Broj rada: R1-14
DOI:10.46793/CIRED2026.R1-14_101

INTELIGENTNI ALAT ZA AUTOMATSKU DIGITALIZACIJU ŠEMA DISTRIBUTIVNIH POSTROJENJA

INTELLIGENT TOOL FOR AUTOMATIC DIGITIZATION OF DISTRIBUTION SUBSTATION SCHEMATICS

Vladimir BER, Schneider Electric, Republika Srbija
Slobodan VUKOJIČIĆ, Schneider Electric, Republika Srbija
Darko ĐURIČIĆ, Schneider Electric, Republika Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Geografski informacioni sistem (GIS) predstavlja jedan od ključnih izvora podataka za formiranje srednjenaponskog i niskonaponskog mrežnog modela u okviru platformi naprednog sistema upravljanja elektrodistribucijom (engl. Advanced Distribution Management System, ADMS). U praksi, deo podataka se preuzima iz kompanijskih GIS rešenja, dok značajan segment, poput jednopolnih šema distributivnih postrojenja i šema povezivanja elemenata i dalje postoji samo u papirnoj formi ili u drugim nedigitalnim formatima. Nedostatak resursa za njihovu digitalizaciju često otežava ili usporava uvođenje sistema ADMS. Ovaj problem je više puta identifikovan u realnim distributivnim kompanijama, što je dovelo do potrebe za razvojem specijalizovanog alata kojim se automatizuje proces digitalizacije i omogućava efikasniji prenos podataka u digitalni oblik. U radu se razmatra jedno takvo rešenje, uz opis njegovih ključnih karakteristika i funkcionalnosti. Alat je zasnovan na primeni metoda veštačke inteligencije (engl. Artificial Intelligence, AI), koji omogućavaju njegovu adaptaciju i kontinuirano učenje kroz interakciju sa korisnikom. Kroz konkretan primer prikazana je njegova praktična primena i benefiti, uključujući ubrzanje digitalizacije, smanjenje grešaka, eliminisanje obimnog ručnog unosa i značajno smanjenje potrebe za ljudskim resursima. Predloženo rešenje time predstavlja važan korak ka bržoj, pouzdanijoj i potpunoj integraciji sistema ADMS u savremene distributivne mreže.

Ključne reči: ADMS, automatizacija, digitalizacija, veštacka inteligencija (AI)

ABSTRACT

Geographic Information System (GIS) serves as one of key data source for building the medium and low voltage network model within Advanced Distribution Management System (ADMS) platforms. In practice, part of the data is retrieved from corporate GIS solutions, while a significant portion, such as single-line distribution schematics and device connection diagrams, still exists only in printed form, or other legacy non-digital formats. The lack of resources for their digitization often complicates or delays the implementation of ADMS systems. This issue has been repeatedly identified in real distribution companies, leading to the development of specialized tools that automate the digitization process and enable more efficient transfer of data into digital form. This paper examines one solution of that kind, describing its key features

* Vladimir Ber vladimir.ber@se.com; Slobodan Vukojičić slobodan.vukojicic@se.com; Darko Đuričić darko.djuricic@se.com

and functionalities. The tool is based on artificial intelligence (AI) methods, which allow it to adapt and continuously learn through interaction with the user. A particular example demonstrates its practical application and benefits, including accelerated digitization, reduced errors, elimination of extensive manual data entry, and a significant decrease in the need for internal resources. The proposed solution thus represents an important step toward faster, more reliable, and more complete integration of ADMS systems into modern distribution networks.

Keywords: ADMS, Artificial Intelligence (AI), Automation, Digitalization

UVOD

U savremenim elektroenergetskim sistemima, napredno upravljanje elektrodistributivnim mrežama predstavlja ključni korak ka povećanju pouzdanosti i dostupnosti električne energije. Težnja ka postizanju visoke operativne efikasnosti zahteva implementaciju savremenih softverskih platformi za napredno upravljanje (engl. Advanced Distribution Management System – ADMS) [1]. Ove platforme zahtevaju precizno poznavanje topologije mreže, odnosno, konektivnosti njenih elemenata, kao i detaljne karakteristike električne opreme.

Karakteristike pasivnih električnih elemenata i mašina, poput transformatora, definišu se prvenstveno kroz njihove električne parametre. Sa druge strane, karakteristike aktivnih elemenata koji omogućavaju rekonfiguraciju mreže (prekidači, rastavljači, itd.), obuhvataju električne parametre, ali i dinamičke karakteristike rada, uključujući vreme uključenja/isključenja i telekomunikaciona kašnjenja. Svi navedeni podaci se koriste u algoritmima za napredno upravljanje, te njihove ispravne vrednosti direktno utiču na kvalitet rezultata naprednih energetskih funkcija i proračuna [2].

Geografski informacioni sistemi (GIS) predstavljaju osnovni, a u većini slučajeva i jedini, izvor podataka za formiranje konektovanog mrežnog modela u ADMS platformama [3]. Ovaj sistem sadrži precizne trase vodova, njihove dužine i karakteristike provodnika, kao i lokacije i karakteristike aktivne i pasivne električne opreme. Međutim, detaljni modeli distributivnih postrojenja najčešće nisu implementirani u GIS, prvenstveno zbog njihove složenosti i čestih izmena koje nisu relevantne za prikaz (npr. uklopno stanje rasklopne opreme). Iz tog razloga, za elektrodistributivne mreže u GIS često se koriste pojednostavljeni modeli distributivnih postrojenja, koji omogućavaju samo osnovnu konektivnost između vodova ili pak modeli u potpunosti izostaju. U takvim slučajevima, električni model distributivnih postrojenja ne postoji u strukturiranom i mašinski čitljivom digitalnom obliku čak ni u drugim informacionim sistemima unutar distributivnih kompanija, dok su šeme povezanosti i tehnički podaci o električnoj opremi dostupni isključivo u papirnoj formi, što otežava njihovu sistematsku ekstrakciju, digitalizaciju i konverziju u odgovarajuće softverske modele. Nedostatak resursa za digitalizaciju šema distributivnih postrojenja značajno usporava uvođenje naprednih rešenja za upravljanje elektrodistributivnim mrežama.

Nepostojanje digitalizovanih modela distributivnih postrojenja u GIS identifikovano je kod klijenata širom sveta [4], odnosno u mnogim distributivnim kompanijama veliki deo tehničke dokumentacije i dalje postoji u formi papirnih ili skeniranih šema. Kao rešenje ovog problema, do sada se uglavnom koristila metoda ručnog crtanja modela direktno u softverskim alatima za napredno upravljanje elektrodistributivnim mrežama. Ovaj proces je vremenski zahtevan, zahteva kontinuirani i veliki angažman ljudskih resursa i podložan je greškama koje je teško identifikovati i ispraviti. Ovaj rad se bavi problematikom primene specijalizovanog alata za

automatsku digitalizaciju šema distributivnih postrojenja i njihov prenos iz papirnog oblika u digitalni format. Upravo zato je u ovom radu predstavljeno rešenje razvijeno sa ciljem identifikacije postupaka i rešavanja identifikovanih ograničenja a u cilju ubrzanja i unapređenja procesa digitalizacije i izrade električnih modela distributivnih postrojenja.

Razvijeni specijalizovani alat zasniva se na primeni metoda veštačke inteligencije i računarskog vida, koje se koriste za prepoznavanje oblika, konektivnosti i teksta sa slika, [5], [6]. Na ovaj način prati se savremeni trend primene veštačke inteligencije u razvoju naprednih softverskih alata i njihovoj daljoj upotrebi. Iako je primarno razvijen za digitalizaciju jednopolnih šema distributivnih postrojenja, zahvaljujući adaptivnom dizajnu, alat je primenljiv i u drugim domenima sa sličnim grafičkim strukturama. Kroz interakciju sa korisnikom, alat se dodatno obučava, čime se njegove performanse na konkretnim primerima vremenom unapređuju.

Prethodna istraživanja uglavnom se fokusiraju na metode za prepoznavanje oblika ili teksta visoke rezolucije [7], dok se razvijeni specijalizovani alat uspešno primenjuje i na slikama nižeg kvaliteta. Takođe, alat je projektovan na način koji sprečava međusobni uticaj procesâ prepoznavanja teksta i prepoznavanja oblika, što je kao potencijalni problem identifikovano u [8]. Novija istraživanja dominantno se zasnivaju na primeni metoda dubokog učenja, koje zahtevaju obimne skupove podataka i značajne resurse za obuku modela, [9]. Za razliku od takvih pristupa, u ovom radu primenjene su klasične metode prepoznavanja elemenata, koje su se u okviru definisanog problema pokazale kao brže, a pritom dovoljno precizne. Konačno, za razliku od rezultata prikazanih u [10], gde je identifikovan problem uticaja veličine simbola na tačnost prepoznavanja električnih elemenata, eksperimentalni rezultati pokazuju da ovaj problem zanemarivo utiče na performanse razvijenog specijalizovanog alata u ovom radu, čime se potvrđuje njegova robusnost i efikasnost u odnosu na varijabilnost u veličini prepoznatih oblika.

Rad je organizovan na sledeći način: u prvom poglavlju data je teorijska osnova razvoja alata, sa opisom korišćenih metoda prepoznavanja; drugo poglavlje sadrži prikaz i analizu eksperimentalnih rezultata dobijenih primenom razvijenog alata; dok je u trećem poglavlju dat zaključak rada.

1 TEORIJSKA OSNOVA

Teorijska osnova ovog rada zasniva se na primeni metoda računarskog vida i digitalne obrade slike u svrhu automatske interpretacije tehničke dokumentacije. Digitalizacija šema distributivnih postrojenja predstavlja složen inženjerski izazov koji zahteva transformaciju iz nestrukturiranog rasterskog oblika (skup piksela) u topološki definisan model mreže.

Proces digitalizacije šema distributivnih postrojenja strukturiran je kroz tri ključne faze: detekciju teksta i ekstrakcije semantičkih informacija radi definisanja atributa opreme, detekciju električnih simbola kao čvorova sistema, te rekonstrukciju topologije kroz analizu linijskih struktura radi formiranja finalne grafovske strukture $G = (V, E)$.

U nastavku će biti detaljno opisane odabrane metode, njihova teorijska osnova i opravdanost primene u kontekstu specifičnih izazova koje nose distributivna postrojenja, kao što su nestandardizovana simbologija i potreba za visokom preciznošću pri povezivanju elemenata.

1.1 Prepoznavanje teksta

Prepoznavanje teksta igra bitnu ulogu u analizi šema distributivnih postrojenja jer omogućava ekstrakciju ključnih podataka poput naziva elemenata, naponskih nivoa i pratećih anotacija. U ovom poglavlju predstavljen je pristup primenjen za prepoznavanje teksta, zasnovan na tehnologiji optičkog prepoznavanja znakova (engl. Optical Character Recognition, OCR) [11], specijalizovanoj za ovaj tip zadatka. Nakon analize i implementacije različitih biblioteka otvorenog koda (engl. open-source) zasnovanih na tehnologiji OCR, biblioteka DocTR [12] izdvojila se kao vodeća za obradu slika distributivnih postrojenja, budući da je pružala najbolje rezultate.

Biblioteka DocTR je savremenog koncepta i otvorenog koda, zasnovana na dubokom učenju, i dizajnirana je za zadatke prepoznavanja teksta u dokumentima i na slikama. Rad biblioteke zasniva se na dvoetapnom procesu, detekciji tekstualnih regiona i prepoznavanje tekstualnih karaktera, koji obezbeđuje visoku preciznost i kod kompleksnih tehničkih prikaza.

U ovom radu, biblioteka DocTR se primenjuje direktno na ulazne šeme distributivnih postrojenja kako bi se detektovali i prepoznali tekstualni elementi. Njena primena počinje predobradom slike radi poboljšanja jasnoće, nakon čega se prosleđuje biblioteci na obradu. Na osnovu prostornih pozicija detektovanog teksta, izvučeni sadržaj se dodeljuje obližnjim elementima, čime se dobija namena identifikovanih atributa, kao što su oznake opreme, naponski nivoi i dr. Kako bi bili pronađeni obližnji elementi sa njihovim prostornim pozicijama, u cilju dodeljivanja relevantnih informacija izvučenih usled prepoznavanja teksta, potrebno je proći kroz proces prepoznavanja elemenata na šemi, koji je detaljno opisan u narednom delu.

1.2 Detekcija i identifikacija električnih elemenata

U okviru digitalizacije šema distributivnih postrojenja, ključni proces obuhvata identifikaciju postojećih električnih elemenata poput komponenti (prekidača, rastavljača, otpornika, i dr.), mašina (transformatora, generatora, i dr.) i veza (sabirnica, vodova, spojnica, i dr.), uz precizno određivanje njihovih tačnih koordinata na slici.

Iako su savremene metode zasnovane na dubokom učenju, poput konvolucionih neuronskih mreža, dominantne u opštoj detekciji objekata, [13], njihova primena na šeme distributivnih postrojenja suočava se sa specifičnim izazovima. Najznačajniji izazov predstavlja simbologija elemenata, koja u oblasti elektroenergetike nije univerzalno standardizovana. Različite elektroenergetske kompanije i inženjerske firme, pored postojećih standarda, primenjuju i sopstvene varijacije ili interne standarde za reprezentaciju elemenata. Zbog visoke varijabilnosti simbola, primena metoda zasnovanih na dubokom učenju zahteva dodatnu obuku, ili fino podešavanje modela (engl. fine-tuning) za svaki novi skup simbola. Nedostaci primene ove metode ogledaju se u opterećenju računarskih resursa i dugotrajnom procesu označavanja podataka za obuku modela, kao i samog procesa obučavanja.

Shodno tome, u ovom radu je primenjena metoda koja se pokazala najboljom za šeme distributivnih postrojenja kao što je tehnika upoređivanja sa šablonom (engl. template matching) koristeći biblioteku OpenCV [14], [15] kao jednostavnija metoda u poređenju sa metodama dubokog učenja, zbog kraćeg vremena potrebnog za obuku alata. Ova metoda funkcioniše kao tehnika digitalne obrade slike, koja pronalazi delove izvorne slike koji se podudaraju sa unapred definisanim šablonom (simbolom elemenata). Ovaj pristup je optimalan za šeme distributivnih postrojenja zbog geometrijske jednostavnosti simbola, visoke

adaptibilnosti na varijacije u kvalitetu ulaznih prikaza i niske procesorske zahtevnosti koja omogućava primenu na standardnim računarskim sistemima.

Proces detekcije rezultuje skupom prostornih koordinata za svaki prepoznati element. Ove koordinate su od presudnog značaja za dalju fazu rada, jer predstavljaju čvorove u grafu postrojenja.

Prepoznavanje simbola elemenata na ovaj način predstavlja bazu za rekonstrukciju topologije distributivnog postrojenja. Poznavanjem lokacija elemenata eliminiše se neodređenost prilikom kasnije detekcije povezanosti. Detektovani elementi služe kao referentne tačke za algoritme za praćenje vêzā, čime se omogućava generisanje konektivnosti i prelazak sa statične slike na povezani model mreže, što je detaljno opisano u narednom poglavlju.

1.3 Rekonstrukcija topologije i konektivnosti

U procesu formiranja digitalnog mrežnog modela, rekonstrukcija topologije predstavlja finalni i najkritičniji korak. Nakon što su određene pozicije elemenata (čvorova), neophodno je identifikovati galvanske veze koje ih spajaju kako bi se formirao funkcionalni graf sistema. Za detekciju linijskih struktura korišćen je detektor segmenata vêzā (engl. Line Segment Detector, LSD) [16] iz biblioteke OpenCV. Savremeni algoritam LSD analizira gradijente intenziteta piksela i grupiše ih u linearne segmente uz strogu kontrolu lažno pozitivnih detekcija (engl. Number of False Alarms – NFA). Ova metoda se pokazala superiornom u odnosu na klasičnu transformaciju Hough [17], zbog veće preciznosti i odsustva potrebe za kompleksnim podešavanjem parametara. Dodatno je implementirana heuristička obrada prepoznatih vêzā radi postizanja višeg stepena preciznosti rezultata.

Krajnji rezultat ove obrade je skup grana, gde svaka grana povezuje dva prethodno detektovana čvora. Ovim se proces ekstrakcije podataka finalizuje formiranjem topološkog grafa distributivnog postrojenja koji je spreman za integraciju u okruženje ADMS.

2 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U ovom poglavlju analiziraju se ključne karakteristike testiranja specijalizovanog alata za automatizaciju procesa digitalizacije šema distributivnih postrojenja. Testiranje je sprovedeno na adekvatnom i realnom primeru iz inženjerske prakse, obuhvatajući proveru svih pojedinačnih komponenti alata, kao i evaluaciju njegovog ukupnog učinka. Poglavlje je strukturirano u tri segmenta: eksperimentalna postavka, hardverska konfiguracija i brzina obrade i završna analiza rezultata.

2.1 Eksperimentalna postavka

Eksperiment je sproveden na osnovu šeme transformatorske stanice koja je dostupna u papirnom obliku i koja se koristi za obuku osoblja pri ručnoj digitalizaciji šema distributivnih postrojenja unutar softvera za napredno upravljanje elektrodistributivnim mrežama.

Odabrana šeme je reprezentativna jer sadrži sve tipične elemente jedne transformatorske stanice 110/10 kV, kao i jasno definisane električne karakteristike uz simbole i kompleksnu topološku povezanost. Pored svakog električnog elementa navedene su i njegove električne karakteristike, što olakšava identifikaciju tipa elemenata. Takođe, električna oprema je međusobno povezana, čime se verno prikazuje unutrašnji izgled distributivnog postrojenja.

Obuka specijalizovanog alata sprovodi se pre njegove prve upotrebe i zasniva se na prethodnom znanju korisnika o analiziranoj distributivnoj mreži. To podrazumeva da korisnik obezbeđuje po jedan reprezentativan primer svake vrste električnog elementa u svim njegovim relevantnim stanjima. Za aktivne elemente distributivne mreže uzimaju se u obzir stanja „normalno otvoren“ i „normalno zatvoren“, dok pasivni elementi nemaju definisana uklopna stanja. Primeri moraju biti u visokoj rezoluciji i sa jasno izraženim detaljima kako bi se omogućilo uspešno prepoznavanje električnih elemenata bez softverskih grešaka.

Nakon učitavanja šeme distributivnog postrojenja, specijalizovani alat započinje analizu slike.

2.2 Hardverska konfiguracija i brzina obrade

Specijalizovani alat instaliran je na računaru čije su hardverske karakteristike prikazane u Tabeli 1. Hardverske performanse direktno utiču na trajanje procesa prepoznavanja i identifikacije teksta, električnih elemenata kao i vêzā.

Dobijeni rezultati imaju poseban značaj u kontekstu poređenja sa kompleksnijim metodama prepoznavanja koje su opisane u [18]. Naprednije metode opisane u literaturi ostvaruju tek neznatno bolje performanse u pogledu ukupnog vremena završetka analize, koje iznosi približno 15 sekundi po šemi distributivnog postrojenja, u poređenju sa pristupom primenjenim u okviru razvijenog specijalizovanog alata i to uz pretpostavku korišćenja snažnijih hardverskih resursa i jednostavnije šeme distributivnog postrojenja.

Tabela 1 – Hardverske karakteristike računara za korišćenje specijalizovanog alata

Hardverska komponenta	Specifikacija hardverske komponente
Grafička kartica	24 GB GDDR6X radne memorije i 16.384 procesorskih (CUDA) jezgara
Procesor	12-jezgarni x86-64 procesor sa baznim taktom od 3.7 GHz
Ram memorija	32GB DDR4

Za kompletan proces prepoznavanja, uz navedene hardverske karakteristike, specijalizovanom alatu je potrebno približno 18 sekundi, od čega oko 8 sekundi za prepoznavanje i dešifrovanje teksta, oko 8 sekundi za prepoznavanje i obradu električnih elemenata i oko 2 sekunde za prepoznavanje vêzā i formiranje konektivnosti.

Obuka specijalizovanog alata zasniva se na jednostavnom izdvajanju najmanje jednog reprezentativnog uzorka za svaki element, koji se potom direktno koristi u procesu prepoznavanja. Ukupno vreme obuke za sve elemente posmatrane šeme distributivnog postrojenja iznosi približno 3 minuta i u velikoj meri zavisi od korisničke efikasnosti.

Izbor metoda implementiranih u specijalizovanom alatu opravdan je njihovom jednostavnošću primene, brzinom prilagođavanja različitim projektima, kao i umerenim zahtevima u pogledu hardverskih resursa.

2.3 Analiza rezultata

Korisniku je omogućena provera rezultata prepoznavanja i ekstrakcije teksta, kao i identifikacije električnih elemenata. Prepoznati tekst označen je plavim okvirom dok su identifikovani električni elementi označeni su ljubičastim okvirom. Prelaskom kursora preko označenog okvira prikazuje se dodatni prozor sa detaljima o rezultatima prepoznavanja koji u slučaju električnih elementa sadrži tip prepoznatog elementa, kao i uklopno stanje kod aktivnih elemenata, dok se za tekstualne elemente prikazuje njihov sadržaj. Takođe dodatni prozor sadrži i stepen pouzdanosti prepoznavanja teksta i električnih elemenata, što može biti od značaja za korisnika prilikom evaluacije rezultata.

Primer prepoznatih električnih elemenata i tekstualnih elemenata predloženim postupkom prikazan je na Slici 1. Treba naglasiti sledeće činjenice, kako sledi u nastavku.

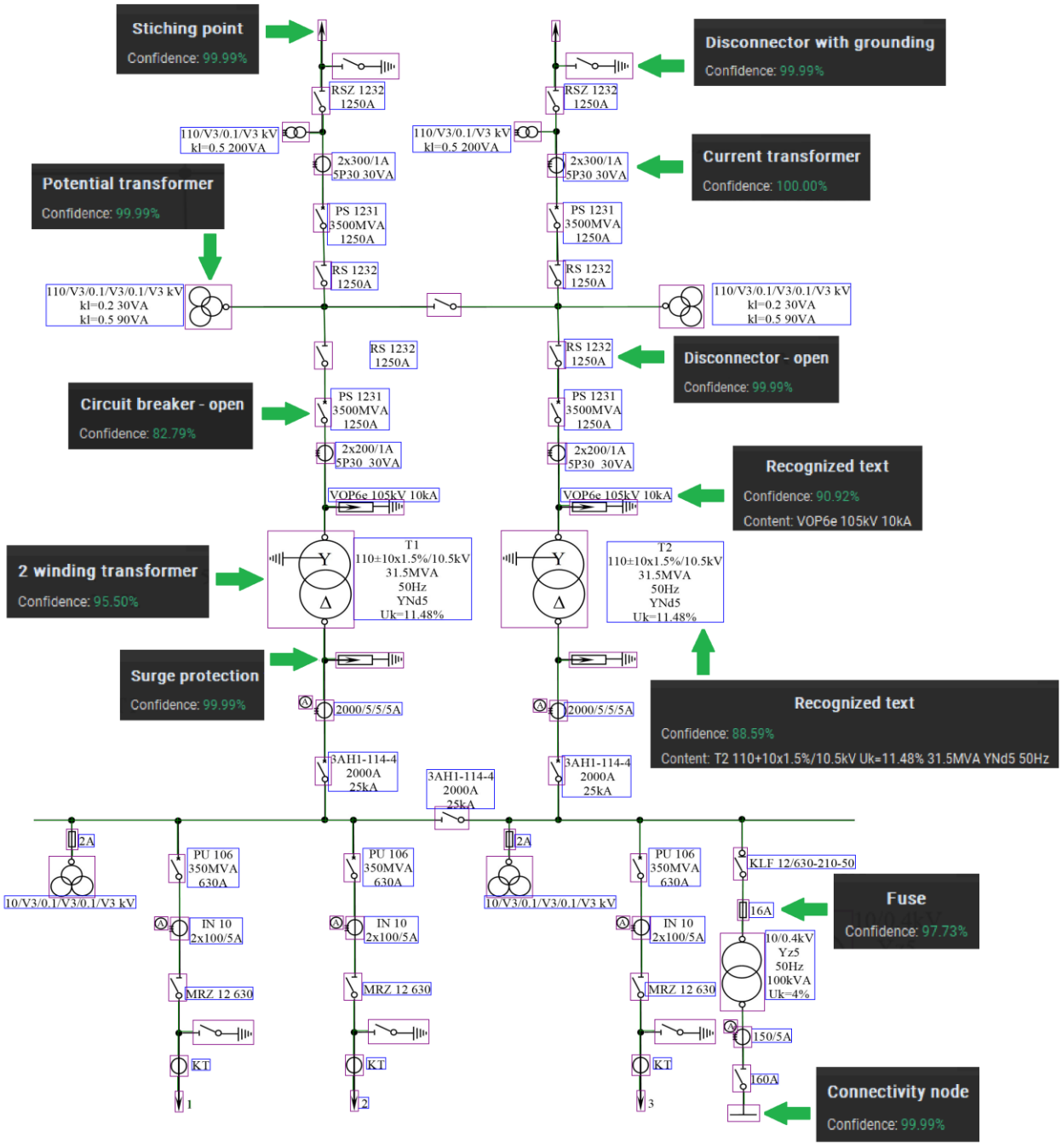
1. Prepoznavanje elemenata pomoću specijalizovanog alata realizovano je sa visokom preciznošću. Najniža preciznost prepoznavanja elemenata iznosi 82,79% i javlja se kod simbola elemenata koji imaju značajne međusobne sličnosti. Sa druge strane, kod simbola elemenata koji su u potpunosti različiti od ostalih, preciznost prepoznavanja dostiže 95,5%. Najniža preciznost prepoznavanja teksta iznosi 88,59% i zabeležena je kod tekstualnih oznaka koje sadrže specijalne karaktere, kao i kombinacije brojeva i slova. Dobijeni rezultati ukazuju na visok nivo pouzdanosti predloženog rešenja sistema za prepoznavanje, čime se obezbeđuje uspešna i pouzdana digitalizacija šema distributivnih postrojenja.
2. Po završetku inicijalne provere, specijalizovani softverski alat vrši automatsku digitalizaciju šema distributivnih postrojenja, pri čemu korisnik zadržava odgovornost za finalnu validaciju digitalizovanih podataka. Na taj način omogućava se masovna digitalizacija, uz značajno smanjenje vremena potrebnog za potpunu digitalizaciju postojećih šema. Ovo obezbeđuje visoku efikasnost ovog rešenja.
3. Prepoznati tekst se automatski dodeljuje najbližem električnom elementu prema unapred definisanom kriterijumu. Kriterijum dodele konfiguriše se na nivou šeme distributivnog postrojenja i zasniva se na relativnom položaju teksta u odnosu na električni element, pri čemu korisnik može definisati osam diskretnih pozicija (na primer: gore-levo, gore, gore-desno, sredina-desno i slično).

Eksperimentalni rezultati dobijeni na primeru šeme distributivnog postrojenja u papirnom obliku ukazuju na visok stepen uspešnosti rada specijalizovanog alata. Celokupan tekst sa Slike 1 uspešno je prepoznat i dodeljen odgovarajućim električnim elementima u skladu sa definisanim kriterijumom. Svi električni elementi, uključujući aktivne i pasivne elemente, kao i elemente sa jednim ili dva kraja, identifikovani su sa visokom tačnošću. Takođe, konektivnost između elemenata prepoznata je u potpunosti, pri čemu su svi elementi pravilno povezani odgovarajućim vezama.

U poređenju sa rezultatima opisanim u [18], predloženo rešenje zahteva manje hardverskih resursa za postizanje iste brzine i efikasnosti analize šema distributivnih postrojenja dok podrazumeva kraću i jednostavniju obuku specijalizovanog alata, kao i kraće vreme za uspostavljanje inicijalnog korišćenja. Pored toga, pokazuje visoku uspešnost u analizi slika nižeg i niskog kvaliteta.

Dobijeni rezultati potvrđuju efikasnost automatske digitalizacije šema distributivnih postrojenja i njihovog prenosa iz papirnog u digitalni format u vremenu značajno kraćem u odnosu na vreme potrebno za ručnu digitalizaciju u okviru softvera za napredno upravljanje

elektrodistributivnim mrežama. Na osnovu navedenog može se očekivati značajna ušteda vremena pri realizaciji projekata, koja za pojedine aktivnosti može dostići i do 50%, uz istovremeno smanjenje uticaja ljudskog faktora i verovatnoće pojave grešaka.



Slika 1 – Ilustracija prepoznavanja elemenata i teksta sa izraženom preciznošću prepoznavanja

Razvijeni specijalizovani alat postavlja umerene zahteve u pogledu hardverskih resursa, čime se proširuje mogućnost njegove primene na širi krug korisnika u poređenju sa alatima koji se zasnivaju na metodama dubokog učenja. Kontinuirana upotreba alata omogućava njegovo dodatno unapređenje kroz proširivanje baze simbola elemenata, što predstavlja prednost u

odnosu na primenu metoda dubokog učenja, kod kojih je ovakva vrsta prilagođavanja složenija zbog problema preobučavanja neuronskih mreža.

3 ZAKLJUČAK

Predstavljeni rad prikazuje napredan specijalizovani alat za automatizaciju procesa digitalizacije šema distributivnih postrojenja. Polazeći od realnih problema identifikovanih u distributivnim kompanijama, predloženo rešenje suočava se sa jednim od ključnih izazova u formiranju pouzdanih digitalnih mrežnih modela koji nedostaju ili su pojednostavljeni u GIS i postoje samo u papirnom obliku.

Specijalizovani alat koristi metode veštačke inteligencije za prepoznavanje teksta u kombinaciji sa klasičnim metodama prepoznavanja simbola elemenata. Primena ovakvog pristupa omogućava umerene zahteve u pogledu hardverskih resursa za postizanje iste efikasnosti u brzini obrade šeme distributivnog postrojenja. Obuka specijalizovanog alata, predloženog u ovom radu, jednostavnija je i kraće traje, a istovremeno pruža mogućnost proširivanja baze dodatnim simbolima elemenata u narednim projektima bez bojazni od grešaka prepoznavanja koje se javljaju preobučavanjem neuronske mreže. Specijalizovani alat pokazuje veliku efikasnost pri prilagođavanju različitim prezentacijama elemenata, budući da ne zahteva ponovnu obuku od početka, što je inače karakteristično za pristupe zasnovane na konvolucionim neuronskim mrežama. Takođe, ističe se njegova primena u analizi slika niskog kvaliteta, koje su česta pojava kod starih papirnih šema distributivnih postrojenja.

Dalji pravci istraživanja obuhvataju proširenje skupa podržanih simbola elemenata i tipova električne opreme. Pored toga planira se unapređenje robusnosti algoritama u slučaju lošijeg kvaliteta ulaznih slika. Predloženo rešenje predstavlja značajan korak ka bržoj, pouzdanijoj i efikasnijoj digitalizaciji šema distributivnih postrojenja i njihovoj potpunoj integraciji u savremena rešenja za upravljanje elektrodistribucijom.

LITERATURA

[1] M. S. Hossan, B. Chowdhury, J. Schoene, S. Bahramirad, „Advanced Distribution Management System: Implementation, Assessment, and Challenges”, 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Portland, OR, SAD, 2018, str. 1-5; DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586231

[2] F. W. Saputra, K. M. Banjarnahor, N. Hariyanto, „Advanced Distribution Management System: Automation of Optimal Feeder Reconfiguration in Spindle Distribution Networks”, 2024 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), Bandung, Indonezija, 2024, str. 1-6; DOI: 10.1109/ICPERE63447.2024.10845476

[3] G. Cochenour, R. Ochoa, V. Rajsekar, „Distribution network model readiness for Advanced Distribution Management Systems”, 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, Chicago, IL, SAD, 2014, str. 1-5; DOI: 10.1109/TDC.2014.6863194

[4] R. E. De-Jesús-Grullón, R. O. Batista Jorge, A. Espinal Serrata, J. E. Bueno Díaz, J. J. Pichardo Estévez, N. F. Guerrero-Rodríguez, „Modeling and Simulation of Distribution Networks with High Renewable Penetration in Open-Source Software: QGIS and OpenDSS”, Energies 2024, 17, 2925; DOI: 10.3390/en17122925

[5] H. Bhanbhro, Y. K. Hooi, W. Kusakunniran, Z. H. Amur, „A Symbol Recognition System for Single-Line Diagrams Developed Using a Deep-Learning Approach”, Applied Sciences, vol. 13, br. 15, 2023, art. 8816; DOI: 10.3390/app13158816

[6] S. Mani, M. A. Haddad, D. Constantini, W. Douhard, Q. Li, L. Poirier, „Automatic Digitization of Engineering Diagrams using Deep Learning and Graph Search", 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Seattle, WA, SAD, 2020, str. 673-679; DOI: 10.1109/CVPRW50498.2020.00096

[7] C. Shen, P. Lv, M. Mao, W. Li, K. Zhao, Z. Yan, „Substation One-Line Diagram Automatic Generation Based On Image Recongnition", 2022 Global Conference on Robotics, Artificial Intelligence and Information Technology (GCRAIT), Chicago, IL, SAD, 2022, str. 247–251

[8] L. Jamieson, C. F. Moreno-Garcia, E. Elyan, „Deep Learning for Text Detection and Recognition in Complex Engineering Diagrams", 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Glasgow, UK, 2020, str. 1-7; DOI: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207127

[9] L. Yang, J. Wang, J. Zhang, H. Li, K. Wang, C. Yang, D. Shi, „Practical single-line diagram recognition based on digital image processing and deep vision models", Expert Systems with Applications, vol. 238, part F, 2024, art. 122389; DOI: 10.1016/j.eswa.2023.122389

[10] E. Elyan, L. Jamieson, A. Ali-Gombe, „Deep learning for symbols detection and classification in engineering drawings", Neural Networks, vol. 129, 2020, str. 91–102; DOI: 10.1016/j.neunet.2020.05.025

[11] H. Wang, C. Pan, X. Guo, C. Ji, K. Deng, „From object detection to text detection and recognition: A brief evolution history of optical character recognition", WIREs Computational Statistics, vol. 13, br. 5, 2021, art. e1547; DOI: 10.1002/wics.1547

[12] Mindee. docTR: Document Text Recognition - seamless, high-performing OCR library. GitHub Repository (2021). https://github.com/mindee/doctr

[13] Z. Q. Zhao, P. Zheng, S. T. Xu, X. Wu, „Object Detection With Deep Learning: A Review", IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 30, br. 11, 2019, str. 3212-3232; DOI: 10.1109/TNNLS.2018.2876865

[14] N. S. Hashemi, R. B. Aghdam, A. S. B. Ghiasi, P. Fatemi, „Template Matching Advances and Applications in Image Analysis", arXiv preprint, 2016; DOI: 10.48550/arXiv.1610.07231

[15] A. Odeh, N. Odeh, „OpenCV and its Applications in Artificial Intelligent Systems", 2024 International Conference on Intelligent Computing, Communication, Networking and Services (ICCNS), 2024, str. 242-249; DOI: 10.1109/ICCNS62192.2024.10776047

[16] R. G. Von Gioi, J. Jakubowicz, J. M. Morel, G. Randall, „LSD: A fast line segment detector with a false detection control", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, br. 4, 2010, str. 722-732; DOI: 10.1109/TPAMI.2008.300

[17] P. Mukhopadhyay, B. B. Chaudhuri, „A survey of Hough transform", Pattern Recognition, vol. 48, br. 3, 2015, str. 993-1010; DOI: 10.1016/j.patcog.2014.08.027

[18] W. Cao, Z. Chen, C. Wu, T. Li, „A Layered Framework for Universal Extraction and Recognition of Electrical Diagrams", Electronics, vol. 14, br. 5, 2025, art. 833; DOI: 10.3390/electronics14050833