

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

Referenčni arhitekturni model pametne tovarne RAMI 4.0

Poročilo timskega dela pri predmetu Pametne tovarne na Magistrskem
študijskem programu druge stopnje – Proizvodno strojništvo

Matic Čelofiga, Leon Čepin

Ljubljana, november 2025

Kazalo

Kazalo slik	iv
Uvod	5
1 Kratek povzetek prebranega članka.....	6
2 Analiza članka	7
2.1 Predstavitev avtorja in revije	7
2.2 Tema, glavno raziskovalno vprašanje, namen in cilji.....	7
2.3 Opis znanstvenega in strokovnega področja	8
2.3.1 Industrija 4.0 in RAMI 4.0	8
2.3.2 RAMI 4.0 – Referenčni arhitekturni model Industrije 4.0	9
2.3.3 Razvoj in pomen RAMI 4.0	9
2.3.4 Struktura in glavni elementi modela.....	10
2.3.5 Arhitektura podjetja (EA) in ArchiMate	11
2.3.6 Pomen za mala in srednja podjetja (MSP)	11
2.4 Opredelitev glavnih pojmov, konstruktov oz. spremenljivk ter opis predvidene povezave med pojmi	12
2.5 Predstavitev metode oz. načina podajanja.....	13
2.6 Predstavitev rezultatov	14
2.7 Prispevki članka	16
3 Vrednotenje članka.....	17
3.1 Kritična ocena in lastno mnenje	17
3.2 Razširitve in poglobitve članka	18
3.3 Praktična uporabnost članka	20
3.4 Informativne novosti članka.....	21
4 Sklep.....	23

Literatura.....	24
------------------------	-----------

Kazalo slik

Slika 2.1: Industrija 4.0	8
Slika 2.2: Plattform Industrie 4.0	9
Slika 2.3: 3D Matrika modela RAMI 4.0	10
Slika 2.4: Mala in srednja podjetja	11
Slika 2.5: Primer strukture ArchiMeta	13
Slika 3.1: Model življenjskega cikla za modularne digitalne dvojčke	19
Slika 3.2: Siemens Amberg Industrija 4.0.....	20

Uvod

Industrija 4.0 označuje prelomno obdobje v razvoju proizvodnje, kjer se združujejo napredne digitalne tehnologije, avtomatizacija in inteligentni sistemi. Gre za četrto industrijsko revolucijo, ki temelji na konceptu povezanih pametnih tovarn, v katerih fizični in digitalni svet delujeta kot enoten sistem. Ključne tehnologije, kot so internet stvari (IoT), kibernetiko-fizični sistemi (CPS), umetna inteligenca, analiza podatkov in oblačne platforme, omogočajo natančno spremljanje, optimizacijo in nadzor proizvodnih procesov v realnem času.

S tem se tradicionalna industrijska okolja (Industrija 3.0) spreminjajo v dinamične in hitro prilagodljive sisteme, kar odpira nova vprašanja glede načrtovanja, povezljivosti in standardizacije. Da bi podjetja lahko učinkovito uvajala takšne tehnologije, potrebujejo strukturiran pristop, ki zagotavlja preglednost, usklajenost in standardizacijo med tehničnimi in poslovnimi procesi. Ključno vlogo pri tem imajo referenčni arhitekturni modeli, kot je RAMI 4.0, ki predstavljajo osnovo za razumevanje in izvajanje načel Industrije 4.0.

Namen te seminarske naloge je analizirati in primerjati tri znanstvene članke, ki obravnavajo uporabo RAMI 4.0 kot orodja pri digitalni preobrazbi podjetij. Prvi članek se osredotoča na uporabo arhitekturnega pristopa in jezika ArchiMate v malih in srednjih podjetjih (MSP), drugi obravnava tehnično arhitekturo za fleksibilno proizvodnjo, tretji pa pogloblja koncept digitalnih dvojčkov in njihovo skladnost z RAMI 4.0.

Naloga primerja organizacijski, tehnični in konceptualni vidik uporabe RAMI 4.0 ter raziskuje pomen arhitekturnega načrtovanja kot orodja za digitalno preobrazbo. Glavni cilji naloge so:

- razumeti strukturo in pomen RAMI 4.0 v okviru Industrije 4.0,
- analizirati in primerjati pristope izbranih člankov,
- oceniti prednosti in izzive pri implementaciji RAMI 4.0 v MSP-jih in večjih sistemih,
- izpostaviti pomen arhitekturnega načrtovanja za strateško usklajevanje tehnologije in poslovnih ciljev.

S tem bo naloga pokazala, da RAMI 4.0 ni le teoretičen model, temveč praktično orodje, ki podjetjem omogoča strukturirano pot do razvoja pametne tovarne ter dolgoročno konkurenčno prednost v digitalni industrijski dobi.

1 Kratek povzetek prebranega članka

Članek z naslovom *"Piloting Industry 4.0 in SMEs with RAMI 4.0: An Enterprise Architecture Approach"* [1] obravnava izzive, s katerimi se mala in srednja podjetja (MSP) soočajo pri uvajanju referenčnega arhitekturnega modela Industrije 4.0 (RAMI 4.0). Avtorja, Luís Filipe Baptista in João Barata, predlagata pristop, ki temelji na poslovni arhitekturi in uporablja modelarski jezik ArchiMate kot orodje za lažjo in bolj strukturirano implementacijo digitalne preobrazbe.

V okviru študije primera, izvedene v manjšem podjetju s področja tehničnih premazov, so z uporabo ArchiMate modelirali vseh šest plasti RAMI 4.0 (poslovno, funkcionalno, informacijsko, komunikacijsko, integracijsko ter plast sredstev in komponent). Namen raziskave je bil razviti arhitekturni okvir, ki MSP-jem omogoča oblikovanje strategije za Industrijo 4.0, določitev zahtev za pilotni projekt ter razvoj mobilne aplikacije z uporabo QR kod za sledljivost izdelkov in transparentnejše poslovanje.

Rezultati kažejo, da je ArchiMate primerno orodje za modeliranje zahtev Industrije 4.0 v skladu z RAMI 4.0, še posebej za opredelitev poslovne plasti, ki je bila doslej pogosto spregledana. Pristop pomaga MSP-jem pri oblikovanju dolgoročne strategije digitalne preobrazbe in izbiri konkretnih pilotnih projektov, ki so skladni s strateškimi cilji podjetja.

Znanstvena vrednost članka je v tem, da prvič celovito poveže referenčni arhitekturni model RAMI 4.0 z jezikom ArchiMate v kontekstu MSP-jev ter ponudi metodološki okvir, ki omogoča prenos teoretičnih konceptov v praktične rešitve. Glavna omejitev raziskave je, da je bil pristop preizkušen le v enem podjetju in pilotna aplikacija ni bila izvedena v realnem okolju, kar omejuje možnost širše posplošitve ugotovitev.

2 Analiza članka

2.1 Predstavitev avtorja in revije

Revija:

Članek je bil objavljen v reviji *Procedia Computer Science* (številka 192, leta 2021), ki je del znanstvene založbe Elsevier. *Procedia Computer Science* je recenziran medij, namenjen objavi konferenčnih prispevkov. Članek je bil predstavljen na 25. mednarodni konferenci o inteligentnih inženirskih sistemih (KES). Revija je odprto dostopna in objavlja pod licenco CC BY-NC-ND (Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Brez predelav).

Avtorja:

- **Luis Filipe Baptista** (glavni avtor)
- **João Barata**

Oba avtorja sta raziskovalca na Univerzi v Coimabri (Portugalska), na Centru za informatiko in sisteme ter na Oddelku za informacijsko inženirstvo. Njuno delo se osredotoča na digitalno preobrazbo, industrijo 4.0, RAMI 4.0 in uporabo arhitekturnih pristopov, kot je ArchiMate, za podporo malim in srednjim podjetjem (MSP) pri uvajanju sodobnih tehnologij.

2.2 Tema, glavno raziskovalno vprašanje, namen in cilji

Tema članka je **pilotno uvajanje Industrije 4.0 v malih in srednjih podjetjih (MSP)** z uporabo referenčnega arhitekturnega modela RAMI 4.0 in modeliranja z zapisom ArchiMate. Glavni izziv je zmanjšanje razlike med visoko stopnjo teoretičnega modela RAMI 4.0 in praktičnimi potrebami MSP, ki pogosto nimajo zadostnih strokovnih ali finančnih virov za kompleksne digitalne preobrazbe.

Namen članka je zato predstaviti pristop, ki z uporabo arhitekture podjetja (EA) in modeliranja ArchiMate omogoča MSP-jem:

1. Oblikovanje celovite strategije za Industrijo 4.0,

2. Identifikacijo primernih pilotnih projektov in
3. Razvijanje digitalnih rešitev v skladu z načeli RAMI 4.0.

Glavno raziskovalno vprašanje je: Kako je mogoče z uporabo arhitekturnega pristopa in modeliranja z ArchiMate učinkovito načrtovati in izvajati pilotne projekte Industrije 4.0 v MSP-jih v skladu z RAMI 4.0?

Cilji članka so:

1. Prikazati uporabnost ArchiMate-a za modeliranje šestih glavnih plasti RAMI 4.0 (poslovna, funkcionalna, informacijska, komunikacijska, integracijska in plast sredstev ter komponent).
2. Predstaviti praktično uporabnost pilotnega projekta – mobilno aplikacijo za sledljivost izdelkov z uporabo QR kod – ki služi kot vzorčni primer za druga MSP.
3. Oceniti smiselnost tovrstnega arhitekturnega pristopa za dolgoročno načrtovanje naložb in strateško usklajevanje projektov Industrije 4.0.

2.3 Opis znanstvenega in strokovnega področja

2.3.1 Industrija 4.0 in RAMI 4.0

Industrija 4.0 predstavlja četrto industrijsko revolucijo, ki temelji na **vertikalni in horizontalni integraciji proizvodnih sistemov**, ter na uporabi naprednih digitalnih tehnologij, kot so internet stvari (IoT), umetna inteligenca, robotika, mobilni sistemi in poglobljena resničnost. Cilj te preobrazbe je ustvariti tako imenovane "pametne tovarne", kjer proizvodni moduli delujejo avtonomno, izdelki pa postanejo aktivni udeleženci v proizvodnem procesu, informacije pa krožijo v realnem času po celotni informacijski verigi.



Slika 2.1: Industrija 4.0

2.3.2 RAMI 4.0 – Referenčni arhitekturni model Industrije 4.0

Ključno orodje za načrtovanje in implementacijo Industrije 4.0 je **Referenčni arhitekturni model Industrije 4.0 (RAMI 4.0)**. Njegov glavni namen je zagotoviti strukturirano in standardizirano osnovo, ki povezuje vse plasti industrijskega sistema – od fizičnih naprav, senzorjev in strojev do poslovnih procesov in strateških odločitev.

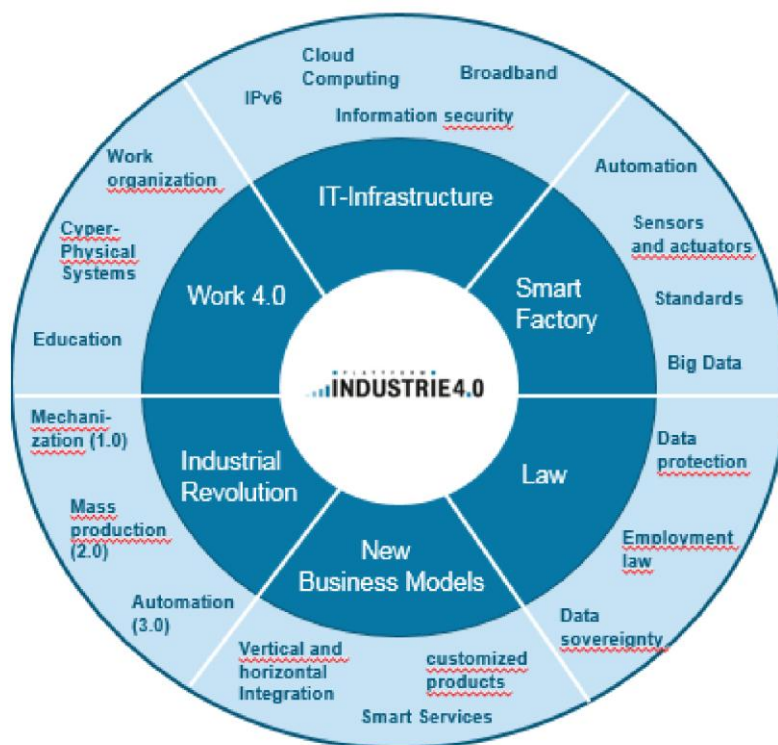
RAMI 4.0 je bil zasnovan kot povezava med tehnologijo in strategijo delovanja podjetja. Omogoča povezovanje tehničnih rešitev, kot so avtomatizacija, komunikacijski protokoli in podatkovne platforme, z organizacijskimi rešitvami podjetja. Model hkrati spodbuja univerzalnost, kar pomeni možnost povezovanja sistemov in naprav različnih proizvajalcev, kar je glavnega pomena za delovanje pametnih tovarn.

2.3.3 Razvoj in pomen RAMI 4.0

Model RAMI 4.0 se je razvil po letu 2011, ko je nastala potreba po standardiziranem pristopu k digitalni preobrazbi v industriji. V okviru nemške pobude "Plattform Industrie 4.0" so raziskovalci in industrijski partnerji razvili RAMI 4.0 kot skupno osnovo za povezovanje različnih tehnologij in poslovnih procesov.

Njegov razvoj temelji na obstoječih mednarodnih standardih:

- IEC 62264 in IEC 61512 za proizvodne hierarhije
- IEC 62890 za življenjski cikel izdelkov



Slika 2.2: Plattform Industrie 4.0

2.3.4 Struktura in glavni elementi modela

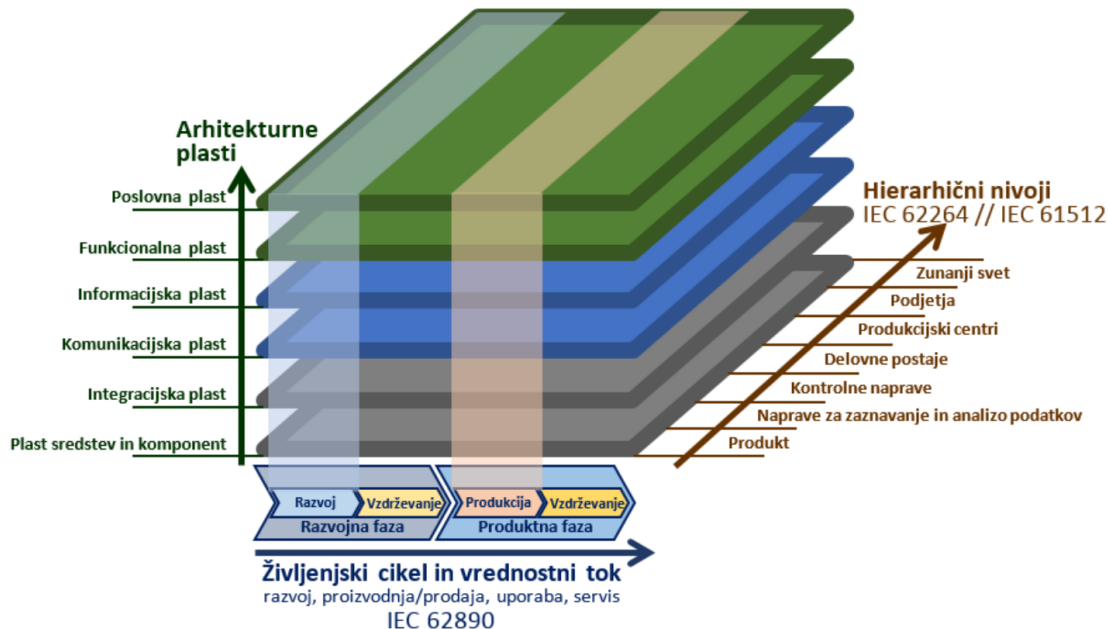
RAMI 4.0 je zasnovan kot tridimenzionalna matrika, ki ponazarja celoten industrijski ekosistem.

Prva os: Hierarhične ravni Temelji na standardu IEC 62264 in opisuje organizacijsko strukturo proizvodnega sistema. Od posameznega izdelka in senzorja do delovnih postaj, produkcijskih centrov, celotnega podjetja in zunanjega sveta.

Druga os: Življenjski cikel izdelka Izhaja iz standarda IEC 62890 in prikazuje faze izdelka od razvoja do uporabe ter vzdrževanja. Ta dimenzija omogoča sledljivost izdelkov in procesov v celotni verigi.

Tretja os: Arhitekturne plasti Predstavljajo različne vidike industrijskega sistema:

1. **Plast sredstev** (Asset Layer) – fizične naprave, stroji, senzorji
2. **Integracijska plast** (Integration Layer) – povezava med fizičnim in digitalnim svetom
3. **Komunikacijska plast** (Communication Layer) – komunikacijski protokoli in standardi
4. **Informacijska plast** (Information Layer) – obdelava in shranjevanje podatkov
5. **Funkcijska plast** (Functional Layer) – logika delovanja, aplikacije in procesi
6. **Poslovna plast** (Business Layer) – poslovna pravila, cilji in upravljanje



Slika 2.3: 3D Matrika modela RAMI 4.0

2.3.5 Arhitektura podjetja (EA) in ArchiMate

Za praktično vpeljavo RAMI 4.0 je potreben jezik za modeliranje, ki lahko zajame tako poslovne kot tehnološke vidike podjetja. **ArchiMate**, kot standardiziran jezik za arhitekturo podjetja, omogoča vizualizacijo in definiranje vseh šestih plasti RAMI 4.0. Z uporabo ArchiMate je mogoče preslikati vse plasti RAMI 4.0 v konkretne modele, ki so razumljivi tudi za mala in srednja podjetja (MSP).

2.3.6 Pomen za mala in srednja podjetja (MSP)

MSP se pri uvajanju Industrije 4.0 soočajo s specifičnimi izzivi: pomanjkanje notranjih strokovnjakov, omejeni finančni viri in kompleksnost referenčnih modelov. Strukturirani pristop RAMI 4.0, kombiniran z modeliranjem ArchiMate, omogoča MSP-jem:

- modularno uvajanje digitalizacije po posameznih plasteh,
- zmanjšanje tveganj in stroškov prehoda,
- primerjavo digitalne zrelosti z drugimi podjetji,
- dolgoročno strategijo naložb v digitalizacijo.

S tem se poveča verjetnost trajnostne digitalne preobrazbe tudi v podjetjih z omejenimi viri, kar je ključnega pomena za njihovo konkurenčnost v dobi četrte industrijske revolucije.



Slika 2.4: Mala in srednja podjetja

2.4 Opredelitev glavnih pojmov, konstruktov oz. spremenljivk ter opis predvidene povezave med pojmi

V članku avtorja razvijata konceptualni okvir za implementacijo Industrije 4.0 v malih in srednjih podjetjih (MSP), ki temelji na integraciji dveh ključnih konceptov: **Referenčnega arhitekturnega modela Industrije 4.0 (RAMI 4.0)** in jezika za modeliranje arhitekture podjetja (**ArchiMate**).

Model omogoča povezovanje tehničnih, informacijskih in poslovnih vidikov podjetja v enoten sistem, kar MSP-jem olajša načrtovanje digitalne preobrazbe.

Ključni konstrukti modela:

1. **Plasti RAMI 4.0** – šest hierarhičnih plasti, ki predstavljajo celovit pogled na industrijski sistem
2. **ArchiMate modeliranje** – orodje za vizualizacijo, analizo in dokumentiranje vseh komponent digitalne preobrazbe v skladu z RAMI 4.0.
3. **Strateška usklajenost** – stopnja povezanosti med poslovnimi cilji podjetja in izbranimi tehnološkimi rešitvami.
4. **Digitalna zrelost podjetja** – sposobnost podjetja, da učinkovito uporablja digitalne tehnologije za ustvarjanje vrednosti in izboljšanje procesov.

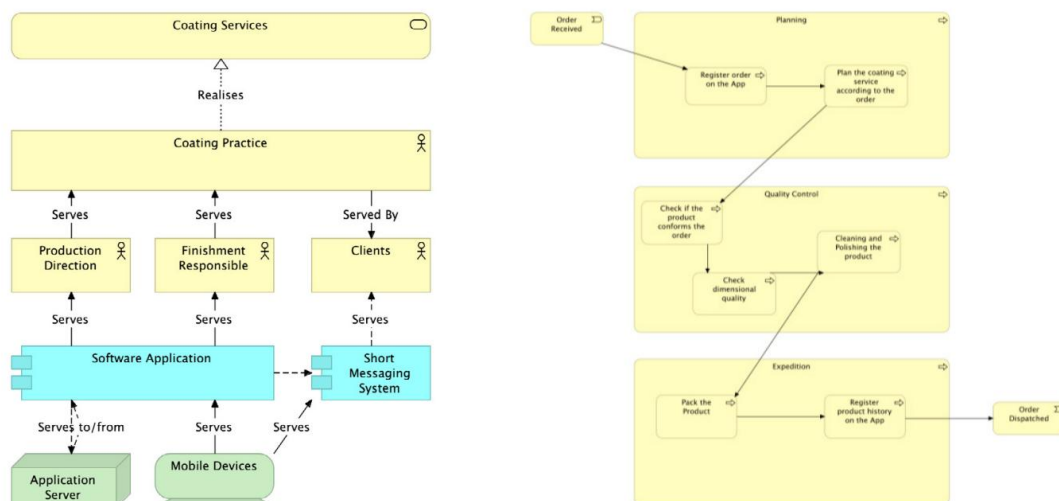
Predvidene povezave med konstrukti:

1. **Uporaba ArchiMate pozitivno vpliva na strateško usklajenost** digitalne preobrazbe, saj vizualizacija vseh plasti RAMI 4.0 omogoča boljše razumevanje povezav med tehnologijo in poslovnimi cilji.
2. **Strateška usklajenost krepi povezavo med digitalno zrelostjo in uspešnostjo pilotnih projektov**, saj usmerja tehnološke investicije v podporo ključnim procesom.
3. **Modeliranje z ArchiMate olajša identifikacijo pilotnih projektov**, ker razkrije kritične točke v poslovnih in informacijskih tokovih.
4. **Integrirano modeliranje vseh šestih plasti RAMI 4.0 spodbuja trajnost digitalne preobrazbe**, saj omogoča postopno, a celovito uvajanje novih tehnologij brez prekinitev v delovanju podjetja.

Kritična presoja konceptualnega modela:

Predlagani model je teoretično dobro zasnovan, saj učinkovito povezuje strateško in tehnično raven delovanja podjetja. Posebej pomembna je vključitev poslovne plasti, ki je bila v preteklih raziskavah pogosto zapostavljena. Model omogoča preglednost in sistematično načrtovanje digitalnih projektov, vendar se v praksi lahko pojavijo izzivi pri **preslikavi med RAMI 4.0 in ArchiMate**, saj nekatere koncepte ni mogoče neposredno prenesti. Poleg tega je uporaba orodja ArchiMate za manjša podjetja lahko zahtevna, če nimajo ustreznega znanja ali virov.

Kljub tem omejitvam model predstavlja **pomemben korak k praktični realizaciji RAMI 4.0** v MSP-jih, saj združuje abstraktne koncepte z uporabnim metodološkim pristopom in omogoča bolj premišljeno digitalno preobrazbo podjetij.



Slika 2.5: Primer strukture ArchiMeta

2.5 Predstavitev metode oz. načina podajanja

Raziskava temelji na kvalitativni študiji primera, ki sledi principom **mehke oblikovalske znanstvene metodologije (SDSM)**. Ta pristop združuje tradicionalne korake oblikovalske znanosti (design science research) s pristopi mehkih sistemov (soft systems methodology), kar je še posebej primerno za razvoj organizacijskih rešitev v naravnem okolju.

Faze raziskovalnega procesa:

1. Identifikacija problema

Določitev izzivov pri implementaciji RAMI 4.0 v MSP-jih, zlasti pomanjkanje konkretnih primerov uporabe in težave pri prevajanju abstraktnega modela v praktične rešitve.

2. Določitev zahtev za rešitev

Opredelitev potrebe po orodjih, ki omogočajo prenos RAMI 4.0 konceptov v specifične IT implementacije v organizacijah.

3. Umeščanje problema

Postavitev problema v socialni in tehnični kontekst sistemov – na primer uporaba mobilnih tehnologij in QR kod za izboljšanje sledljivosti izdelkov v industriji 4.0.

4. Razvoj rešitve

Uporaba ArchiMate za modeliranje zahtev Industrije 4.0 v skladu s plastmi RAMI 4.0.

5. Primerjava zahtev

Preverjanje ustreznosti ArchiMate za podporo razvoju pilotnih projektov za Industrijo 4.0.

6. Iskanje konkretne instance rešitve

Sodelovanje s konkretnim MSP-jem iz sektorja tehničnih premazov, ki želi razviti celovito strategijo za Industrijo 4.0.

7. Implementacija in evalvacija

Izvedba modeliranja in razvoj pilotnega projekta – mobilne aplikacije za upravljanje proizvodnje s sledljivostjo izdelkov.

Podatkovni viri in tehnike analize:

Raziskava temelji na **primeru študije** v metalurškem podjetju, kjer so bili uporabljeni naslednji podatkovni viri:

- Strateški dokumenti podjetja
- Opazovanje proizvodnih procesov
- Delavnice s ključnimi deležniki
- Izdelava prototipa aplikacije

Analitični pristop je vključeval:

- Modeliranje šestih plasti RAMI 4.0 z ArchiMate
- Iterativno izboljševanje modelov skozi sodelovanje s praktiki
- Vizualno predstavitev arhitekturnih odločitev
- Preslikavo med koncepti RAMI 4.0 in ArchiMate elementi

Ovrednotenje rešitve je potekalo skozi:

- Potrditev ustreznosti modelov s strani deležnikov podjetja
- Preverjanje skladnosti z zahtevami RAMI 4.0
- Identifikacijo praktičnih izzivov pri uporabi modelov

Ta pristop omogoča **postopno izboljševanje** arhitekturnih modelov in zagotavlja, da so rešitve temeljito zasnovane in skladne s poslovnimi potrebami podjetja, hkrati pa nudijo vpogled v širše raziskovalno področje implementacije Industrije 4.0 v MSP-jih.

2.6 Predstavitev rezultatov

Raziskava je prinesla tako teoretične kot praktične rezultate, ki potrjujejo uporabnost predlagane metode. Glavne ugotovitve so naslednje:

Teoretični prispevki

- Uspešno so bile modelirane vse **šest plasti RAMI 4.0** z uporabo ArchiMate, kar predstavlja celovit pristop k arhitekturi Industrije 4.0
- Posebej pomemben je prispevek na področju **modeliranja poslovne plasti**, ki je bila v predhodnih študijah manj obravnavana
- Potrjena je bila **primernost ArchiMate** za področje Industrije 4.0, kar odpira pot širši uporabi tega jezika v industrijskem okolju

Praktični prispevki

V okviru pilotnega projekta je bilo razvitih več ključnih komponent:

1. **Mobilna aplikacija za sledljivost izdelkov**
 - Omogoča skeniranje QR kod na izdelkih
 - Zagotavlja dostop do podatkov o specifikaciji, zgodovini premazov in tehničnih risb
 - Podpira vnos opomb in označevanje v realnem času
2. **Integracija QR kod v proizvodni proces**
 - Lasersko graviranje kod neposredno na izdelke
 - Povezava fizičnih izdelkov z digitalno evidenco
 - Omogoča sledljivost skozi celoten življenjski cikel izdelka
3. **Strateško načrtovanje**
 - Identificirane so bile ključne razvojne sposobnosti (real-time komunikacija, digitalizacija podatkov)
 - Določene prioritete za nadaljnje investicije (mobilna in oblačna strategija)
 - Usklajenost s certifikacijskimi zahtevami (ISO 9001)

Učinki na poslovanje

Rezultati so pokazali, da predlagani pristop:

- Povečuje **strateško usklajenost** digitalnih naložb z poslovnimi cilji
- Omogoča **postopno uvajanje** digitalizacije, kar zmanjšuje tveganja za MSP
- Izboljšuje **sledljivost izdelkov**, kar je kritično za varnost v letalstvu in drugih zahtevnih panogah
- Kreira **temelj za nadaljnji razvoj** (npr. aplikacija z razširjeno resničnostjo za spremljanje obrabe)

Izzivi in omejitve

Med implementacijo so se pojavili tudi izzivi:

- Kompleksnost preslikave med ArchiMate in RAMI 4.0 koncepti
- Tveganje preobremenjenosti modelov pri večjih implementacijah
- Potreba po kontinuiranem vzdrževanju arhitekturnih modelov

Rezultati dokazujejo, da integracija RAMI 4.0 in ArchiMate predstavlja učinkovit okvir za načrtovanje in implementacijo digitalne preobrazbe v MSP-jih, hkrati pa nudijo praktične smernice za druga podjetja, ki se soočajo s podobnimi izzivi.

2.7 Prispevki članka

Raziskava, predstavljena v članku, poglobi, nadgradi in razširi razumevanje implementacije Industrije 4.0 v malih in srednjih podjetjih (MSP). Z integracijo RAMI 4.0 in ArchiMate avtorji dokazujejo vzdržnost tega pristopa tako na teoretični kot praktični ravni.

Teoretični prispevki:

1. **Razširitev uporabe ArchiMate v kontekstu Industrije 4.0**
Študija dokazuje, da je ArchiMate primerno orodje za modeliranje vseh šestih plasti RAMI 4.0, s posebnim poudarkom na poslovni plasti, ki je bila v predhodnih raziskavah manj obravnavana.
2. **Razvoj metodološkega okvira za digitalno preobrazbo MSP-jev**
Avtorji predstavijo celovit pristop, ki združuje mehko oblikovalsko znanstveno metodologijo (SDSM) z arhitekturnim modeliranjem, kar omogoča iterativen razvoj rešitev, prilagojenih specifičnim potrebam MSP-jev.
3. **Preslikava med koncepti RAMI 4.0 in ArchiMate**
Raziskava podaja konkretne primere povezovanja elementov obeh modelov, kar olajša njihovo sočasno uporabo v praksi.

Praktični prispevki

1. **Vodilo za MSP-je pri uvajanju Industrije 4.0**
Študija ponuja konkretno smernico za MSP-je, kako začeti z digitalno preobrazbo z manjšimi pilotnimi projekti, ki so strateško usklajeni z dolgoročnimi cilji podjetja.
2. **Dokazana uporabnost v realnem okolju**
Prek študije primera v podjetju tehničnih premazov avtorji praktično dokažejo, kako je mogoče z mobilno aplikacijo in QR kodi izboljšati sledljivost izdelkov in učinkovitost proizvodnje.
3. **Identifikacija naslednjih korakov za digitalizacijo**
Raziskava ne omogoča le trenutne implementacije, temveč tudi identificira potencialne naslednje korake, kot je aplikacija z razširjeno resničnostjo za spremljanje obrabe komponent.
4. **Omejitev tveganj pri digitalni preobrazbi**
S predstavitvijo strukturiranega pristopa zmanjšujejo tveganja, povezana z neuspešnimi investicijami v digitalne tehnologije, kar je še posebej pomembno za MSP-je z omejenimi viri.

Avtorji praktično dokazujejo, da lahko menedžerji MSP-jev z uporabo predstavljenega arhitekturnega pristopa učinkovito načrtujejo in izvajajo svojo digitalno preobrazbo. Brez takšnega vpogleda bi lahko prišlo do neusklajenih investicij, neučinkovite rabe virov in poslabšanja konkurenčne sposobnosti, kar bi imelo dolgoročne negativne posledice tako za posamezna podjetja kot za širše gospodarstvo. Vemo pa, da so lahko pri ogromnih investicijah napačne odločitve tudi za samo podjetje usodno sploh, če gre za startup.

3 Vrednotenje članka

3.1 Kritična ocena in lastno mnenje

Obravnavani članek se ukvarja s pomembno in aktualno temo – digitalno preobrazbo malih in srednjih podjetij (MSP) v okviru Industrije 4.0. Avtorji predstavljajo inovativen pristop, ki združuje referenčni model RAMI 4.0 z orodjem za modeliranje ArchiMate, kar predstavlja pomemben prispevek k obstoječi literaturi.

Pomisleki glede izbrane metodologije

Kljub inovativnosti pristopa je treba opozoriti na nekatere metodološke omejitve:

- Raziskava temelji na **enem samem primeru** podjetja iz sektorja tehničnih premazov, kar omejuje možnost prenašanja ugotovitev na druge panoge
- **Odsotnost kvantitativnega ovrednotenja** učinkov implementacije onemogoča objektivno presojo uspešnosti predlaganega pristopa
- Aplikacija je bila zgolj narejena in testirana v nekem simuliranem okolju in ne v praksi, zato ne moremo vedeti njene točne uporabne vrednosti.

Vprašljivosti v praktični uporabnosti

- Kompleksnost ArchiMate modelov lahko predstavlja problem za manjša podjetja, ki nimajo zaposlenega specializiranega kadra
- Omejitve pri **preslikavi konceptov** med RAMI 4.0 in ArchiMate lahko povzročijo težave pri konsistentnosti modeliranja
- **Vzdrževanje arhitekturnih modelov** v dinamičnem okolju lahko postane zahtevno in potratno za MSP-je s časovnega in ekonomskega vidika.

Pomen za slovenski kontekst

Za slovensko gospodarstvo, kjer prevladujejo MSP-ji, je predstavljeni pristop še posebej relevanten. Omogoča namreč:

- Postopno uvajanje digitalizacije, kar ustreza finančnim in kadrovskim zmožnostim slovenskih podjetij
- Sledenje mednarodnim standardom, kar kreira konkurenčno prednost na globalnem trgu

- Razvoj specifičnih digitalnih rešitev, prilagojenih potrebam strateških panog (kot so kovinska industrija in avtomobilski sektor)

Osebnostno mnenje

Članek predstavlja korak v pravo smer, saj naslavlja ključni izziv – premostitev vrzeli med teoretičnimi modeli Industrije 4.0 in praktičnimi potrebami MSP-jev. Vendar bi bilo za potrditev trditev o učinkovitosti pristopa potrebno:

- Izvedbo dodatnih študij primerov v različnih panogah
- Dolgoročno spremljanje uspešnosti implementiranih rešitev
- Razvoj poenostavljenih priročnikov za uporabo ArchiMate v kontekstu MSP-jev

Kljub navedenim omejitvam članek predstavlja vreden prispevek k razpravi o digitalni preobrazbi in ponuja konkretne smernice za MSP-je, ki se soočajo z izzivi Industrije 4.0.

Ne smemo pa tudi pozabiti na organizacijsko togost podjetij pri uvajanju novitet. Avtorja članka sicer poudarjata pomen strateškega načrtovanja in postopnega uvajanja digitalnih rešitev, vendar v praksi številna podjetja, predvsem manjša, ostajajo zadržana do sprememb. Če podjetje trenutno dobro posluje, pogosto ne vidi potrebe po vlaganju v nove tehnologije ali preoblikovanju procesov, saj so to spremembe, ki zahtevajo dodatne stroške, čas in znanje. Vpeljava koncepta Industrije 4.0 zato ni le tehnični, temveč tudi kulturni in organizacijski izziv, ki zahteva spremembo miselnosti vodstva in zaposlenih. V tem kontekstu pristop, ki ga članek zagovarja – postopno uvajanje prek pilotnih projektov in uporaba arhitekturnih modelov – predstavlja realno in učinkovito pot, saj zmanjšuje tveganje, omogoča učenje na manjšem obsegu in postopno krepi digitalne kompetence podjetja. Tak pristop bi bil primeren tudi za slovenska podjetja, ki pogosto delujejo v okoljih z omejenimi viri in tradicionalno kulturo poslovanja.

3.2 Razširitve in poglobitve članka

Kot je navedeno v prejšnjih poglavjih, se prvotni članek osredotoča predvsem na uporabo ArchiMate za modeliranje RAMI 4.0 v malih in srednjih podjetjih (MSP) s poudarkom na pilotnem projektu mobilne aplikacije za sledljivost izdelkov. Za poglobitev in razširitev teh spoznanj lahko izkoristimo še dva dodatna članka, ki obravnavata RAMI 4.0 z drugih zornih kotov.

V drugem izbranem članku, *"Proposal of an Architecture based on RAMI 4.0 Layers for Flexible Manufacturing in Industry 4.0"*, avtorji predstavijo arhitekturo, ki uporablja vseh šest informacijskih plasti RAMI 4.0 za omogočanje prilagodljive proizvodnje. Poudarjajo vloge posameznih plasti:

- **Komunikacijska plast** temelji na standardiziranem protokolu OPC UA,
- **Informacijska plast** združuje podatke in zagotavlja skladnost s poslovnimi pravili,
- **Funkcijska in poslovna plast** omogočata stranki spreminjanje naročil v realnem času prek REST API-jev.

Poleg tega avtorji poudarjajo pomen:

- **Standardizirane komunikacije** z uporabo OPC UA in REST API-jev,
- **Fleksibilnost proizvodnje** s spreminjanjem naročil med izvajanjem,
- **Varnost** s šifriranjem in uporabo protokolov avtorizacije.

V tretjem članku, *"Digital Twins in Manufacturing: A RAMI 4.0 Compliant Concept"*, avtorji izpostavljajo pomen **digitalnih dvojčkov** v okviru RAMI 4.0. Opravljena je bila sistematična analiza različnih definicij digitalnega dvojčka, pri čemer so avtorji izpeljali ključne elemente in zahteve za implementacijo. Glavni prispevek tega članka je:

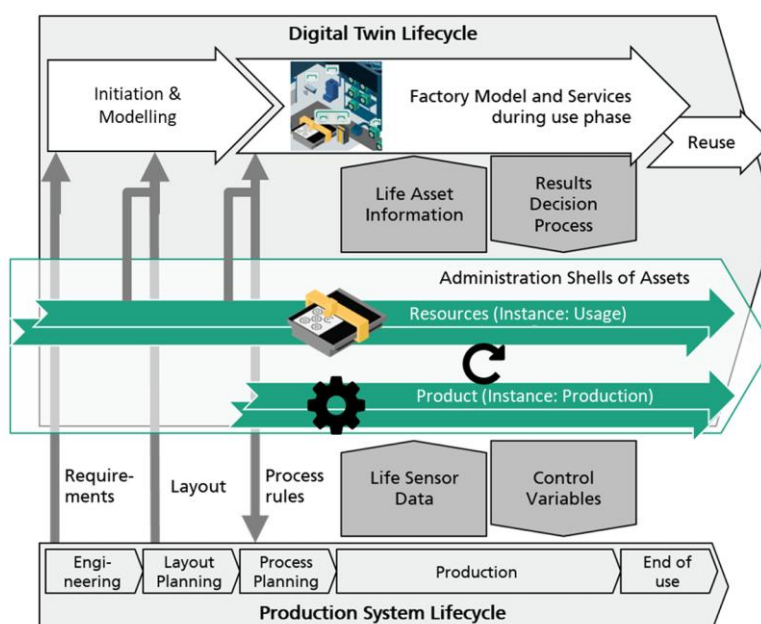
- Usklajevanje koncepta digitalnega dvojčka z arhitekturo RAMI 4.0,
- Uporaba **Upravljalne ovojnice sredstev (AAS)** kot modularnega gradnika za digitalne reprezentacije,
- Zagotavljanje **povratne komunikacije** med fizičnimi sredstvi in njihovimi digitalnimi predstavami.

Poleg tega so opredeljeni tudi ključni pogoji za uspešno implementacijo, kot so modularnost, hierarhična struktura, standardizacija in robustnost.

Vsi trije članki se dopolnjujejo in skupaj ponujajo celovit pogled na implementacijo Industrije 4.0:

- Prvi članek prispeva praktično perspektivo modeliranja z ArchiMate za MSP-je,
- Drugi članek podaja arhitekturni okvir za fleksibilno proizvodnjo z uporabo vseh plasti RAMI 4.0,
- Tretji članek pa pogloblja teoretične osnove digitalnih dvojčkov in njihovo usklajenost z RAMI 4.0.

Skupaj ti viri omogočajo tako **strateško načrtovanje** kot **tehnično izvajanje** digitalne preobrazbe, kar je še posebej pomembno za MSP-je, ki si prizadevajo za učinkovito in trajnostno vključevanje v Industrijo 4.0.



Slika 3.1: Model življenjskega cikla za modularne digitalne dvojčke

3.3 Praktična uporabnost članka

Kot že ves čas govorimo je industrija 4.0 pojem za prihodnost in konkurenčnost podjetji, zato je najbolje, da si pogledamo tudi kak primer v praksi in to je lahko lepo vidno pri podjetju Siemens, obrat v Ambergu v Nemčiji. Na to temo smo poiskali tudi dodaten članek, ki to tematiko obrata obravnava [5].

Odpiranje perspektive s primerom Siemens

Praktično uporabnost in uspešnost tega arhitekturnega pristopa ponazarja globalni igralec, podjetje **Siemens**. V svojem blogu "Why Siemens continues to be one-step ahead of Industry 4.0" **Napaka! Vira sklicevanja ni bilo mogoče najti.** poudarjajo, da njihova prednost ne izvira iz posamičnih tehnologij, temveč iz **celovite digitalne arhitekture**, ki temelji na načelih, skladnih z RAMI 4.0. Siemens ta načel ne le uporablja zase, temveč jih ponuja tudi svojim strankam prek platform in rešitev, kot so:

- **Industrijski IoT platformi MindSphere in XaaS (Everything-as-a-Service):** Te platforme delujejo kot operacijski sistem za digitalno podjetje in neposredno preslikajo vse plasti RAMI 4.0 – od povezave fizičnih sredstev (Asset Layer) prek integracije in komunikacije do poslovnih funkcij.
- **Digitalni dvojčki:** Siemens digitalne dvojčke uporablja za simulacijo, optimizacijo in vzdrževanje proizvodnih sistemov v realnem času, kar ustreza zahtevam po integraciji digitalnega in fizičnega sveta v RAMI 4.0.

Poleg tega Siemens v svojih rešitvah dosledno poudarja pomen **odprtih standardov**, kot sta **OPC UA** za robustno komunikacijo v tovarni in **REST API** za povezljivost z višjimi poslovnimi sistemi. To je v popolnem skladu tako s prvim člankom (ki poudarja pomen standardizirane komunikacije) kot z drugim člankom ("Proposal of an Architecture based on RAMI 4.0 Layers"), ki OPC UA in REST API-je postavlja v jedro svoje arhitekture za fleksibilno proizvodnjo.



Slika 3.2: Siemens Amberg Industrija 4.0

Sklepna perspektiva za slovenska podjetja

Za slovenski gospodarski prostor, kjer prevladujejo MSP-ji, je torej praktična uporabnost dvojna:

- **Neposredna uporaba:** Članek ponuja **dokazano metodologijo**, s katero lahko slovenska podjetja začnejo svojo digitalno preobrazbo na strukturiran način z minimalnim tveganjem.
- **Posredna potrditev:** Uspeh podjetja **Siemens** dokazuje, da so arhitekturni principi, ki jih članek opisuje za MSP-je, **enako relevantni in močni tudi v največjih in najnaprednejših industrijskih okoljih**. To daje slovenskim podjetjem zaupanje, da vlaganje v takšen pristop ni slepa pot, temveč usmeritev v sklad z globalnimi trendi in praksami vodilnih igralcev.

Ideje za vpeljavo novosti v slovenskem prostoru

Za slovenska podjetja bi lahko naslednji dve podjetji po našem mnenju dvignila nivo in optimizirali samo proizvodnjo z:

1. **Gorenje**
 - Digitalne dvojčke za optimizacijo porabe energije v proizvodnji
 - Arhitekturo z OPC UA za povezavo različnih proizvodnih linij
 - Mobilne rešitve za sledljivost komponent v globalni dobavni verigi
2. **Hidria** (proizvajalec avtomobilskih komponent)
 - Real-time spremljanje proizvodnje s pomočjo digitalnih dvojčkov
 - Fleksibilno prilagajanje naročil strankam prek REST API-jev
 - Standardizirano komunikacijo z globalnimi partnerji prek OPC UA

3.4 Informativne novosti članka

Članek prinaša več informativnih novosti, ki pomembno obogatijo razumevanje digitalne preobrazbe v malih in srednjih podjetjih (MSP). Prvič je smiselno na takšen način povezan referenčni arhitekturni model RAMI 4.0 z orodjem za modeliranje ArchiMate v kontekstu MSP-jev. To povezavo je mogoče obravnavati kot nov arhitekturni pristop, ki MSP-jem omogoča, da se z manjšimi pilotnimi projekti in brez ogromnih začetnih naložb vključijo v Industrijo 4.0. Zaradi te povezave lahko podjetja z omejenimi viri postopoma izboljšujejo svojo digitalno zrelost, ne da bi tvegala prevelike finančne izgube ali operativne motnje.

Prav tako članek prvič poudarja pomen strateške usklajenosti med poslovnimi cilji in digitalnimi naložbami v kontekstu MSP-jev. S predstavitvijo šestih plasti RAMI 4.0 in njihove preslikave z ArchiMate omogoča podjetjem, da ne izbirajo le najsodobnejših tehnologij, temveč tiste, ki so neposredno povezane z njihovimi strateškimi prioritetami, kot so izboljšanje sledljivosti izdelkov ali izpolnjevanje zahtev certifikatov (npr. ISO 9001). To zmanjšuje verjetnost, da bi napačne tehnološke odločitve vodile v neuspešne projekte ali celo ogrozile obstoj podjetja.

Vpeljava strukturiranega arhitekturnega pristopa z uporabo ArchiMate predstavlja tudi dinamično zmogljivost za MSP. S povečano preglednostjo vseh plasti poslovanja – od poslovne strategije do fizičnih sredstev – podjetje povečuje svojo prilagodljivost in omogoča hitrejša in bolj utemeljene odločitve. To je še posebej pomembno v trenutnih negotovih časih, ko je treba hitro prilagajati proizvodne procese ali se odzivati na spremembe na trgu.

Iz članka lahko razberemo, da bo za doseganje trajnostne konkurenčne prednosti MSP-jev nujna vpeljava celovitega arhitekturnega načrtovanja, kot je predstavljeno, ki služi kot osnova za strateško odločanje in načrtovanje nadaljnje digitalne poti. S predhodnim opredeljevanjem kritičnih točk v procesih, modeliranjem informacijskih tokov in načrtovanjem integracije sistemov si podjetje izbori temelj za učinkovito in trajno digitalno preobrazbo. Avtorja z razširitvijo pogleda na pomen strateške usklajenosti in postopnega pristopa krepi tudi odgovoren odnos do uporabe virov, kar je ključnega pomena za dolgoročno vzdržnost tako posameznih podjetij kot širše družbe.

4 Sklep

Analiza izbranih člankov je pokazala, da je referenčni arhitekturni model Industrije 4.0 (RAMI 4.0) temeljni okvir za načrtovanje in izvajanje digitalne preobrazbe v industriji, zlasti v kontekstu malih in srednjih podjetij (MSP). Model zagotavlja strukturiran pristop, ki povezuje tehnične, informacijske in poslovne plasti podjetja ter omogoča postopno uvajanje digitalizacije na obvladljiv in strateško usklajen način.

Prvi analizirani članek dokazuje, da uporaba ArchiMate kot orodja za modeliranje RAMI 4.0 omogoča MSP-jem boljši pregled nad poslovnimi procesi in učinkovitejše načrtovanje pilotnih projektov. Drugi članek prispeva tehnično dimenzijo z arhitekturo za fleksibilno proizvodnjo, ki temelji na standardih OPC UA in REST API, medtem ko tretji članek pogloblja razumevanje digitalnih dvojčkov kot povezave med fizičnim in digitalnim svetom. Skupaj ti pristopi tvorijo celovit okvir za digitalno preobrazbo – od strategije do izvedbe.

Primer podjetja Siemens dodatno potrjuje, da so načela, skladna z RAMI 4.0, uspešno uresničljiva v praksi ter prinašajo merljive koristi, kot so boljša sledljivost, optimizacija procesov in hitrejša prilagajanje trgu. Tovrstne prakse lahko služijo kot smernice tudi za slovenska podjetja, kjer prevladujejo MSP-ji in kjer so potrebni postopni, a premišljeni koraki k digitalni zrelosti.

Ugotavljava, da uspešna digitalna preobrazba ni zgolj tehnološki, temveč tudi organizacijski in kulturni proces, ki zahteva sodelovanje med tehničnimi strokovnjaki, menedžmentom in zaposlenimi. RAMI 4.0 v tem kontekstu predstavlja orodje za povezovanje teh razsežnosti v enoten, transparenten sistem, ki podpira dolgoročno konkurenčnost.

Za prihodnost bi bilo smiselno raziskati, kako bi lahko slovenska MSP podjetja poenostavila uporabo arhitekturnih modelov, morda z razvojem prilagojenih orodij ali nacionalnih smernic za digitalno preobrazbo. Le z združevanjem strateškega načrtovanja, tehnološke standardizacije in odprte organizacijske kulture bo mogoče uresničiti potencial Industrije 4.0 v praksi.

Literatura

- [1] Baptista, Luís Filipe, and João Barata. “Piloting Industry 4.0 in SMEs with RAMI 4.0: An Enterprise Architecture Approach.” *Procedia Computer Science*, vol. 192, 2021, pp. 2826–2835, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.053>.
- [2] Z. Neto, José, et al. “Proposal of an Architecture Based on RAMI 4.0 Layers for Flexible Manufacturing in Industry 4.0.” *Anais Do Congresso Brasileiro de Automática 2020*, 7 Dec. 2020, <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1743>. Accessed 3 Nov. 2025.
- [3] Lindner, Martin, et al. “Digital Twins in Manufacturing: A RAMI 4.0 Compliant Concept.” *Sci*, vol. 5, no. 4, 10 Oct. 2023, pp. 40–40, <https://doi.org/10.3390/sci5040040>. Accessed 20 Apr. 2025.
- [4] Šimic, Marko . “Referenčni Arhitekturni Modeli Pametne Tovarne.” 20 Oct. 2025.
- [5] Annanth, V Kishorre , et al. “Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Case Study of Siemens Industry.” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1969, no. 1, 1 July 2021, p. 012019, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1969/1/012019>.
- [6] Orchard, Alastair . “Why Siemens Continues to Be One Step ahead of Industry 4.0 - Thought Leadership.” *Thought Leadership*, 24 May 2016, blogs.sw.siemens.com/thought-leadership/why-siemens-continues-to-be-one-step-ahead-of-industry-4-0/. Accessed 4 Nov. 2025.