



Stručni rad <https://doi.org/10.24094/ptk.025.1.085>

Ključne reči:
automatizacija;
kontroler;
savremene tendencije razvoja

Key words:
automation; controller;
modern development trends

Stanko P. STANKOV*
* stanko.stankov@elfak.ni.ac.rs

NOVI TRENDovi U RAZVOJU PROGRAMABILNIH LOGIČKIH KONTROLERA

NEW TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, Srbija
ORCID: 0009-0002-4264-3111

Programabilni logički kontroleri (PLC) kao okosnica industrijske automatizacije prilagođavaju se svakom sledećem talasu tehnologije. Ovo važi i danas, skoro šest decenija nakon prvog programabilnog kontrolera Modicon 084 razvijenog za potrebe kompanije General Motors. Inovacije kao što su veštačka inteligencija, oblačna platforma i računarstvo na ivici, IIoT, mreže pete generacije, proširena i virtuelna stvarnost prodiru u sve moguće oblasti industrije, pri čemu PLC kontroleri nisu izuzetak. Opremljeni savremenim funkcionalnim arsenalom, ovi kompaktni industrijski računarski sistemi postaju osnovni gradivni blok inteligentne automatizacije, digitalizacije i Industrije 4.0, omogućavajući dinamičku regulaciju i upravljanje industrijskim procesima na osnovu podataka preko povratne sprege u realnom vremenu. Globalno tržište PLC sistema se procenjuje na 12.2 milijarde američkih \$ 2024 godine. Očekuje se da će premašiti 15 milijardi \$ do 2029. PLC kontroleri, koji tradicionalno služe kao osnova procesne i diskretne industrijske automatizacije, danas su sve rasprostranjeniji usvajajući principe Industrije 4.0 u različitim sektorima. Uticaj na porast potrebe za njima je povećana primena industrijskih robota u automobilske, elektrotehničkoj i drugim industrijama. Sektor industrijske robotike je među vodećim korisnicima PLC sistema i postaje ključni pokretač daljeg razvoja tržišta programabilnih kontrolera, a prognoze su da će se ovaj trend nastaviti s razvojem sve rasprostranjenije robotizacije u fabrikama širom sveta. Prema podacima IFR (International Federation of Robotics) iz 2024. g. već je u funkciji skoro 4.3 miliona robota.

Programmable logic controllers (PLC) as the backbone of industrial automation adapt to each subsequent wave of technology. This is still true today, almost six decades after the first Modicon 084 programmable controller developed for General Motors. Innovations such as artificial intelligence, cloud and edge computing, IIoT, 5G networks, augmented and virtual reality are penetrating all possible areas of industry, and PLC controllers are no exception. Equipped with a modern functional arsenal, these compact industrial computer systems become the basic building block of intelligent automation, digitalization and Industry 4.0, enabling dynamic regulation and management of industrial processes based on data via real-time feedback. The global market for PLC systems is estimated at US\$ 12.2 billion in 2024. It is expected to exceed 15 billion dollars by 2029. PLC controllers, which traditionally serve as the basis of process and discrete industrial automation, are becoming more widespread today adopting the principles of Industry 4.0 in various sectors. The impact on the increase in the need for them is the increased application of industrial robots in the automotive, electrical engineering and other industries. The industrial robotics sector is among the leading contributors to development of PLC systems and is becoming a key driver of the further development of

the programmable controller market, and forecasts are that this trend will continue with the development of increasingly widespread robotization in factories around the world. According to the data of the IFR (International Federation of Robotics) from 2024, almost 4.3 million robots are already in operation.

1. Uvod

Programabilni logički kontroleri su industrijski računarski sistemi koji primaju podatke preko ulaznih analognih i digitalnih modula u realnom vremenu i na osnovu interne logike šalju komande preko izlaznih modula izvršnim organima za obavljanje odgovarajućih operacija. PLC kontroleri se lako programiraju, postavljaju i integrišu u industrijsko okruženje, zbog čega je njihova upotreba u proizvodnji široko rasprostranjena. Zahvaljujući njima, svaki proizvodni proces ili funkcionalnost mašine mogu biti optimizovani i značajno poboljšani. PLC-i su sastavni deo sistema industrijske automatizacije od početka moderne proizvodnje. Od tada do danas programabilno upravljanje je doživelo značajan tehnološki razvoj, a modeli najnovije generacije u katalogima vodećih proizvođača su sve pouzdaniji i izdržljiviji i imaju sve bogatiji repertoar inteligentnih funkcija. Koristeći napredne funkcije kao što su samodijagnostika, auto-nadzor i prediktivno održavanje najnovija generacija programabilnih kontrolera unapred identifikuje različite probleme vezane za uređaje i opremu, minimizira zastoje i povećava operativnu efikasnost. Sve važnija tema u kontekstu njihovog razvoja je sajber bezbednost, koja je obavezan element digitalne transformacije industrijskih sistema u cilju obezbeđivanja pouzdane zaštite osetljivih podataka, kritičnih procesa i infrastrukture od sajber napada [1, 2]. Posmatrajući istorijat razvoja PLC-a može se uočiti relativno dug period u kome je spektar primene ovih sistema bio znatno uži, a njihova upotreba mnogo ograničenija. Kontroleri se tada oslanjaju na sopstveno programiranje za upravljanje prvenstveno uređajima u polju (pumpe, elektromagnetni i elektromotorni ventili, razni elektromotorni pogoni itd.) [3]. Sada se sve više primenjuju tzv. programabilni automatizacioni kontroleri (programmable automation controller-PAC) gde je fokus na znatno standardizovanim i modularnijim programskim jezicima, pri čemu sve više postaju popularno rešenje za upravljanje kompletnim proizvodnim linijama [4]. Granice između PLC i PAC kontrolera su prilično zamagljene, budući da se PLC-i koriste za upravljanje raznolikim (po vrsti i razmeri) sistemima, procesima i opremom. Broj programskih jezika, koji su se u prošlosti gotovo izjednačili s brojem proizvođača sada je sve manji, a jezici su univerzalniji. Standardizacija u ovom pravcu je poželjna iz više razloga, počevši od mogućnosti da PLC inženjeri i tehničari lakše rade s većim izborom proizvoda različitih proizvođača, a da obučeni i iskusni kadrovi relativno brzo pronađu posao u različitim kompanijama, umesto da su „usidreni” u datoj kompaniji vezani samo za jednu određenu tehnologiju. Sa stanovišta aplikacija standardizovano programiranje u velikoj meri proširuje oblast primene PLC-a [5]. Minijaturizacija i eksponencijalno poboljšanje performansi su trendovi koji u punoj snazi važe i za programabilne kontrolere, gde se sa svakom sledećom generacijom sve više računarske snage „pakuje“ u sve manja kućišta. Standardizacija u ovom smislu omogućava proizvođačima da se usredsrede na neke važnije aspekte tehnologije poput programskog jezika ili pak npr. modularne I/O mogućnosti proširenja, brzine i kapaciteta obrade podataka. Dakle, PLC-i dobijaju znatno šire mogućnosti za poboljšanje ergonomije u savremenoj industriji automatizacijom ponavljajućih, teških i zamornih aktivnosti [6]. Ovi uređaji takođe igraju ključnu ulogu u stalno rastućem IIoT (industrial internet of things) ekosistemu kao njegovi sastavni elementi koji obezbeđuju besprekornu povezanost i komunikaciju između pametnih uređaja i sistema u proizvodnji. Kroz daljinski nadzor i integraciju podataka PLC-i omogućavaju efikasniji i sinhronizovani rad ele-

menata industrijske mreže. Konvergencija između programabilnog upravljanja i IIoT suštinski transformiše industrijska okruženja, omogućavajući sve masovnije automatizovano donošenje odluka zasnovano na podacima, što je zauzvrat povezano s većom produktivnošću i pouzdanošću i znatno manjim gubitkom resursa [7, 8]. Pristup podacima o tehnološkim procesima u realnom vremenu i funkcije za dinamičko prilagođavanje parametara sistema automatizacije i prateće opreme „u hodu“ stvaraju uslove za izgradnju inteligentnijih, transparentnijih i efikasnijih proizvodnih aplikacija. Sa sve većom integracijom programabilnih kontrolera u IIoT platforme radi poboljšanja povezivanja, deljenja podataka, daljinskog nadzora i upravljanja, proizvodni pogoni mogu sve više da izvuku dodatnu poslovnu vrednost na osnovu analize podataka i prediktivnog održavanja. Uporedo s tim savremeni programabilni kontroler postaje sve fleksibilniji i skalabilniji. Zahvaljujući tome, sistemi automatizacije se mogu detaljnije i temeljnije prilagoditi zahtevima konkretnih preduzeća u raznim industrijskim granama [8, 9]. Modeli nove generacije PLC-a su projektovani za veću izdržljivost u odnosu na standardne uz otpornost na agresivna industrijska okruženja i ekstremne uslove rada, uključujući vrlo visoke temperature, udare i vibracije, vlagu, kontakt s hemikalijama, prašinom, prljavštinom itd. Pored toga, u upravljačko-nadzornim konfiguracijama sve više upliva ima opto elektronika čime se obezbeđuje pouzdanost čak i u ambijentima koji su izloženi snažnim elektromagnetnim smetnjama. PLC-i se takođe mogu bezbedno koristiti za upravljanje osetljivim ili kritičnim procesima, na udaljenim lokacijama, za koje je potrebno precizno upravljanje i nadzor [10, 11]. U kontekstu sve većeg prodora zelenih tehnologija u industriju, energetska efikasnost i održivost su takođe među vodećim trendovima u savremenom razvoju ovog ključnog elementa industrijske automatizacije. Na nivou kontrolera, to se postiže implementacijom algoritama za optimizaciju potrošnje energije i minimiziranje gubitaka resursa. Još jedan zeleni pristup projektovanju i proizvodnji PLC kontrolera je upotreba materijala koji se mogu reciklirati, kao i modularna arhitektura, čime se omogućava zamenu pojedinačnih komponenti umesto celog uređaja kako bi se produžio vek trajanja i smanjio otpad za vreme životnog ciklusa proizvoda [12].

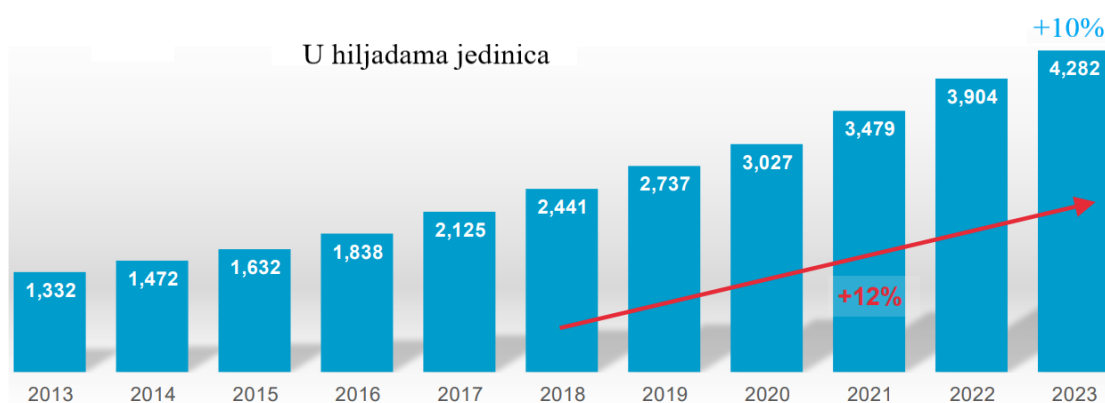
2. PLC u doba podataka i računarstva

Akvizicija, prenos i obrada podataka u eri četvrte industrijske revolucije i inteligentne automatizacije proizvodnje su veoma značajan faktor. Kao rezultat tehnološkog napretka u ovoj oblasti poslednjih godina PLC-i najnovije generacije mogu da izvuku iz ekosistema sve više korisnih i upotrebljivih informacija. Ogromni nizovi podataka koje savremeni kontroleri treba da prikupe u realnom vremenu, obrade, rezimiraju i pošalju u mrežu povezani su sa intenzivnim korišćenjem resursa i potrebom da se poboljša brzina i računarski kapacitet ovih uređaja. Ako je u fazi nastajanja IoT-a glavni fokus bio na kvantitetu skupova podataka, s tehnološkim sazrevanjem koncepta i njegovim prelamanjem kroz prizmu programabilnih kontrolera naglasak se pomera ka kvalitetu informacija i njihovom potencijalu da se transformišu u dodatnu vrednost. Prava revolucija u industrijskoj automatizaciji se dešava s pojavom računarstva u oblaku i računarstva na ivici. Periferne platforme i specijalizovani PLC moduli pružaju pogodnu bazu za hostovanje npr. algoritama za mašinsko učenje, koji se sve više koriste kod obrade slika u automatizovanoj vizuelnoj inspekciji, za obuku, otkrivanje grešaka, kvarova itd. [13, 14]. Drugi ključni trend u daljem razvoju PLC-a je tzv. inteligencija na ivici (edge intelligence), koja se odnosi na inteligenciju perifernih uređaja (uređaja u polju) čime se stvaraju uslovi za napredno decentralizovano upravljanje industrijskim mrežama ili distribuciju/pozicioniranje procesa donošenja odluka bliže sensorima i izvršnim organima unutar upravljačke arhitekture. Ovo značajno smanjuje vremenska kašnjenja, poboljšava odziv sistema skraćivanjem vremena odziva i sveukupno povećavajući pouzdanost u složenim industrijskim scenarijima. Programabilno logičko

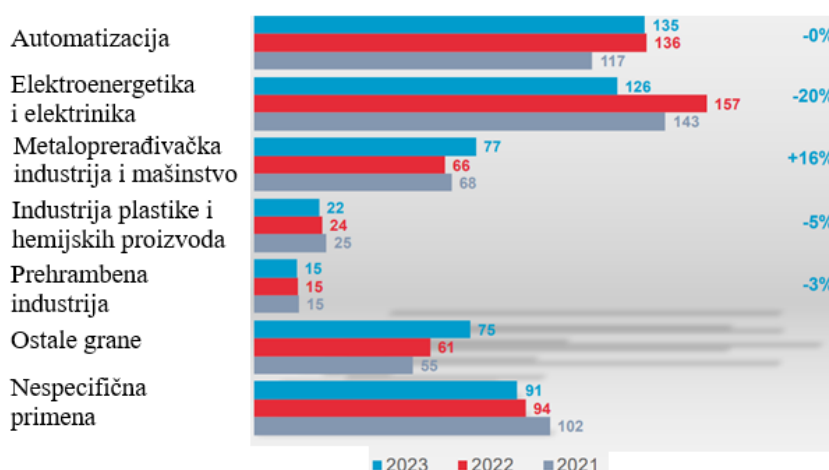
upravljanje postepeno se spaja s drugom ključnom računarskom tehnologijom—oblakom, a to postavlja nove standarde u pristupu podacima i skalabilnosti sistema automatizacije korišćenjem alata za centralizovanu analizu podataka, kolaborativnu obradu i sinhronizovane operacije. Dakle, platforme zasnovane na oblaku otvaraju nove oblasti primene PLC-a u industriji i proizvodnji, eliminišući faktor prostora za tehničke, inženjerske i razvojne timove. Proširivanje funkcionalnosti programabilnih kontrolera s računarstvom u oblaku i računarstvom na ivici omogućava efikasniju obradu i skladištenje podataka, kao i olakšavanje njihove razmene između PLC-a i platformi za daljinsko praćenje, analizu i donošenje odluka, zasnovanih na oblaku [15].

3. Programabilno upravljanje i robotizacija

U novije vreme pokretač razvoja PLC-a je masovna primena robota u svim granama ljudske delatnosti, a pogotovo u industrijskoj automatizaciji. Na slici 1 prikazan je grafikon instaliranih industrijskih robota u svetu, u periodu 2013-2023 godine. Godišnje instalacije premašile su 500.000 jedinica treću godinu zaredom. Slika 2 ilustruje primenu robota na svetskom nivou u raznim granama, u vremenu od 2021 do 2023 godine [16].



Slika 1. Operativni fond industrijskih robota u svetu, u 1.000 jedinica [16]



Slika 2. Instalacija robota u svetu na godišnjem nivou u raznim granama industrije (u hiljadama jedinica [16])

Na slici 3 su prikazane najznačajnije tendencije u razvoju robota koji se upravljaju pomoću PLC-a.



Slika 3. Pet najznačajnijih trendova u robotici tokom 2024.

Ne mogu se sagledaju trendovi i inovacije u PLC kontrolerima bez razmatranja njihove veze s tzv. disruptivnim tehnologijama – atributa Industrije 4.0, s digitalizacijom i najnovijom proizvodnom i industrijskom paradigmatom – veštačkom inteligencijom, inovacijom koja će napraviti istinsku prezašćenost tehnološkog sveta, nadmećući se da preuzme i transformiše svaki oblik komunikacije između ljudi i mašina. Algoritmi veštačke inteligencije i mašinsko učenje donose potpuno novi nivo inteligentne funkcionalnosti ovim sistemima, omogućavajući im da još efikasnije optimizuju procese, predvide probleme i prilagođavaju i primenjuju strategije upravljanja na osnovu identifikovanih modela i zavisnosti od priкупljenih podataka [17, 18].

Platforme za automatizaciju sve više postaju pametnije, nezavisne i autonomne, a istovremeno dobijaju sve veću kontrolu nad mašinama, robotima, linijama i celim proizvodnim ekosistemima u savremenim fabrikama i preduzećima, koji sve više mogu da funkcionišu nezavisno i bez potrebe za nadzorom operatera. Postavlja se logično pitanje, šta bi se desilo kada bi se ova duboka kontrola koristila u zlonamerne svrhe? Proizvođači PLC sistema se bave ovim rizikom kroz prošireni skup mera za permanentno povećanje sajber bezbednosti kako bi adekvatno zaštitili kritične industrijske infrastrukture. To su protokoli za šifrovanje, alati za kontrolu pristupa, mehanizmi potvrde, verifikacije i autorizacije, tehnologije za otkrivanje upada itd. [19]. Još jedna fundamentalna tehnologija koja suštinski transformiše PLC aplikacije u modernoj industriji je 5G mreža. Mreže najnovije generacije omogućavaju bržu i pouzdaniju komunikaciju, razmenu i obradu podataka u realnom vremenu, kao i poboljšanu mobilnost. Zahvaljujući svojoj sposobnosti da brzo reaguju na dolazne tokove podataka i podržavajući bežičnu konekciju, 5G programabilni logički kontroleri pružaju veću fleksibilnost i odziv sistema industrijske automatizacije [20]. Integracija PLC tehnologije u komunikacione mreže pete generacije omogućava razvoj širokog spektra inovativnih rešenja u ovoj oblasti s primenama u proizvodnji, industriji, telekomunikacijama, sektorima energetike, petrohemije, rudarstva, vodosnabdevanja itd.

Među inovacijama koje se savršeno kombinuju s programabilnim logičkim upravljanjem su virtuelna i proširena stvarnost (virtual reality-VR/augmented reality-AR). Kroz ove tehnologije i specijalne uređaje za rad, kao što su VR/AR naočare i šlemovi, simulacije, obuka PLC-a, rešavanje problema i održavanje mogu se sprovesti lako, praktično i intuitivno. Obogaćujući fizički prostor digitalnim informacijama, timovi za održavanje mogu daljinski da pruže vizuelne smernice operaterima na terenu o tome kako da komuniciraju s novim ili nepoznatim uređajima [21].

4. Programabilni kontroleri u svetlu koncepcije pametne fabrike

Vizija pametne fabrike budućnosti uključuje inteligentne povezane senzore koji šalju informacije istovremeno i PLC-u i oblaku. Zahvaljujući platformama u oblaku, postaje moguće akvizicija, skladištenje i obrada tzv. velikih podataka (big data) – gigantske količine podataka koje kontinualno generiše inteligentna proizvodna oprema. Na osnovu analize zasnovane na oblaku, preventivna dijagnostika i prediktivno održavanje povezane opreme mogu se pokrenuti na nivou jednog uređaja ili čak

komponente. Kako tehnologija napreduje u ovoj oblasti, PLC-i mogu da šalju sve robusnije informacije koje uključuju podatke o performansama senzora i druge detalje o proizvodnim procesima. Na ovaj način, podaci sa PLC-a u kombinaciji sa senzorom i podaci sa drugih uređaja u polju mogu se integrisati zajedno kako bi se prikazala potpuna slika proizvodnog sistema. Razvijeni su pecijalizovani alati za analizu kako bi pomogli operaterima industrijskih objekata da optimizuju procese upravljanja resursima, delegiranja zadataka, logistike, snabdevanja i drugih uslova u cilju obezbeđivanja maksimalne efikasnosti proizvodnih procesa [14, 22].

Koncept Industrije 4.0 fokusira se na brzu i dinamičnu proizvodnju zasnovanu na odgovarajućoj mrežnoj arhitekturi za direktnu komunikaciju između uređaja u polju i usluga. PLC-i su sastavni deo ovog koncepta, tehnoloških platformi kao što je IIoT, kao i vizije pametne fabrike. Senzori, merni uređaji, radio-frekventni (RFID) čipovi, programabilni kontroleri, interfejsi ljudi-mašina (HMI), MES platforme za upravljanje proizvodnjom (Manufacturing Execution System) i planiranje resursa ERP (Enterprise Resource Planning) su nepresušni izvori podataka od ključnog značaja za preduzeće, kako na tehnološkom nivou tako i na nivou poslovnih procesa. U konvencionalnim upravljačkim arhitekturama u industrijskoj automatizaciji, zahtevi za podacima obično prate date događaje ili se pokreću ciklično i uvek odgovaraju na zahteve „odozgo“, tj. sa nivoa klijenta. Niži nivo tradicionalno funkcioniše kao server, gde se mogu zahtevati podaci od PLC-a, npr. o statusu mašine, ili se novi proizvodni programi mogu preneti na kontroler [22].

Prvi korak ka integraciji programabilne kontrole u platforme za realizaciju proizvodnje je pretvaranje električnih signala sa senzora u digitalne informacije. Nakon toga sledi slanje podataka na IT sloj MES platforme putem posebnih komunikacionih servisa. To je napredni softver kojim se mogu meriti i poboljšati dostupnosti, performanse i kvalitet procesa proizvodnje. Sa uvođenjem koncepta industrije 4.0 u praksu, striktno razlikovanje pojedinačnih nivoa i protok informacija od vrha do dna postepeno nestaje. U pametnoj mreži, svaki uređaj ili usluga može autonomno da pokrene komunikaciju s drugim uslugama. Moguća su tri glavna modela komunikacije-B2B, B2M i M2M komunikacija. U prvom scenariju business-to-business (B2B) postoje dva poslovna procesa koji međusobno komuniciraju, npr. ERP kao poslovni informacioni sistem i MES platforma. Razmena podataka između HMI i MES platforme, npr. između senzora i oblaka ili između dva odvojena modula MES sistema, može trajati od nekoliko milisekundi do nekoliko minuta. U B2M (business-to-machine) komunikaciji, poslovni proces u realnom vremenu komunicira s proizvodnim procesom u realnom vremenu. Primer za to je poslovna aplikacija koja razmenjuje informacije s mašinom. Vreme potrebno za uspostavljanje komunikacije npr. između HMI i PLC-a ili između MES-a i PLC-a opet može da varira od nekoliko milisekundi do nekoliko minuta [18]. Koncept M2M (machine-to-machine) komunikacije pokriva dva proizvodna procesa u kontekstu automatizacije koji međusobno razmenjuju podatke u realnom vremenu. Takav primer je kontroler robotskog sistema koji šalje upravljačke signale u horizontalnom pravcu ručnom robotskom kontroleru. Razmena se odvija u determinističkom ciklusu u realnom vremenu u rasponu od nekoliko mikrosekundi do nekoliko milisekundi. Drugi primer su dva kontrolera koji međusobno razmenjuju informacije horizontalno-brzo (u realnom vremenu), ciklično i nezavisno od Fieldbus mreža. Ovde determinizam igra ulogu kvaliteta usluge, a prisutni su i odgovarajući zahtevi za proces komunikacije. Definisani su garantovanim trajanjem procesa, npr. vremenom odziva od 100 ms. Termin M2M je već prilično popularan u oblasti mobilnih radio komunikacija gde M2M znači implementaciju interfejsne veze između uređaja putem mobilne komunikacije s datim IT procesima [18]. Za industrijsku automatizaciju razvijen je OPC UA (Open Platform Communications Unfaed Architecture) kao univerzalni jezik mašina u proizvodnom okruženju. Svrha mu je da poveže softverske sisteme višeg sloja s nižim slojevima. Sistemi viših

slojeva uključuju HMI ekrane, SCADA ili MES i ERP sisteme, dok su sistemi nižeg sloja PLC-i i distribuirani upravljački sistemi DCS (Distributed Control Systems). Zasnovan je na familiju protokola TPC/IC. Osnovne karakteristike ovog protokola su::

- Bezbednost – OPC UA je platforma prilagođena zaštitnom zidu (firewall) koja nudi različite nivoe šifririvanja, autentifikaciju, reviziju i korisničku kontrolu.
- Nezavisnost od platforme – OPC UA nije vezan ni za jedan specifični operativni sistem ili programski jezik. Nije zasnovan na Microsoft-ovim OLE (Object Linking and Embedding) i DCOM (Distributed Common Object Model). To znači da može da se koristi na različitim hardverskim platformama (PC hardver, serveri zasnovani na oblaku (cloud-based), itd.) i operativnim sistemima (Windows, Apple OSX, Linux (JAVA), Android i drugi).
- Proširivost – Iako je OPC UA već sada veoma koristan, on je sistem koji je veoma orijentisan ka budućnosti, postavljen tako da se razvija uz tehnologije sutrašnjice. Drugim rečima, dizajniran je da prihvati tehnologije koje će se razvijati u perspektivi, dok nastavlja da bude kompatibilan s postojećim proizvodima čak i dok su u fazi razvoja.
- Funkcionalna ekvivalentnost – OPC UA je proširenje originalne OPC tehnologije, koja se i dalje može lako integrisati u novi i poboljšani sistem.

S primenom IoT i Industry 4.0 standarda, komunikacija se više ne fokusira samo na čiste podatke i univerzalnu interoperabilnost komunikacionih sistema. Usredsređuje se na proces razmene informacionih modela. Ključni faktori za ovaj proces su integritet prenosa i sigurnost pristupa pojedinačnim informacijama ili uslugama. Svi ovi principi su ujedinjeni u jedinstvenoj OPC arhitekturi OPC UA. Zahvaljujući standardizovanoj konsolidaciji podataka, njihovoj strukturi i funkciji (meta-podaci), OPC UA je posebno pogodan standard za distribuirane inteligentne aplikacije između pojedinačnih mašina bez potrebe za centralizovanim upravljanjem ili višim nivoom inteligencije. OPC UA komponente su skalabilne i sada dostupne na nivou senzora [8, 18, 22].

Industrija 4.0 i IoT su koncepti koji zahtevaju visok stepen mrežne povezanosti i komunikacije između uređaja i usluga. Odlikuje ih potreba da se velike količine podataka šalju sa nivoa senzora na nivo IT sistema. Odgovarajući protokoli i standardi za kontrolu zasnovanu na računaru čine industriju 4.0 i IoT idealnim rešenjima za razmenu informacija na sličnom nivou. Drugi fundamentalni faktor koji doprinosi primenljivosti novih komunikacionih platformi je tzv. servisno orijentisana arhitektura (service-oriented architecture-SOA) i uloga PLC-a u njoj. Pristup PLC-u preko web servisa zapravo nije nova tehnologija. Postavlja se pitanje šta je suština inovacija u PLC proizvodima zasnovanim na SOA-i i koju dodatnu vrednost oni pružaju. Trenutno se razmena podataka između sistema na nivou MES-a i PLC-a obično odvija u okviru prilično dugotrajnog procesa. MES platforma šalje određeni skup podataka kontroleru koji najavljuje spremnost da ih primi. Nakon što su podaci primljeni, kontroler sam potvrđuje prenos. U PLC sistemima baziranim na SOA, slanje podataka kontroleru može se obaviti u jednom komunikacijskom aktu-vrednosti informacija se više ne prenose u okviru više transakcija, već se prihvataju kao jedna usluga sa ulaznim i izlaznim parametrima. Drugim rečima, OPC UA arhitektura daje pristup udaljenom RPC (remote procedure call) protokolu u programiranom funkcionalnom bloku samog kontrolera. Ovo značajno skraćuje komunikacione sesije između PLC-a i MES sistema i omogućava veću produktivnost zbog intenzivnije razmene podataka. Pored toga, ova konfiguracija dramatično smanjuje troškove inženjeringa komunikacione veze između procesa proizvodnje i upravljanja mrežom.

SOA-PLC koncept se razlikuje ne samo po podršci web servisa koji garantuje bezbednost preko VPN mreže. Uključuje mogućnosti za objektno orijentisanu komunikaciju podataka, dostupne za informacije u realnom vremenu i hronološke informacije, kao i za različite alarme i usluge zasnovane

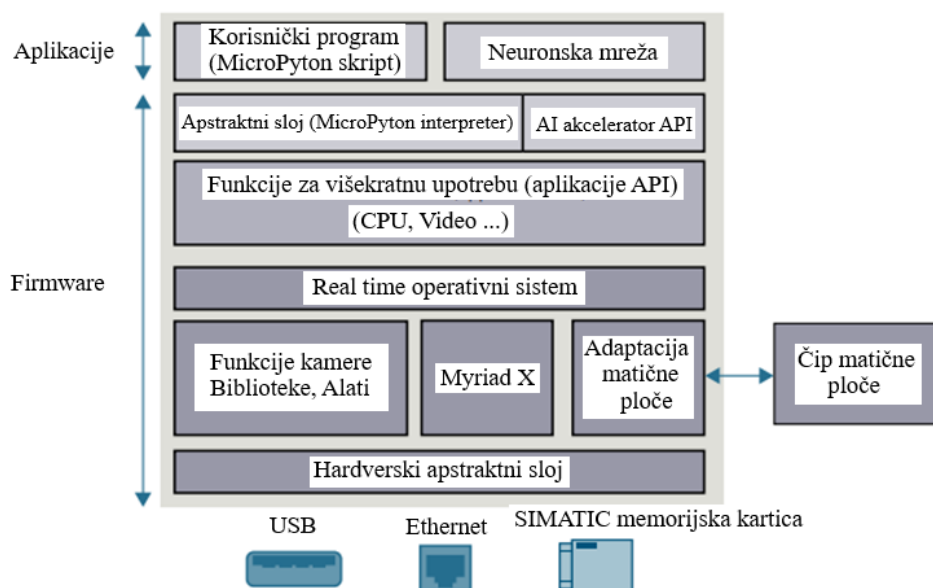
na međunarodnom IEC standardu. Ovo uključuje odgovarajuće metapodatke u vezi s potrebnim nivoom bezbednosti za odgovarajući nivo podataka i usluga. Danas, funkcija integracije između servera i klijenta u OPC UA arhitekturi ugrađena u programabilne kontrolere omogućava izgradnju inteligentnih mreža i istovremeno garantuje visok stepen bezbednosti s pravima pristupa mrežnim slojevima usluga. Takva arhitektura daje predvidljive rezultate s malim rizikom od pojave greške, ali se ispostavlja da je prilično glomazna u uslovima rada s naprednijim sredstvima industrijske automatizacije, koja zahtevaju mnogo veću fleksibilnost. IIoT platforme npr. zahtevaju upotrebu upravljačkih sistema koji mogu mnogo dublje da sarađuju. Pojedinačnim PLC kontrolerima su potrebne mogućnosti ne samo da funkcionišu u bliskoj saradnji jedni s drugima, već i s drugim sistemima u fabrici, kao i da mogu da komuniciraju eksterno npr. s platformom u oblaku. Još jedna karakteristika pametnih fabrika je sve raširenija primena distribuiranih upravljačkih rešenja na nivou mašina. Umesto korišćenja jednog PLC-a za upravljanje datom mašinom sa više aktuatora i robotskih manipulatora, upravljačke funkcije u realnom vremenu se distribuiraju arhitekturom na pojedinačne podsisteme. Sposobnost svakog kontrolera u mreži da komunicira sa ostalima i odražava eksterno generisane događaje, kao što su promene u nalogima klijenata, poboljšava vreme odgovora i ukupnu operativnu efikasnost. Zastoji se mogu značajno smanjiti „hot-plug“ zamenom I/O modula što omogućava PLC kontroleru da ograniči zadatke u radnom režimu, dok zadržava upravljačke funkcije preostalih podsistema tokom zamene. Interfejsi velike brzine kao što je USB omogućavaju brzu konfiguraciju i lako periferno proširenje PLC sistema. Međutim, nisu svi komercijalni konektori pogodni za industrijsku primenu. Zato se za ovu svrhu koriste specijalizovani modeli sa odgovarajućom zaštitom za industrijska okruženja, npr. sa stepenom zaštite IP67. Važan element zaštite savremenih PLC-a u platformama Industrije 4.0 je napajanje. Kako se PLC sistemi smanjuju u veličini, oni se prvenstveno oslanjaju na hlađenje konvekcijom, a ne na glomazne ventilatore. Efikasnost od 90% može se postići korišćenjem visoko integrisanih DC/DC pretvarača. Višefazni režim rada omogućava visoku efikasnost u širokom opsegu uslova opterećenja. Ovo zauzvrat omogućava PLC-u da isporučuje visoke izlazne struje kada je to potrebno za rad mašine, kao i da se lako prebaci na tihi režim koji štedi energiju [18, 22].

5. Programabilni kontroleri i veštačka inteligencija u Simatc okruženju

Veštačka inteligencija (artificial intelligence – AI) biće važna karakteristika projektovanja automatizacije u budućnosti. AI bi trebalo da igra ključnu ulogu u smanjenju napora programiranja i inženjeringa potrebnih za kreiranje rešenja za automatizaciju. Takođe čini upravljačku logiku agilnijom, a proizvodne procese fleksibilnijim i preciznijim – posebno u industriji. Npr. algoritmi za mašinsko učenje pomažu sistemima koji vrše vizuelne provere kvaliteta u proizvodnim pogonima ili robotskim sistemima vođenim slikama da reaguju mnogo fleksibilnije na neočekivane situacije i na nedostatke kvaliteta jer mogu automatski da reaguju u toku rada. Kao rezultat toga, oni rade mnogo efikasnije, jer se stručno znanje npr. u vezi s bojom, konzistencijom ili kvalitetom proizvoda ili procesa – može automatizovati.

Kompanija Siemens kao svetski lider industrijske automatizacije uveliko uvodi AI u sektor upravljačko-nadzornih sistema. U kontekstu Totali Integrated Automation (TIA), skalabilna rešenja od nivoa uređaja i opreme u polju do nivoa kontrolera i nivoa računarstva na ivici pa sve do oblaka biće moguća sa otvorenim IoT operativnim sistemom MindSphere. To znači da se AI rešenje može prilagoditi svom okruženju i ciljanoj primeni po potrebi, bilo na mašini ili za rešenja na svim mašinama ili čak celog postrojenja. Prvi važan korak za integraciju AI u okruženje automatizacije je novi S7-1500 TM NPU (Technology Module Neural Processing Unit) modul, čija je blok šema prikazana

na slici 4. Posebno je prikladan za primenu na uređaje u polju i gde god je potrebno donošenje pouzdanih i brzih odluka [23].



Slika 4. Blok šema modula S71500 TM NPU

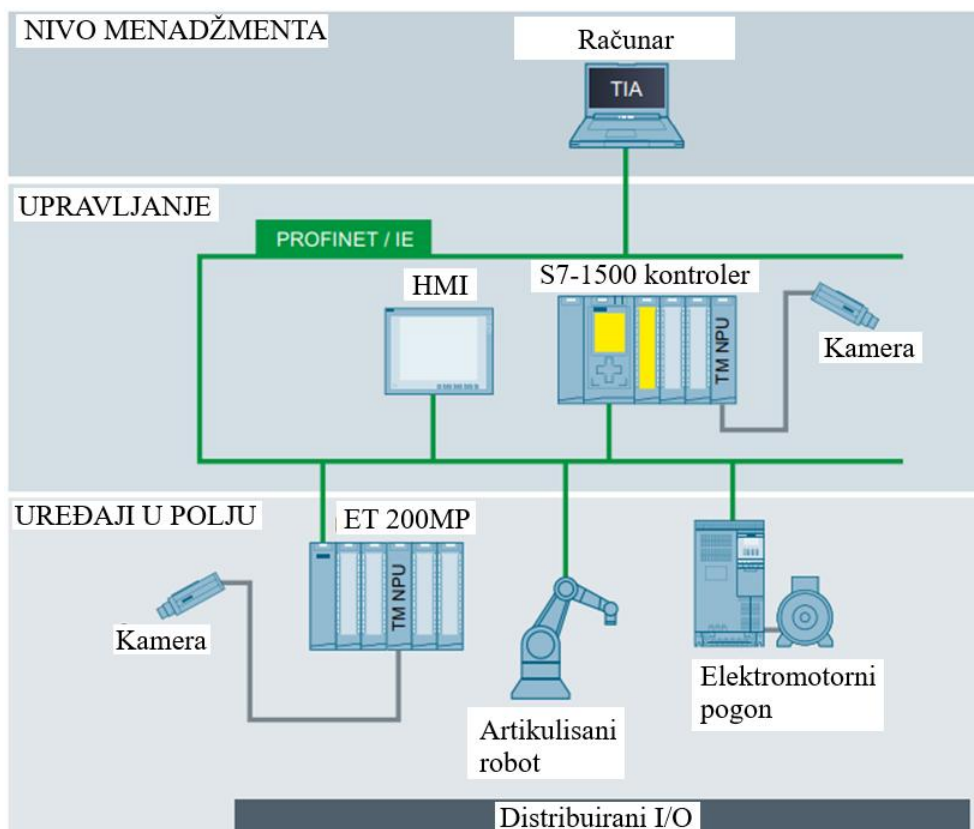
S novim S7-1500 TM NPU modulom za SIMATIC S7-1500 kontroler i ET 200MP I/O sistem, AI pronalazi svoj put u automatizaciji sa TIA platformom Simensa. Modul se može integrisati u SIMATIC sistem automatizacije, omogućavajući jednostavnu i profitabilnu kombinaciju AI algoritama i PLC logike. Tako se jeftine aplikacije koje koriste SIMATIC mogu implementirati na mašini zasnovanoj na veštačkoj inteligenciji. Pomenuti modul je opremljen čipom procesorske jedinice Myriad™s Vision kompanije Intel Movidius™ koji između ostalog, omogućava efikasnu obradu neuronskih mreža. TM NPU se može koristiti u sprezi s kontrolerom S7-1500 i ET 200MP distribuiranim I/O sistemom. Ovo omogućava skalabilna rešenja od nivoa u polju, edge nivoa, pa sve do nivoa upravljanja i oblaka. Modul omogućava procenu ulaznih podataka, kao što su video i procesni podaci, pomoću neurona mreže. Obrađuju se podaci povezanih kamera i podaci iz korisničkog programa CPU-a s velikom propusnošću podataka i velikom brzinom prenosa kroz neuronske mreže u TM NPU. Modul prenosi rezultat operacije obrade u CPU preko magistrale. CPU tada dozvoljava da se dalja evaluacija odvija u korisničkom programu. Tipična oblast primene je vizuelna provera kvaliteta u proizvodnim pogonima.

Prednosti upotrebe modula su:

- Manje opterećenje programiranja i inženjeringa
- Implementacija u fleksibilnim i preciznim proizvodnim procesima
- Pojednostavljena saradnja između informacione tehnologije IT i OT (operational technology - automatizacija)
- Isplativo rešenje jer sve isporučuje SIEMENS
- Dostupnost prilagođenih alata za AI
- Efikasna rešenja zahvaljujući niskim troškovima
- Rešenja zasnovana na iskustvu koja bi bilo teško implementirati s konvencionalnim algoritmima.

Slika 5 prikazuje upravljačko nadzorni sistem sa Simatic arhitekturom. TM NPU se može instalirati centralno iza S7-1500 CPU-a i periferno iza ET 200MP interfejs modula. Rešenje se takođe može proširiti prema potrebi u pogledu strukture količine i broja primenjivih aplikacija instaliranjem

više modula uzastopno. S7-1500 TM NPU modul radi pomoću obučenog neuronskog sistema na SD (Secure Digital) kartici. Korisnici mogu da povežu Gigabit Ethernet i USB 3.1 kompatibilne senzore kao što su kamere i mikrofoni na integrisane interfejse modula. Podaci CPU-a koji se prenose preko glavne magistrale mogu se takođe koristiti kao ulazni podaci. Rezultati obrade se zatim procenjuju pomoću programa u CPU.



Slika 5. Upravljačko-nadzorni sistem s primenom veštačke inteligencije

Upotrebom modula SIMATIC S7-1500 TM NPU omogućava se:

- Veća fleksibilnost

Zahvaljujući veštačkoj inteligenciji i algoritmima mašinskog učenja, modul čini čak i rukovanje nepoznatim objektima lakim–bez programiranja koje zahteva mnogo resursa.

- Viši kvalitet

Stručno znanje za brze i pouzdane provere kvaliteta se prenosi direktno na modul zahvaljujući obuci višeg nivoa neuronske mreže.

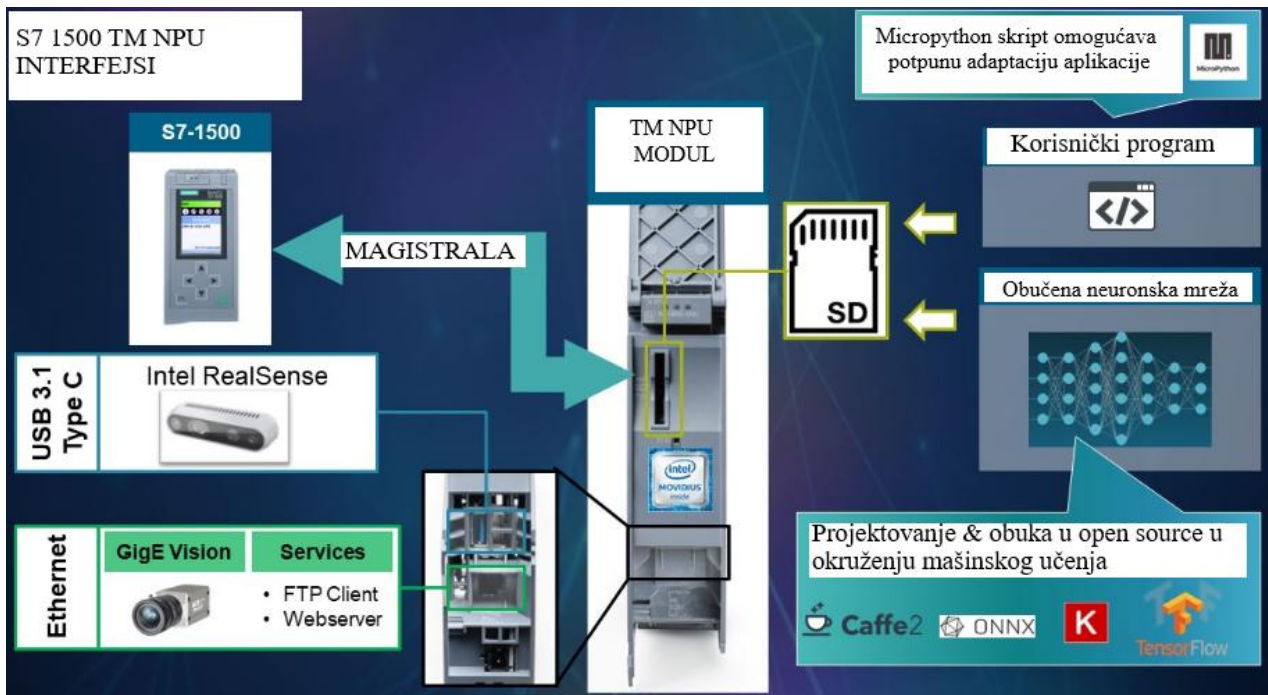
- Veća efikasnost

S modulom, mašine mogu fleksibilno i automatski da reaguju na situacije koje su zahtevale ručnu intervenciju, što smanjuje vreme zastoja i povećava dostupnost [24].

Dvosmerni transfer podataka u sistemu PLC S7 1500 – modul TM NPU dat je na slici 6. Početni koraci za pokretanje S7-1500TM NPU modula su:

- Podešavanje hardvera
- Povezivanje s PLC-om
- Podešavanje i konfiguracija kamere
- Podešavanje aplikacije u TIA portalu
- Konfiguracija hardvera
- PLC program
- Podešavanje aplikacije TM NPU

- Adaptacija Micropython skripta
- Adaptacija konfiguracije modula (npr. mrežna podešavanja).



Slika 6. Dvosmerni prenos podataka na relaciji PLC S7 1500 – modul TN NPU

Početak rada s TM NPU je strukturiran u 3 koraka:

- 1. Podešavanje TM NPU-a sa SIMATIC sistemom automatizacije (koristeći primer TM NPU aplikacije)
- 2. Kreiranje sopstvenog modela mašinskog učenja (za klasifikaciju ili detekciju objekata)
- 3. Konverzija i implementacija (obučenog) AI modela za zaključivanje na TM NPU.

Korak 1 vodi kroz postupak podešavanja TM NPU-a s pripremljenim primerom aplikacije, koji uključuje sve potrebne komponente i opise zasnovane na prethodno obučenoj neuronskoj mreži. Na ovaj način stiže se prvi utisak o tome kako se TM NPU modulom rukuje i radi pre nego što se preduzme sledeći korak u prilagođavanju aplikacije i korišćenju samokreirane i obučene neuronske mreže.

Korak 2 je tutorial za kreiranje i obuku sopstvenog AI modela za klasifikaciju ili detekciju objekata. Za ovaj korak služi Jupiter uputstvo koje vodi kroz neophodne postupke i pruža kod za obuku modela klasifikacije slika (Mobilenet) ili modela detekcije objekata (Mobilenet_SSD). Mogu se koristiti sopstveni podaci za ovaj primer ili koristiti obezbeđeni skup podataka. U zavisnosti od aplikacije koja se želi realizovati, prati se veza do primera klasifikacije ili detekcije objekata ispod.

Korak 3 opisuje kako se vrši konverzija i transfer obučene neuronske mreže na TM NPU. Ovde se može brati da li će se koristiti AI Model Deployer kao alat zasnovan na grafičkom korisničkom interfejsu za konverziju i konfiguraciju ili će se koristiti Intel OpenVINO, koji pruža veći stepen fleksibilnosti u pogledu slučajeva upotrebe koji se mogu realizovati po cenu veće složenosti.

Da bi se izvršila ova tri koraka, na Siemens Online Support stranici (SIOS) je dat primer aplikacije s dokumentacijom i listom potrebnih softverskih i hardverskih komponenti. Opisani koraci su dovoljni da se TM NPU pokrene sa osnovnim slučajem upotrebe klasifikacije, omogućavajući procenu dolaznih slika sa povezane kamere i slanje rezultata PLC-u. Zbog fleksibilnosti koju pruža Micropython skript, TM NPU se može koristiti ne samo za direktnu procenu slika, već pruža i mogućnost povezivanja sa FTP (File transfer protocol) serverom, npr. za čuvanje ili arhiviranje snimljenih slika

(ili opštih podataka) ili za ažuriranje pokrenute neuronske mreže tokom izvršavanja. Prilikom prilagođavanja Micropython skripta aplikaciji moguće je koristiti i integrisani web server, koji pruža detaljnije informacije i dijagnostiku, u svrhu otklanjanja grešaka. Primer aplikacije takođe uključuje opise za sledeće teme:

- Otklanjanje grešaka i dijagnostika sistema
 - TM NPU web server
 - Detaljna dijagnostika sistema
- FTP komunikacija
 - Podešavanje FTP server
 - Aktiviranje FTP klijenta u TM NPU
- Napredna funkcionalnost modula
 - Čuvanje slika na SD karticu ili FTP server
 - Metod ažuriranja za neuronsku mrežu [25].

6. Zaključak

PLC kontroleri su nezaobilazni elementi sistema industrijske automatizacije od početka moderne proizvodnje. Od tada je programabilno upravljanje doživelo značajan tehnološki razvoj. Svaka naredna generacija programabilnih kontrolera je pouzdanija, izdržljivija, fleksibilnija skalabilnija i jednostavnija za korišćenje u odnosu na svoje prethodnike. PLC deluje kao centralna procesorska jedinica za donošenje odluka u realnom vremenu o proizvodnim operacijama. Senzori putem mreže šalju podatke direktno u kontroler, koji automatski izdaje odgovarajuće komande izvršnim organima u zavisnosti od trenutnih potreba. Ovi kontroleri takođe služe kao interfejs na relaciji operater-mašina, povećavajući sigurnost interakcije između njih i stepen automatizacije sistema. Oni imaju lokalno uskladištene programe i logiku, što tradicionalno omogućava rad u odsustvu mrežne komunikacije. Na taj način mašina nastavlja da izvršava komande kontrolera, pri čemu je nezavisna od kvarova u komunikaciji. Na kraju, ali ne i najmanje važno, načini rada PLC-a su zasnovani na ulaznim podacima koje mu šalju senzori povezani s kontrolerom. Izlazne komande se zasnivaju isključivo na ulaznim podacima, tako da situacije van mašine gotovo da nemaju uticaja na rad kontrolera. Savremeni PLC-i su u stanju da čitaju višestruke dolazne tokove podataka iz različitih izvora i da budu programirani složenom logikom koja omogućava precizno izvršavanje složenih sekvenci. Oni mogu da obrađuju hiljade ulaznih i izlaznih signala gotovo istovremeno, čak i u teškim radnim uslovima tipičnim za industrijsku proizvodnju, npr. pri ekstremnim temperaturama. Kontroleru su zaštićeni odgovarajućim kućištem sa industrijskim sigurnosnim stepenom zaštite čime se omogućava korišćenje u agresivnim sredinama s visokim nivoom prašine i zagađenja. Da bi se smanjile ili eliminisale električne smetnje, obezbeđena je posebna izolacija uređaja što je posebno važno u prisustvu osetljivih senzora i procesa koji zahtevaju precizno praćenje i adekvatno upravljanje. Integracija veštačke inteligencije s PLC-ima je od izuzetnog značaja za razvoj automatizacije, omogućavajući sistemima da dinamički prilagođavaju operacije na osnovu povratnih informacija u realnom vremenu. Veštačka inteligencija je nova realnost u proizvodnom sektoru. Uz pomoć veštačke inteligencije preduzeća koriste enormne količine podataka sa pametnih senzora postižući izuzetan napredak u pogledu upravljanja, produktivnosti i energetske efikasnosti. PLC-i u sprezi s veštačkom inteligencijom olakšavaju prediktivno održavanje, preventivno identifikujući probleme vezane za opremu kako bi se smanjilo vreme zastoja i poboljšala ukupna operativna efikasnost. Uključivanje mera sajber bezbednosti postaje sve važnije za zaštitu kritičnih industrijskih procesa od potencijalnih pretnji. Obezbeđivanje robusnih PLC pro-

tokola za sajber bezbednost je suštinski značajno za održavanje integriteta i bezbednosti automatizovanih sistema suočenih s rastućim rizicima od sajber pretnji i napada. Poslednjih godina industrija je preplavljena enormnom količinom podataka, glavnom valutom digitalizovanog sveta. Tempo kojim se razvijaju senzori i IIoT platforme, digitalni blizanci, metaverzum, 5G i blockchain tehnologije, računarstvo na ivici, računarstvo u oblaku i itd. bili su nezamislivi do pre jedne decenije. Danas, zahvaljujući ovim inovacijama, pametne fabrike praktično „oživljavaju“ sa svojim jedinstvenim čulima, inteligencijom i autonomnim funkcijama.

7. References

- [1] *** <https://www.plctechnician.com/news-blog/evolution-plcs>
- [2] **Stankov P. S.**, Modern Concepts of Supervisory Control Systems Based on PLC and SCADA Configuration, Part of the book *New Trends in Engineering Research 2024*, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-78635-8_24, Publisher: Springer, Cham. Vol. 1216, 2024.
- [3] *** https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-78635-8_24
- [4] *** <https://www.c3controls.com/white-paper/history-of-programmable-logic-controllers/>
- [5] *** <https://www.se.com/id/en/product-subcategory/3950-pac-programmable-automation-controllers/>
- [6] *** <https://www.emerson.com/en-us/automation/control-and-safety-systems/programmable-automation-control-systems>
- [7] *** <https://www.verifiedmarketreports.com/blog/top-7-trends-in-plc/>
- [8] *** <https://rlconsultinginc.com/the-future-of-plc-programming-trends-and-innovations-shaping-the-industry/>
- [9] **Stankov P. S.**, Razvoj upravljačko nadzornih sistema—izazovi i tendencije, časopis „Bakar”, ISSN: 0351–0212, Izdavač: Institut za rudarstvo i metalurgiju, Bor, 2021, Vol. 46, No. 2, str. 43–56.
- [10] *** <https://www.plctechnician.com/news-blog/latest-advancement-plc-technology>
- [11] *** <https://www.futuremarketinsights.com/reports/programmable-logic-controller-market>
- [12] **Stankov P. S.**, Sistem nadzora i upravljanja postrojenjem za prečišćavanje vode, časopis „Vodoprivreda”, broj 4 - 6, 2018, ISSN 0350-0519, Izdavač: Srpsko društvo za odvodnjavanje i navodnjavanje, Beograd, Vol. 50, str. 319–332.
- [13] *** http://www.vodoprivreda.net/wp-content/uploads/2019/01/13-Stanko-Stankov_R.pdf
- [14] *** <https://www.plantautomation-technology.com/articles/green-plcs-sustainability-and-energy-efficiency-in-the-fourth-industrial-revolution>
- [15] *** <https://medium.com/@mbruce1982/the-evolution-of-plc-programming-in-the-age-of-cloud-computing-and-advanced-processing-e0619d19504f>
- [16] **Stankov P. S.**, Big Data in Water Supply and Sewerage System, journal *Acta Technica Corviniensis—Bulletin of Engineering*, ISSN: 2067–3809, Publisher: University Politehnica Timisoara, Faculty of engineering Hunedoara, Romania, Tome XV, Fascicule 1 [January–March], 2022, pp. 21–25.
- [17] *** <https://acta.fih.upt.ro/pdf/2022-1/ACTA-2022-1-03.pdf>
- [18] *** <https://www.linkedin.com/pulse/future-plc-technology-emerging-trends-innovations-solutions>
- [19] *** https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf
- [20] *** <https://www.datainsightsmarket.com/reports/programmable-automation-controllers-60742>

- [21] **Stankov P. S.**, Automation and Industry 4.0, journal Acta Technica Corviniensis–Bulletin of Engineering, ISSN: 2067-3809, Publisher: University Politehnica Timisoara, Faculty of engineering Hunedoara, Romania, Tome XIV, Fascicule 2 [April–June], 2021, pp. 59-63.
- [22] *** <https://acta.fih.upt.ro/pdf/2021-2/ACTA-2021-2-10.pdf>
- [23] **Stankov P. S.**, Security and protection of supervisory control systems in light of industry 4.0, 19th International Conference Man and Working Environment-Occupational and Environmental Safety Engineering & Management (OESEM), Proceedings, ISBN 978-86-6093-112-4, Publisher: Faculty of Occupational Safety, University of Niš, November, 24–25. 2022 pp. 299–306.
- [24] *** <https://www.znrfak.ni.ac.rs/oesem2022/assets/Proceedings/OESEM%202022%20Conference%20Proceedings.pdf>
- [25] **Zhang Yue, Liu Weizhe, Fang Zhengzheng, Wang Xize, Wang Xiaoying, Ma Shuai**, Research and practice of 5G virtualization PLC technology, Information and Communications Technology and Policy, Mobile Research Institute, Beijing 100053, China, DOI: 10.12267/j, Vol. 49, ISSN: 2096-5931, Issue (11), 2023 pp. 8–17.
- [26] *** <https://www.travancoreanalytics.com/ar-vr-in-industrial-automation/>
- [27] **Stankov P. S.**, The digital factory–present and future, XIV International conference Industrial engineering and environmental protection (IIZS 2024), Proceedings, DOI: 10.46793/IIZS24.140S, Publisher: Technical faculty „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin, Serbia, October 3–4. 2024, pp. 140–148.
- [28] *** <https://unicloud.kg.ac.rs/index.php/s/fpbqY49b5o9Yr5B>
- [29] *** https://cache.industry.siemens.com/dl/files/877/109765877/att_979771/v3/S71500_tm_npu_manual_en-US_en-US.pdf
- [30] *** <https://docs.industrial-operations-x.siemens.cloud/r/en-us/2.0/deploy-ai-to-simatic-s7-1500-tm-npu/s7-1500-tm-npu-application-setup>
- [31] *** https://cache.industry.siemens.com/dl/files/167/109744167/att_1289050/v1/simatic-st70-complete-english-2024.pdf