

ANALIZA I PRIMENA OPC UA ZA DIGITALNU TRANSFORMACIJU MAŠINE ZA BRIZGANJE PLASTIKE**ANALYSIS AND IMPLEMENTATION OF OPC UA IN THE DIGITAL TRANSFORMATION OF AN INJECTION MOLDING MACHINE**

Milica Milić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U okviru ovog rada obrađena je primena OPC UA specifikacije u industriji prerade plastike, kako bi se implementiralo proizvodno postrojenje u skladu sa karakteristikama postavljenim Industrijom 4.0. Tema rada obuhvata konfigurisanje OPC UA servera primenom EUROMAP 77 informacionog modela, kao i testiranje bezbednosnih aspekata OPC UA na primeru mašine za brizganje plastike. Predstavljene su ključne prednosti OPC UA u odnosu na klasičnu implementaciju proizvodnog postrojenja.

Ključne reči: OPC UA, Industrija 4.0, Mašina za brizganje plastike, Industrijska komunikacija, Distribuirani računarski upravljački sistemi

Abstract – This work addresses the application of the OPC UA specification in the plastic processing industry, aiming to implement a production facility in accordance with Industry 4.0 principles. The scope of the paper includes the configuration of the OPC UA Server using the EUROMAP 77 information model, as well as the evaluation of OPC UA security aspects on the example of an injection molding machine. The key advantages of OPC UA compared to traditional production plant implementations are presented.

Keywords: OPC UA, Industry 4.0, Injection Molding Machine, Industrial communication, Distributed control systems

1. UVOD

Razvoj novih tehnologija otvorio je puteve ka uspostavljanju novog industrijskog okruženja, koje se definiše terminom Industrija 4.0. Ovaj termin se odnosi na tehnološke promene na nivou proizvodnih postrojenja, koje su zasnovane na savremenim tehnologijama, poput interneta stvari, mašinskog učenja i veštačke inteligencije, a koje treba da ostvare pametnu proizvodnju, u potpunosti okrenutu tržišnim zahtevima. Kompleksnost proizvodnog postrojenja se ogleda u velikom broju mašina, hardverskih uređaja, kao i softvera, različitih proizvođača i nivoa složenosti. Kako bi se obezbedilo skalabilno i fleksibilno proizvodno postrojenje, neophodna je ostvariti uniformnu i transparentnu komunikaciju između ovih različitih komponenata. Brojne arhitekture, poput RAMI 4.0,

izdvajaju OPC UA specifikaciju kao ključnu tehnologiju koja, prema svojim karakteristikama standardizovane, platformski nezavisne i bezbedne komunikacije, obezbeđuje ostvarivanje fleksibilne, adaptivne i transparentne proizvodnje [1]. Podaci unutar čitavog postrojenja se prikupljaju i pothranjuju OPC UA server, kojem klijenti, odnosno različite komponente postrojenja, pristupaju radi čitanja, pisanja, čuvanja i manipulacije podataka.

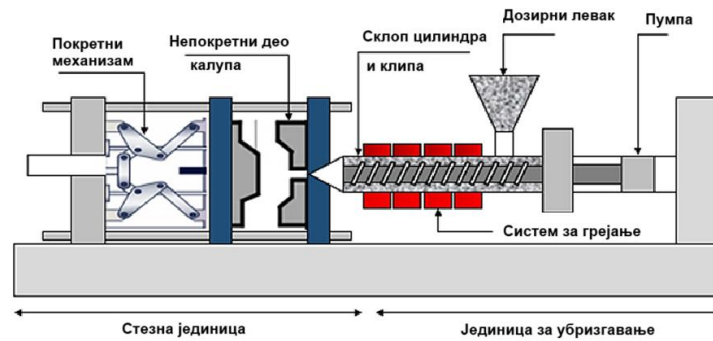
U industriji prerade plastike, mašina za brizganje plastike ima ulogu u proizvodnji plastičnih proizvoda predefinisanih oblika. OPC UA se u ovoj industriji izdvaja kao tehnologija za praćenje rada postrojenja u realnom vremenu i planiranje poslovnih procesa, a sama integracija ove mašine u okruženje pametne fabrike je omogućena i znatno olakšana uvođenjem EUROMAP standarda, koji uniformiše OPC UA informacione modele i interfejse za komunikaciju sa drugim mašinama i softverima [2].

2. AUTOMATIZACIJA U INDUSTRIJI PRERADE PLASTIKE

Proces prerade i dobijanja proizvoda od plastike je kompleksan i odvija se u više faza uz integraciju velikog broja mašina, koje svojom interoperabilnošću održavaju skladan i nesmetan rad čitavog postrojenja. Mašina za brizganje plastike (eng. *Injection Molding Machine*) je specijalizovana namenska mašina za obradu ovog materijala. Primenjuje se za potrebe masovne proizvodnje plastičnih predmeta i delova predefinisanih oblika ubrizgavanjem otopljenе plastične materije u prethodno specificirane i dizajnirane kalupe.

Funkcionalno, mašina se posmatra kroz dve jedinice sa svojim podprocesima, odnosno upravljačkim petljama, dok se sam proces dobijanja plastičnog proizvoda u nekoliko faza. Funkcionalne celine mašine za brizganje plastike čine jedinica za ubrizgavanje i stezna jedinica. Faze u ciklusu proizvodnje su redom: faza doziranja i plastifikacije, faza ubrizgavanja, faza ulivanja u kalup i hlađenje i konačno, faza izbacivanja radnog komada iz kalupa. Na Slici 1 predstavljen je strukturni pregled mašine za brizganje plastike, sa označenim njenim najvažnijim delovima. Jedinica za ubrizgavanje je zadužena za zagrevanje i topljenje plastične mase, odnosno granulata, koji se dozira u sklop cilindra i klipa kroz dozirni levak i zatim se ta otopljenа smesa pod pritiskom istiskuje u kalup kroz nepovratni ventil pomera-

NAPOMENA: Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Darko Čapko, red. prof.



Слика 1. Структурни приказ машине за бризгање пластике [3]

njem klipa (zavojnog vretena). Tokom ovog procesa, PLC upravlja pritiskom i temperaturom, ali kontroliše i količinu plastike koja ulazi u kalup, kao i položaj klipa. Stezna jedinica je zadužena za oblikovanje otopljene plastične mase. Prilikom brizganja, kalup je zatvoren zahvaljujući pokretnom mehanizmu, odnosno hidrauličkoj pumpi, koja obezbeđuje optimalnu vrednost pritiska držanja, kako bi kalup ostao zatvoren tokom oblikovanja. Tom prilikom, plastika se hladi usled razmene temperature sa zidovima kalupa, učvršćuje se i nakon određenog vremena, pumpa otpušta pritisak i gotov proizvod biva izbačen iz kalupa. Tokom jednog ciklusa proizvodnje, PLC deluje obrađuje informacije sa senzora i tajmera, na osnovu kojih deluje na motore, pumpe i druge aktuatorе u okviru mašine.

2.1. Piramida industrijske automatike u industriji prerade plastike

Tradicionalna implementacija industrijskog proizvodnog postrojenja zasnovana je na konceptu piramide industrijske automatike. Piramida automatike je vizuelni koncept, odnosno teorijski model koji definiše pet nivoa unutar automatizovanog postrojenja i ilustruje integraciju različitih tehnologija u cilju uspostavljanja kontinuiranog rada postrojenja. Dizajnirana je tako da bude univerzalna i primenjiva na širok spektar procesa. Na Slici 2 prikazani su nivoi piramide automatike. Prva tri nivoa čine nivo operativnih tehnologija, dok su poslednja dva deo nivoa informacionih tehnologija, te se stoga i načini komunikacije između ovih tehnologija razlikuju.



Слика 2. Пирамиде индустријске аутоматике [4]

Senzori i aktuatori čine nivo 0, dok se PLC nalazi na nivou automatskog upravljanja. Postrojenje za preradu plastike

podrazumeva interakciju velikog broja mašina za brizganje plastike i drugih mašina, te da bi se kontrolisao čitav rad postrojenja, na nivou 2 nalazi se SCADA sistem, koji preko kontrolera prikuplja procesne parametre sa senzora i aktuatora i prikazuje ih na centralizovanom računaru. Nivoi 3 i 4 predstavljaju viši nivo postrojenja, koje čine MES i ERP softveri. Na tom nivou prati se stanje mašina, otkazi i planira se remont, ali se vrši i planiranje proizvodnje, dopremanje materijala i transport gotovih proizvoda.

Komunikacija na nivou operativnih tehnologija uobičajeno je zasnovana na nekom od *Fieldbus* protokola, koji omogućavaju povezivanje procesne instrumentacije i industrijskih računara u digitalnu komunikacionu mrežu. Predstavnik ove grupe protokola, koji je ujedno najrasprostranjeniji u industriji je *Modbus* protokol. Pored ovog, u industriji su zastupljeni i mnogi drugi protokoli, razvijani od strane različitih proizvođača industrijske opreme, poput *S7* protokola kompanije Siemens. Nedostatak ovih protokola jeste striktna vezanost za proizvođača, što ih čini nekompatibilnim sa opremom drugih proizvođača usled razlika u implementaciji. Podaci, koji imaju ključni značaj za razvoj i održavanje procesa, razmenjuju se sa višim nivoima piramide, gde se obrađuju u okviru MES i ERP sistema. Na ovom nivou komunikacije, uočavaju se nedostaci *Modbus* protokola, obzirom da njegova implementacije ne obuhvata bezbednosne mehanizme, što sa stanovišta kritičnosti opreme i procesa može imati nenadoknadive posledice. Rešenje bezbednosnih nedostaka i nestandardizovane komunikacije tradicionalnih postrojenja nalazi se u OPC UA specifikaciji. OPC UA se može posmatrati kao pokušaj destrukuiranja piramide industrijske automatike i uniformisanja komunikacije između uređaja i komponenata različitih nivoa. Rešenje je bazirano na servisnoj arhitekturi i posebnom informacionom modelu, kao nivou apstrakcije koji omogućava pojednostavljen i bezbedan pristup i manipulaciju procesnim podacima.

2.1. Industrija 4.0 i OPC UA

Termin Industrija 4.0 skovan je u Nemačkoj 2011. godine i odnosi se na novi industrijski model, koji podrazumeva transformaciju proizvodnih procesa sa centralizovanog na decentralizovani model upravljanja, u okviru kojeg pojedinačne mašine, putem prikupljenih i obrađenih podataka, mogu donositi autonomne odluke, što otvara puteve ka uspostavljanju personalizovane, fleksibilne i efikasne proizvodnje, koja je prilagođena zahtevima tržišta

i korisnika [5]. Tehnologija koja je postavila temelje Industrije 4.0 je IIoT, i omogućila je povezivanje senzora, aktuatora, opreme i mašina u informacionu mrežu, čime je olakšana komunikacija i omogućena brza razmena podataka u realnom vremenu.

Razvijen je veliki broj decentralizovanih arhitektura kako bi se olakšala razmena podataka, među kojima se izdvaja RAMI 4.0, koja OPC UA definiše kao jedan od komunikacionih standarda Industrije 4.0. Ovaj protokol omogućava semantički uniformnu i bezbednu razmenu podataka između uređaja različitih proizvođača, čineći PLC integralnim delom IIoT ekosistema. Standardizacija komunikacije smanjuje troškove integracije, ubrzava implementaciju novih rešenja i omogućava veću fleksibilnost u razvoju pametnih fabrika.

OPC UA je platformski nezavisan, IEC 62541 standard otvorenog koda za razmenu podataka. Fleksibilnost OPC UA ogleda se u mogućnosti jednostavnog prikupljanja procesnih podataka, monitoringa, kontrole i analize istih, što se ostvaruje standardizovanom reprezentacijom podataka kroz informacioni model. Pored toga, OPC UA komunikacija je bezbedna, uključujući autentifikaciju, autorizaciju, enkripciju i kontrolne sume i otvorena je za integraciju i kombinovanje sa drugim standardima [1]. Ovaj komunikacioni standard zasnovan je na servisno-orijentisanoj arhitekturi, i putem ugrađenog informacionog modela, definiše osnovna pravila razmene informacija i odgovarajuće interfejske.

3. ANALIZA PRIMENE OPC UA U INDUSTRIJI PRERADE PLASTIKE

3.1 Testiranje OPC UA informacionog modela

OPC UA koristi objektno-orijentisano modelovanje koje omogućava hijerarhijsku organizaciju podataka kroz čvorove i adresne prostore. Na taj način se svi relevantni podaci sa mašine, poput temperatura grejača, pozicije klipa, statusa ciklusa obrade, alarmi i slično, predstavljaju na struktuiran i standardizovan način. Ove podatke OPC UA server prikazuje u struktuiranom modelu podataka, gde svaki parametar ima svoje ime, jedinicu mere, trenutnu vrednost, kao i meta-informacije i na taj način svi OPC UA klijenti mogu da im pristupe na jednoobrazan način i da njima manipulišu. Klijentska aplikacija može biti PLC druge mašine, SCADA, kao i MES i ERP aplikacije.

EUROMAP standardi omogućavaju integraciju mašina različitih tipova i proizvođača kroz standardizovane interfejske i informacione modele, čime se smanjuje kompleksnost uspostavljanja i implementacije proizvodnog postrojenja. Među trenutno objavljenim standardima, izdvaja se EUROMAP 77, koji opisuje jedinstvene interfejske za razmenu podataka između mašina za brizganje plastike i MES sistema različitih proizvođača.

Implementacija informacionog modela zasnovanog na EUROMAP 77 standardu, eksperimentalno je testirana pomoću softvera *KeStudio* kompanije *Keba* i korišćenjem softvera *UaExpert*, OPC UA test klijenta opšte namene,

koji podržava vizuelni pristup podacima. PLC, koji upravlja mašinom za brizganje plastike, konfigurisan je pomoću okruženja *KeStudio*, tako da OPC UA server implementira informacioni model prema definisanom standardu, koji omogućava MES sistemu da direktno pristupa njegovim varijablama. Na PLC kontoleru je kroz blok dijagram (*FBSimulateIMMProcess*) simuliran rad mašine, i to redom faze doziranja i plastifikacije, ubrizgavanja, ulivanja u kalup, hlađenja i fazu izbacivanja komada iz kalupa. Varijable koje figurišu u simulaciji su *MoldIsOpen* i *MoldIsClosed*, koje se odnose na položaj kalupa i govore da li je formiranje proizvoda u toku ili ne, kao i *EjectorIsForward* i *EjectorIsBackward*, koje se odnose na položaj klipa i ujedno su definisane kroz EUROMAP standard. Ove varijable se na uniforman način izlažu klijentima, te se njihove vrednosti mogu čitati i menjati direktno na PLC-u, tokom simulacije, ali od strane klijenata. Za vizualizaciju serverskih varijabli i čitanje njihovih vrednosti korišćen je *UaExpert* test klijent. Prvi korak jeste uspostavljanje konekcije između OPC UA klijenta i servera na osnovu URL adrese krajnje tačke, uz odabir odgovarajuće bezbednosne politike i bezbednosnog nivoa. Po uspostavljanju konekcije, klijent pristupa hijerarhijski organizovanom adresnom prostoru servera, gde svaki od čvorova sadrži podčvorove i attribute definisane u skladu sa standardom. Na ovom primeru, prikazano je konfigurisanje serverskih varijabli na dva načina, kroz aplikativni program na PLC kontroleru, koje se ažuriraju tokom upravljanja procesom i na taj način prikazuju klijentima, koji im pristupaju i koji ujedno slanjem zahteva mogu menjati stanje istih tih varijabli.

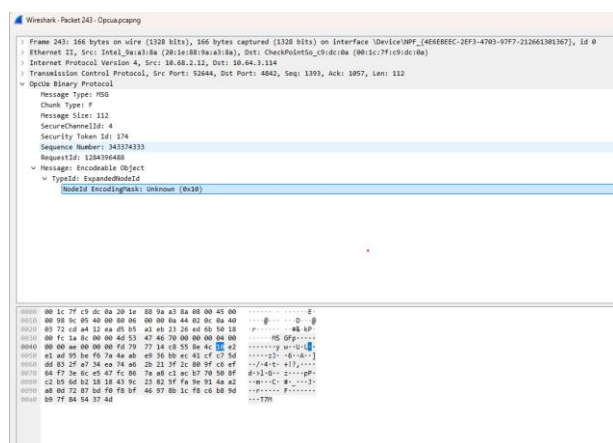
3.2 Testiranje bezbednosnih karakteristika OPC UA komunikacije

Bezbednosne karakteristike OPC UA komunikacije analizirane su na studiji slučaja, gde ERP sistem upravlja dvema mašinama za brizganje plastike - jednom koja proizvodi flaše i drugom koja proizvodi čepove. Testiranje je odrađeno korišćenjem softvera *Wireshark*, besplatnog alata za analizu mrežnog saobraćaja. OPC UA klijent i server su implementirani u programskom jeziku C pomoću biblioteke *open62541*, biblioteke otvorenog koda koja implementira OPC UA protokol.

Strukturu sistema čine ERP klijent, koji planira proizvodnju i šalje nalog ka mašini, zatim PLC, koji je ugrađen u mašinu za brizganje plastike i implementira OPC UA server i klijentima izlaže varijable i metode, kao i HMI panel, lokalni interfejs operatera koji sa PLC-om komunicira putem *Modbus* i OPC UA protokola. Na PLC-u se nalaze i komponente vezane za fizičke prekidače i sigurnosne elemente, koju server implementira kao *KeySwitch* varijablu. Ova varijabla definiše režim rada, odnosno da li je upravljanje lokalno ili daljinsko. ERP šalje PLC kontroleru proizvodni zahtev, koji sadrži broj komponentata koje treba proizvesti. Preko OPC UA klijenta se upisuju vrednosti u varijable *TargetQuantity*. PLC proverava stanje varijable *KeySwitch*, u zavisnosti od koje ERP može ili ne može

pokrenuti proces proizvodnje. Server u ovom slučaju prikazuje *KeySwitch* i *TargetQuantity* varijable, definisane unutar njegovog adresnog prostora.

Komunikacija na nivou HMI panela i PLC-a koja je uspostavljena pomoću *Modbus* protokola, iako brza, jednostavna i robusna, i kao takva široko rasprostranjena u industriji, testiranjem pomoću *Wireshark-a* pokazala se kao nebezbedna, obzirom da se poruke ne enkriptuju, jasno su čitljive i ne podržava autentifikaciju korisnika, te je podložna presretanju i manipulacijama. Sa druge strane, OPC UA podržava *None*, *Sign* i *Sign and Encrypt* nivo bezbednosti, što je takođe eksperimentalno testirano pomoću *Wireshark-a*. *None* nivo enkripcije poruke izlaže kao neenkriptovane i jasno čitljive, međutim sama komunikacija se može nadograditi *Sign and Encrypt* nivoom. Komunikacija koja podrazumeva ovaj nivo enkripcije prikazana je na Slici 3. Poruke su u enkriptovanom, nečitljivom binarnom formatu i na taj način se u složen i kritičan industrijski sistem uvodi visok nivo bezbednosti i zaštita podataka od neovlašćenih pristupa.



Slika 3. OPC UA Sign and Encrypt nivo enkripcije

4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad prezentuje ključne karakteristike Industrije 4.0 i značaj OPC UA, kao centralne specifikacije koja obezbeđuje interoperabilnu, uniformnu, skalabilnu i bezbednu razmenu podataka u okviru novog industrijskog okruženja. Njena primena u industriji prerade plastike, konkretno na mašini za brizganje plastike, predstavlja primer koji je obrađen u radu, na kome se uočavaju prednosti informacionog modelovanja podataka postrojenja za ostvarivanje komunikacije između OPC UA klijenta i servera. Informacioni model, predstavljen kroz *UaExpert*, prikazuje uniformne podatke sa servera, kojima se direktno može manipulirati. Podaci se ujedno konfigurišu u programu *KeStudio* direktno na PLC-u, na kome je implementiran OPC UA server. Standardizacija kroz EUROMAP u ovoj oblasti je od ključnog značaja za jednostavnu implementaciju Industrije 4.0. Razvoj industrijskih komunikacionih protokola pokazuje jasnu evoluciju od jednostavnih, ali nesigurnih rešenja poput

Modbus-a, ka naprednijim i sigurnim standardima kao što je OPC UA. Implementacija OPC UA servera i klijenta

pomoću *open62541* biblioteke u C jeziku pokazuje da je ovaj protokol fleksibilan i dovoljno jednostavan za integraciju i na ugrađenim sistemima, ali i dovoljno robusan za velike industrijske sisteme. Primer sa varijablom *KeySwitch* jasno demonstrira kako se fizički elementi mašine (prekidači, tasteri) mogu preslikati u OPC UA adresni prostor i učiniti dostupnim višim slojevima sistema. Time se postiže potpuna transparentnost između fizičkog sloja i ERP sistema, što je osnov za digitalizaciju i Industriju 4.0. Bezbednosni aspekti posebno dolaze do izražaja prilikom poređenja *Modbus-a* i OPC UA. Analiza komunikacije pomoću *Wireshark* alata pokazuje da *Modbus* šalje sve podatke u vidu čistog teksta, bez enkripcije ili autentifikacije, što ga čini podložnim prisluskuivanju i manipulaciji. OPC UA poruke sa aktivnom enkripcijom prikazuju se samo kao šifrovani binarni blokovi. Time se obezbeđuje poverljivost, integritet i autentifikacija – osobine koje su u modernim industrijskim okruženjima nužne.

Sve navedene karakteristike ukazuju na to da OPC UA predstavlja budućnost industrijske komunikacije, jer u isto vreme obezbeđuje interoperabilnost, fleksibilnost i visok nivo bezbednosti. Integracijom OPC UA servera u PLC, mogućnošću jednostavne implementacije pomoću biblioteka, kao što je *open62541*, te podrškom za ERP sisteme, industrija dobija jedinstveno komunikaciono rešenje koje prevazilazi ograničenja starijih protokola.

5. LITERATURA

- [1] M. Schleipen, H. S. Gilani, T. Bischoff, and J. Pfrommer, 'OPC UA & Industrie 4.0 - Enabling Technology with High Diversity and Variability', *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 315–320, 12 2016.
- [2] A. Martins, B. M. L. Silva, H. Costelha, C. Neves, J. Lyons, and J. Cosgrove, 'An approach to integrating manufacturing data from legacy Injection Moulding Machines using OPC UA', 09 2021.
- [3] F. Tayalati, I. Boukrouh, A. Azmani, and M. Azmani, 'Implementation of Digital Twin and Deep Learning for Process Monitoring: Case Study in Injection Molding Manufacturing', 08 2024, p. 8.
- [4] M. R. Ristanović, 'Arhitektura sistema industrijske automatike', Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2020, p. 3–4.
- [5] O. Antons, J. C. Arlinghaus, 'Distributed control for industry 4.0 - a comparative simulation study', *IFAC-PapersOnLine* 54 (1) (2021) 516–521, 17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2021.

Kratka biografija:



Milica Milić rođena je u Kragujevcu 2000. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Računarstvo i automatike odbranila je 2023.god. kontakt: mmilica034@gmail.com