5,20,2.27532,3), (4,20,2.27532,1), (4,20,2.27532,2), \\ (4,20,2.27532,3), (4.5,20,2.27532,1), (4.5,20,2.27532,2), \\ (4.5,20,2.27532,3), (5,20,2.27532,1), (5,20,2.27532,2), \\ (5,20,2.27532,3), (0.5,20,2.30804,1), (0.5,20,2.30804,2), \\ (0.5,20,2.30804,3), (1,20,2.30804,1), (1,20,2.30804,2), \\ (1,20,2.30804,3), (1.5,20,2.30804,1), (1.5,20,2.30804,2), \\ (1.5,20,2.30804,3), (2,20,2.30804,1), (2,20,2.30804,2), \\ (2,20,2.30804,3), (0.5,20,2.34376,1), (0.5,20,2.34376,2), \\ (0.5,20,2.34376,3), (1,20,2.34376,1), (1,20,2.34376,2), \\ (1,20,2.34376,3), (1.5,20,2.34376,1), (1.5,20,2.34376,2), \\ (1.5,20,2.34376,3) \end{array} \right\}$$

gde su:

- $a$  – snaga asinhronog motora u [MW],
- $b$  – nominalni napon asinhronog motora u [kV],
- $c$  – ekvivalentna impedansa sa mesta priključenja motora u [ $\Omega$ ],
- $d$  – tip starta asinhronog motora (1 – direktno, 2 – zvezda-trougao, 3 – autotransformator).

Labele za ove poznate topologije su date u sledecem obliku:

$$Y_i = \left\{ \begin{array}{l} 1,1,1,1,1,1,-1,1,1,-1,1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1, \\ -1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,1,1,1,-1,1,1,-1,1,1, \\ -1,1,1,-1,1,-1,-1,1,-1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1, \\ 1,1,1,1,1,1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1, \\ -1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1, \\ -1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1, \\ -1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1 \end{array} \right\}$$

gde su:

- 1 – dobra sigurnost zaštite,
- -1 – loša sigurnost zaštite.

Kreirani model predviđanja je testiran sa novim, za njega do sada nepoznatim skupom topologija i dobijeni su rezultati prikazani u tabeli 4.1

Dodatnom verifikacijom je potvrđeno da su dobijeni rezultati korektni.

Tabela 4.1 – Rezultati kalsifikovanja nepoznatih topologija

Snaga AM [MW]	Nominalni napon AM [kV]	Ekvivalentna impedansa [ $\Omega$ ]	Tip starta	Labela
0.5	10	2.580	1	1
0.5	10	0.780	1	1
0.6	10	0.950	2	1
0.6	10	1.050	3	1
0.7	10	1.110	3	1
0.7	10	0.880	1	1
0.8	10	0.990	2	1
0.8	10	1.550	3	1
0.9	10	2.660	1	1
0.9	10	3.550	3	1
1.1	10	0.650	2	1
1.1	10	1.880	1	1
1.3	10	2.410	3	1
1.3	10	1.770	2	1
1.5	10	1.220	1	1
1.5	20	1.630	3	-1
1.5	20	5.230	2	-1
1.5	20	1.070	1	-1
1.8	20	1.550	2	-1
2.2	10	2.060	3	1
2.2	10	2.330	1	1
2.6	10	0.770	2	-1
0.6	20	3.990	3	-1
0.7	10	0.820	2	1
0.9	20	3.780	2	-1
1.2	20	0.790	1	-1
1.1	10	4.450	3	1
1.4	10	3.570	2	1
3.5	10	2.580	1	-1
5	10	0.920	1	-1

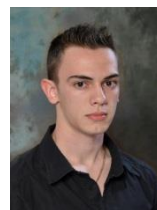
## 5. ZAKLJUČAK

U cilju smanjenja računarskog vremena potrebnog za precizne proračune režima pri startu asinhronog motora, ispitana je i primenjena mogućnost korišćenja algoritma metoda potpornih vektora, kao mehanizma za predviđanje kvaliteta sigurnosti relejne zaštite. Prednosti ovog algoritma su gotovo trenutno dobijanje informacije o kvalitetu sigurnosti relejne zaštite pri priključenju asinhronog motora, dok su nedostaci velika količina vremena potrebna za kreiranje što boljeg skupa za obuku, kao i uočavanje prave kombinacije vektora obeležja kojim bi se dobili tačni rezultati.

## 6. LITERATURA

- [1] Duško Bekut, Relejna zaštita, Fakultet Tehničkih Nauka Novi Sad, 2009.
- [2] Samuel, Arthur (1959). "Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers"
- [3] Cortes, Corinna, and Vladimir Vapnik. "Support-vector networks." Machine learning 20.3 (1995): 273-297.
- [4] [http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/ml/introduction\\_to\\_svm/introduction\\_to\\_svm.html](http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/ml/introduction_to_svm/introduction_to_svm.html)

### Kratka biografija:



**Milorad Maksimović** je rođen u Loznici 1994. godine. Osnovne studije je završio na Fakultetu tehničkih nauka 2017. godine na departmanu Elektrotehnika i računarstvo – Elektroenergetski sistemi. Master rad je odbranio 2019. godine, na istom fakultetu na smeru Energetika, elektronika i telekomunikacije – Elektroenergetski sistemi.