

PILOTSKI PROJEKT IMPLEMENTACIJE DIGITALNE KOGNITIVNE PLATFORME V JEKLARSKI INDUSTRIJI

Avtor: Matjaž Demšar

Visoka šola za poslovne vede, Management in informatika (2. stopnja)

Povzetek

S spremembami, ki jih prinaša tehnološki napredek in ki se v industriji odražajo pod pojmom »Industrija 4.0) se pojavlja vrsta priložnosti ter posledičnih prednosti za podjetja, ki napredne rešitve uvedejo v svoje poslovanje. Digitalizacija prinaša obilo možnosti za rast in zaposlovanje, hkrati pa odpira vrata mednarodnemu povezovanju v realnem času, hitrejši in učinkovitejši razvoj izdelkov, fleksibilnost proizvodnih procesov in višjo učinkovitost pri porabi surovin in energentov. Pri pripravi učinkovitih rešitev je potrebno sodelovanje vrste strokovnjakov, prav tako pa zadostno zrelostno stopnjo industrijskih podjetij, ki rešitve uvajajo, kar včasih predstavlja oviro pri pripravi ustreznih rešitev. Članek obravnava pilotski projekt implementacije digitalne platforme, ki omogoča zajem in obdelavo podatkov. Implementacija digitalne platforme je bila izvedena v sklopu projekta INEVITABLE, sofinanciran s strani Evropske komisije v okviru programa Obzorja 2020. V projekt INEVITABLE je vključenih 13 mednarodnih partnerjev, štirje prihajajo iz Slovenije. V okviru projekta želimo preko digitalizacije prispevati k optimizaciji delovanja metalurških procesov in izboljšanju kvalitete izdelkov.

Ključne besede: strojno učenje, digitalizacija, DMA, jeklarstvo

Uvod

Za razumevanje pristopa, ki je predstavljen v članku je potrebno najprej razumeti ekosistem proizvodnega okolja. Industrija 4.0 kot koncept namreč spreminja samo bistvo proizvodnih procesov. Tovarne, ki v svoj proizvodni proces vključujejo posamezne rešitve Industrije 4.0, lahko računajo na naslednje prednosti:

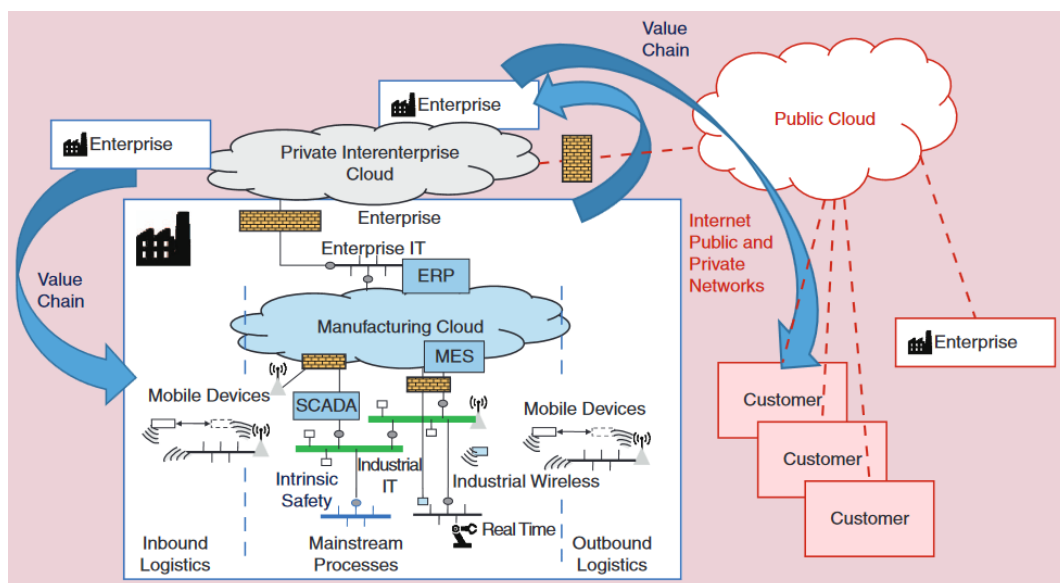
- Interoperabilnost, oziroma medsebojno združljivost
- Virtualizacijo, uporabo različnih digitalnih dvojčkov (tovarne, stroja, izdelka...)
- Decentralizacijo
- Distribuirano vodenje in obvladovanje
- Poenostavljeno in optimizirano vzdrževanje (premik v smeri preventivnega vzdrževanja)
- Znižanje stroškov, ki je posledica učinkovitega in celovitega obvladovanja
- Modularnost, oziroma fleksibilnost
- Izboljšana kvaliteta izdelkov

Posledično postajajo procesi in storitve v proizvodnih okoljih vedno bolj digitalizirani, informacije pa se izmenjujejo v širšem okolju, s pomočjo povezovanja strojev in informacijskih sistemov pa se dosega tudi višja stopnja organiziranosti in transparentnosti informacij. Proizvodne funkcije

so decentralizirane, različne entitete pa v sodobnih sistemih sodelujejo na različnih nivojih hierarhije organizacije.

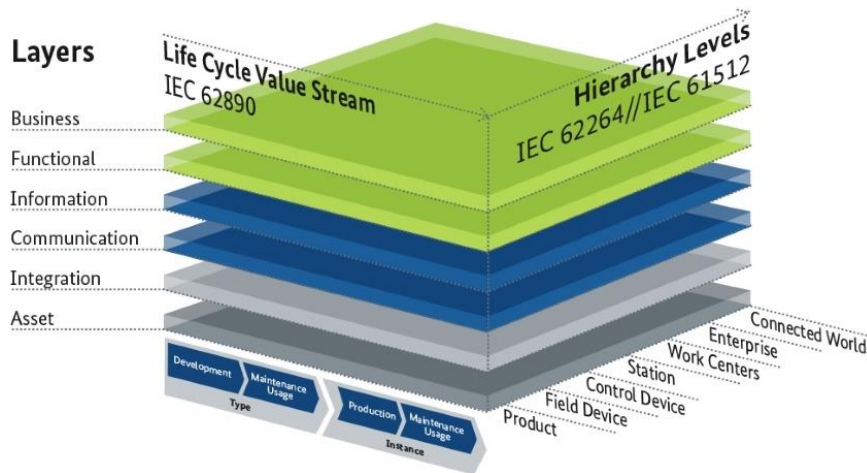
Zaradi posledične kompleksnosti proizvodnega okolja je ključnega pomena, da je komunikacijska infrastruktura pravilno načrtovana, saj le strukturiran pristop omogoča pravočasno, varno in zanesljivo dostopnost informacij. Na Slika 37 je razviden primer kompleksnosti industrijskih komunikacij ob povezanosti različnih informacijskih sistemov oziroma naprav.

Slika 37: Primer kompleksnosti industrijskih komunikacij (Wollschlaeger, Sauter, & Jasperneite, 2017).



Tradicionalni modeli t.i. »point to point« komunikacije so neustrezni glede na zahteve po podatkovnih in komunikacijskih zmogljivostih. Zaradi tega se pojavljajo novi modeli, ki v sebi združujejo potrebne tehnološke modele oziroma področja (Raptis, Passarella, & Conti, 2019). Purdue model, razširjen standard za prikazovanje nivojev proizvodnih sistemov nadomeščajo kompleksnejši modeli, ki omogočajo boljši prikaz medsebojnih odnosov različnih komponent. V evropskem prostoru je prevladujoč model RAMI 4.0 (VDI/VDE Society Measurement and Automatic Control, 2018). Model, prikazan na sliki 2, pokriva vse pomembne perspektive za boljše razumevanje oziroma prikazovanje kompleksnih industrijskih okolij v okviru Industrije 4.0.

Slika 38: Model RAMI 4.0 (VDI/VDE Society Measurement and Automatic Control, 2018).



Referenčni model RAMI 4.0 predstavlja strukturiran opis distribuiranega proizvodnega okolja, med drugim pa omogoča tudi lažje razumevanje sistema, ter njegove arhitekture, kar je ključno za učinkovito obvladovanje oziroma upravljanje. RAMI 4.0 preslikuje industrijske sisteme ter njihove interakcije v tri-dimenzionalni model, ki združuje:

- Hierarhične nivoje proizvodnje (ang. Layers)
- Nivoje interoperabilnosti (ang. Hierarchy Levels)
- Model življenjskega cikla (ang. Life Cycle Value Stream)

Uvedba digitalne kognitivne platforme se ukvarja z vsebino na hierarhičnih nivojih integracije, komunikacije in informacijske izmenjave.

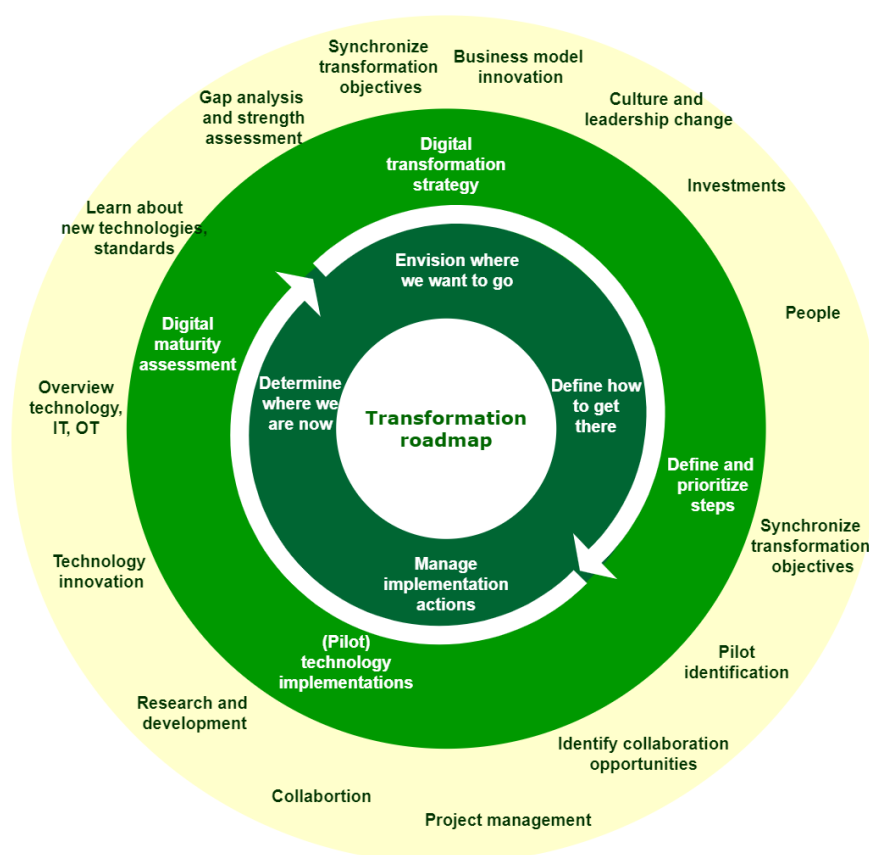
Metodologija

Cilji projekta INEVITABLE so tesno povezani z digitalizacijo in digitalno transformacijo v sodelujočih industrijskih podjetjih. Namen projekta pa ni zgolj zagotoviti rešitve za sodelujoče organizacije, ampak tudi zagotoviti prenosljivost rezultatov v preostala podjetja s podobno strukturo industrijskega okolja, kar prinaša možnost priprave metodologije s povezanimi orodji za podporo procesa digitalne transformacije.

Eden od temeljev pristopa je digitalizacijska infrastruktura, ki zahteva tako analizo poslovnih zahtev in zagotavljanje potrebnih tehnoloških storitev, ob upoštevanju potrebnih standardov ter dobrih praks – ti zagotavljajo okvire za učinkovito upravljanje, nivo varnosti, ter fleksibilnost.

Digitalna transformacija obstoječih procesov tipično poteka v ciklih, kot je prikazano na Slika 39. Vsak izmed korakov ima cilj dvigniti nivo digitalizacije v organizaciji, ob upoštevanju trenutne situacije, strategijo in cilje, skozi specifične projekte. Redno preverjanje statusa in doseženih ciljev omogoča organizaciji validacijo projektov, ki tečejo, ter prilagajanje ciljev digitalne strategije in projektov v fazi priprave.

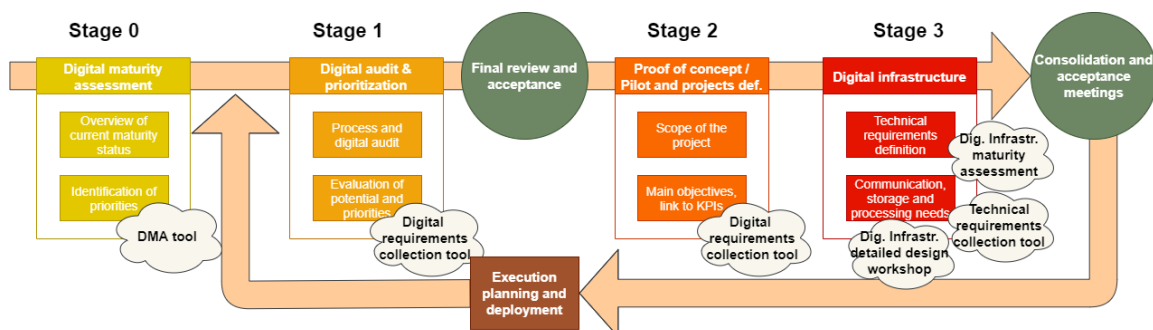
Slika 39: Ciklični koraki digitalne transformacije.



V teku projekta INEVITABLE je bila skladno s principi zgoraj opisanega krožnega pristopa razvita metodologija, ki omogoča vsem deležnikom ustrezno pripravo in prilagoditev končnih ciljev projekta, validacijo trenutnih rezultatov in stanja, ter tudi izbiro ustreznih tehnoloških rešitev (

Slika 40). Proces omogoča vsem deležnikom, da določijo jasne cilje oziroma merila uspeha, ter posledično tehnologijo za komunikacijo ter podatkovno infrastrukturo, ki bo zadostila tem ciljem. (Demšar, D5.2: Preparation of design principles for the communication infrastructure, 2021) (Demšar, D5.3: Preparation of design principles for the data infrastructure, 2021)

Slika 40: Metodologija za izbiro digitalne infrastrukture.



Pristop predvideva uporabo obstoječih orodij, s katerimi se lahko učinkovito zbere in pripravi potrebne informacije. Delo v korakih je pomembno za sistematično validacijo trenutnega stanja in ciljev, z namenom zasledovanja najustreznejše končne rešitve.

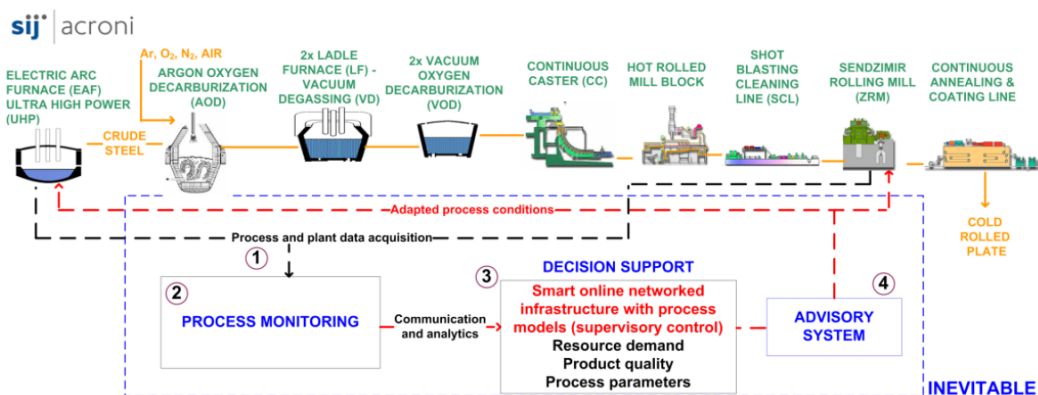
Glavni koraki v metodologiji so naslednji:

- **Korak 0 – Ocena digitalne zrelosti**
Ta korak je namenjen oceni trenutnega stanja v organizaciji in je namenjen določitvi strategije in ciljev. Orodja za oceno digitalne zrelosti (ang. DMA – Digital Maturity Assessment) so uporabljena, skupaj z analizo trenutne situacije in pomagajo pri določitvi najpomembnejših ciljev. Na voljo je precej različnih orodij, katerih uporaba se od primera do primera lahko razlikuje, predvsem glede na razpoložljive informacije, oziroma vire.
- **Korak 1 – Digitalna revizija in prioritizacija**
Pravilna določitev digitalizacijskih zahtev je ključna za končni uspeh projekta in v tej fazi se uporabi metodološki pristop, z namenom določitve obsega aktivnosti, ter ključnih kazalnikov za ugotavljanje uspešnosti (González & Santos, 2021) (Logar, Glavan, Gradišar, & Lončnar, 2021). Ko je to končano, se aktualni proces analizira z naslednjimi aktivnostmi:
 - Identifikacija glavnih spremenljivk procesa
 - Opis procesnih spremenljivk
 - Ocena kvalitete podatkov procesnih spremenljivk
 - Ocena digitalizacijskih okoliščin procesnih spremenljivk glede na vidik uporabe
- **Korak 2 – Definiranje testnih (PoC) oziroma pilotskih projektov**
V tem koraku se pripravi projekte, katerih namen je validacija konceptov digitalizacije. Pomembno je, da se njihovi cilji preslikajo na ključne kazalnike iz koraka 1.
- **Korak 3 – Digitalna infrastruktura**
Ta korak je namenjen zbiranju zahtev, povezanih z infrastrukturo. Različna orodja, kot so npr. DMA orodja, orodja za zbiranje tehničnih zahtev, ter delavnice namenjene dizajnu rešitev so uporabljena za doseg cilja, ki ga v tem koraku predstavlja tehnični dizajn digitalne infrastrukture, usklajen z zahtevami organizacije in procesa.

Metoda na primeru SIJ Acroni

Primer projektnega partnerja SIJ Acroni je sestavljen iz dveh industrijskih procesov iz obrata na Jesenicah (Slika 41). Prvi primer se nanaša na optimizacijo procesa pretaljevanja jeklenega odpadka v elektroobločni peči (EOP) (proces primarne metalurgije), drugi pa na optimizacijo hladnega valjanja zelo tankih pločevin na valjavskem ogrodju Sendzimir (ZRM). Obema industrijskima procesoma je skupna potreba po izboljššanju delovanja procesa, obširnejšem pridobivanju procesnih informacij, izboljššanju nadzora procesa, razvoju podpore odločanju in vpeljavi sistema za ta namen. Z učinkovitejšim vodenjem tehnoloških procesov se zmanjša poraba energije, posledično pa se zmanjša tudi vpliv na okolje (Logar, Glavan, Gradišar, & Lončnar, 2021).

Slika 41: Aktivni sistem podpore odločanju in nadzora za EOP in ZRM procesa v SIJ Acroni.



Specifikacija procesa EOP ter zahteve

Primer EOP procesa je pokazal na dva cilja izboljšav:

- izboljšanjem obratovalne prakse z izboljšanjem talilnih profilov
- izboljšanjem obratovalne prakse z ocenjevanjem neizmerjenih procesnih spremenljivk

V projektu INEVITABLE razvita podporna orodja za optimizacijo tehnoloških procesov izdelave jekel v elektroobločni peči bodo operaterjem v pomoč tako pri sprotni izdelavi taline (model za ocenjevanje temperature taline ter količino aktivnega kisika v talini) kot tudi pri optimizaciji procesa izdelave jekla (*uporaba simulatorja izdelave jekla v EOP za določanje temperaturnega profila izdelave jekla in ostalih vhodnih parametrov kot je velikost zakladanja*). Z vpeljavo optimizatorja za elektroobločno peč bo partner SIJ Acroni izboljšal produktivnost ob hkratnem izboljšanju energetske učinkovitosti in zmanjšanju ogljičnega odtisa.

Po izvedenem koraku definiranja glavnih ciljev izboljšav procesa so partnerji (UL – Fakulteta za Elektrotehniko, SIJ Acroni in Siemens Slovenija) pripravili specifikacije in zahteve za digitalno infrastrukturo. Te so:

- Dostop do vseh meritev procesa iz aktivnega podatkovnega vira, ki se posodablja v skoraj realnem času po tem, ko se meritev procesne spremenljivke izvede.

- Ustrezno visoka frekvenca vzorčenja procesnih spremenljivk.
- Ustrezna procesorska moč za analiziranje v skoraj realnem času
- Vizualizacija rezultat na HMI (ang. Human Machine Interface) napravi, za interakcijo med operatorjem stroja in tehnološkim okoljem.
- Platforma na osnovi kombinacije oblačne tehnologije in robnega računalništva, ki omogoča kombinacijo obdelave podatkov v območju stroja, ter dolgotrajno hrambo procesnih podatkov v oblaku (Logar, Glavan, Gradišar, & Lončnar, 2021).

Specifikacija procesa ZRM ter zahteve

V okviru optimizacije procesa ZRM se osredotočamo na dva cilja izboljšav:

- Sprotno aktivno prilaganje postopka izdelave in optimizacija glede na podatke iz senzorjev v stroju
- Zaznava anomalij skozi naknadno obdelavo zgodovinskih podatkov procesa in validacijo relacije med zajetimi parametri

V projektu razvita digitalna podporna orodja, s katerimi bo partner SIJ Acroni spremljal delovanje hladnega valjanja in diagnosticiral odstopanja v delovanju procesa ZRM, bodo omogočala optimizacijo procesnih veličin v receptih (nategi, začetne sile valjanja, ...), obenem pa bo orodje namenjeno simulaciji različnih načinov valjanja in detekciji anomalij. Z vpeljavo digitalnega dvojčka za ZRM bo partner SIJ Acroni izboljšal kakovost valjanih trakov (znižal tolerance valjanja trakov in izboljšal izkoristke valjanih trakov tanjših debelin), izboljšal produktivnost (zmanjšal število pretrgov in nenačrtovanih tehnoloških zastojev) ter posledično izboljšal energetske učinkovitost in zmanjšal emisije toplogrednih plinov.

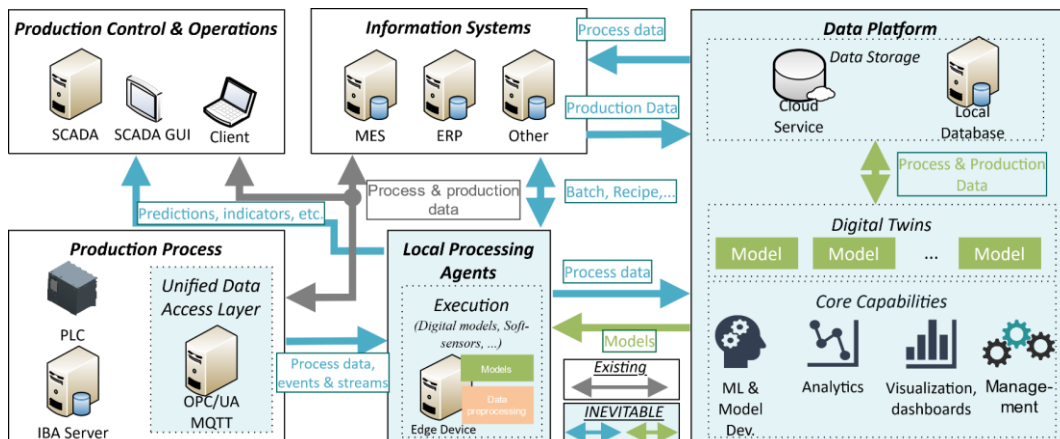
Na osnovi dela v namenskem delovnem paketu so partnerji (IJS – Inštitut Jožef Stefan, SIJ Acroni in Siemens Slovenija) pripravili naslednje specifikacije in zahteve za digitalno infrastrukturo:

- Dostopnost procesnih meritev sistema za beleženje zgodovinskih meritev »IBA« skozi industrijske protokole, kot so OPC UA in MQTT ter informacij iz podatkovne baze MES sistema na osnovi SQL
- Lokalna hramba procesnih meritev, v bližini stroja
- Visoka frekvenca vzorčenja, potrebna za zaznavo anomalij na pogonih v stroju
- Platforma omogoča uporabo Python kode ter upravljanje Python okolja
- Hibridna rešitev z integracijo oblačnih tehnologij in lokalnega strežniškega okolja
- Možnost prikazovanja HMI vmesnika na osnovi spletnih tehnologij
- Robni strežnik mora imeti možnost po-procesne obdelave procesnih parametrov
- Dolgoročna možnost upravljanja s platformo robnega računalništva, hkrati z možnostjo lokalnega upravljanja

Logična shema digitalne infrastrukture

Eden ključnih stebrov, ki omogoča kibernetško-fizično konvergenco je digitalna infrastruktura. Z zmožnostjo povezovanja kibernetškega in fizičnega okolja, se podatki iz industrijskih naprav konsolidirajo v informacijskem sloju modela RAMI 4.0, na katerem sloni razvoj storitev in rešitev.

Slika 42: Logična topologija digitalne infrastrukture.



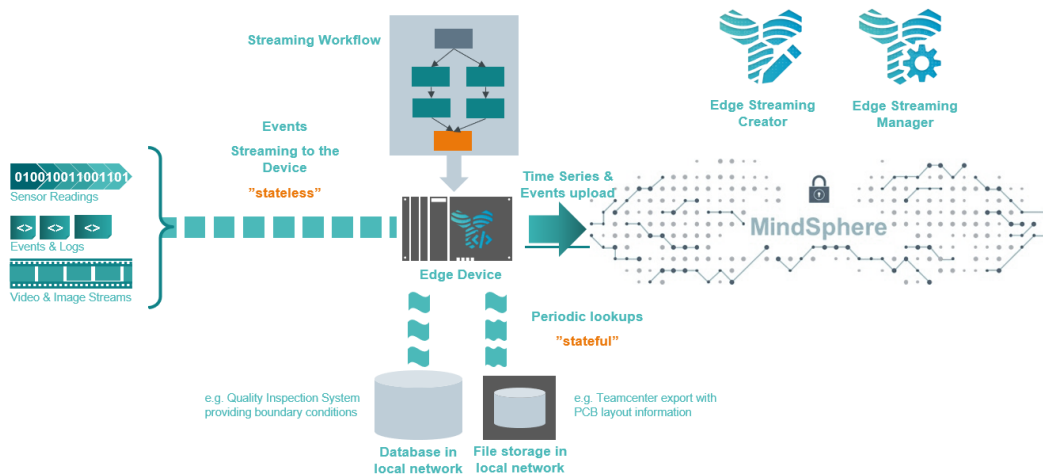
Slika 42 prikazuje primer digitalne infrastrukture, ki je bil pripravljen v sklopu projekta za obravnavane proizvodne procese. Na njej so z modrim poudarkom prikazani novo dodani elementi iz področja Industrijskega interneta stvari (ang. Industrial Internet of Things ali IIoT).

Pilotski projekt

Na osnovi predhodno določenih zahtev in specifikacij je bil v koraku 2 metodologije, opisane na sliki 40, pripravljen pilotski projekt, ki temelji na uporabi sodobnih IIoT tehnologij za vzpostavitev digitalne infrastrukture. Za osnovo je bil predlagan sistem MindSphere, eden od vodilnih industrijskih oblakov oziroma kombiniranih PaaS/SaaS rešitev. (Siemens AG, 2022) (Gartner, 2022) Le-ta omogoča vključevanje dodatnih aplikacij partnerskih ponudnikov in uporabo dodatnih aplikacij znotraj MindSphere. Za aktivno sprotno analitiko podatkovnih tokov je bila predlagana MindSphere aplikacija »ESA« – Edge Streaming Analytics podjetja SAS, ki je sicer bolj znana in pogosto uporabljena v poslovnih, predvsem finančnih krogih, ima pa področje uporabnosti tudi drugje, kjer je potrebna hitra sprotna analitika z možnostjo izdelave prilagojenih modelov strojnega učenja. Arhitektura predlagane rešitve z uporabo MindSphere oblaka, aplikacije Edge Streaming Analytics ter robnega računalništva je prikazana na

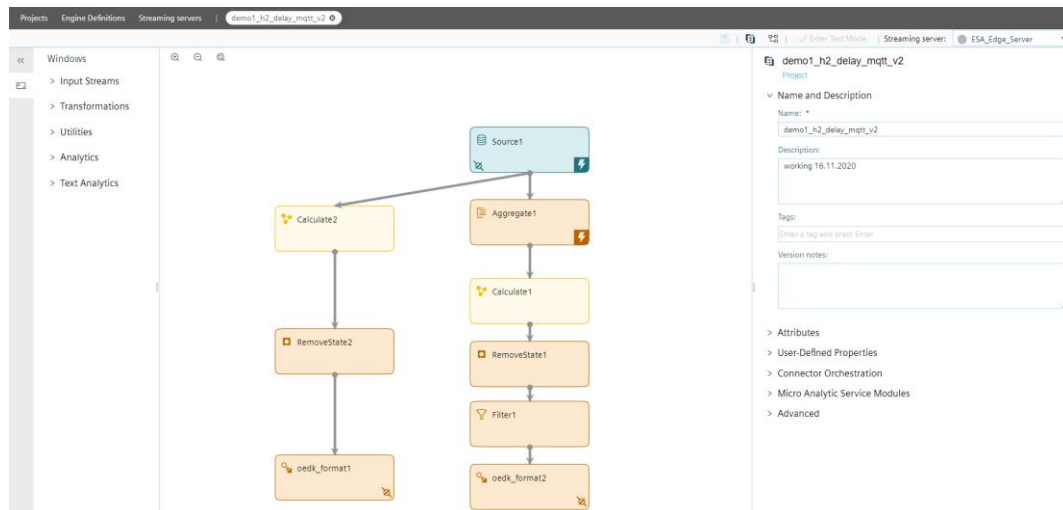
Slika 43.

Slika 43: Industrijska oblčna platforma s kombinacijo robnega računalništva.



Poleg klasičnih aplikacij v okolju MindSphere sta na voljo še dve – »Edge Streaming Creator« in »Edge Streaming Manager«. Ti omogočata upravljanje robnih strežnikov v oblaku, ter razvoj, validacijo in prenos modelov v aktivno delovanje na robnih strežnikih. Konfiguracija ter delo z aplikacijama poteka preko spletnega grafičnega vmesnika - Slika 44 prikazuje postopek ustvarjanja podatkovnega toka v aplikaciji Edge Streaming Creator.

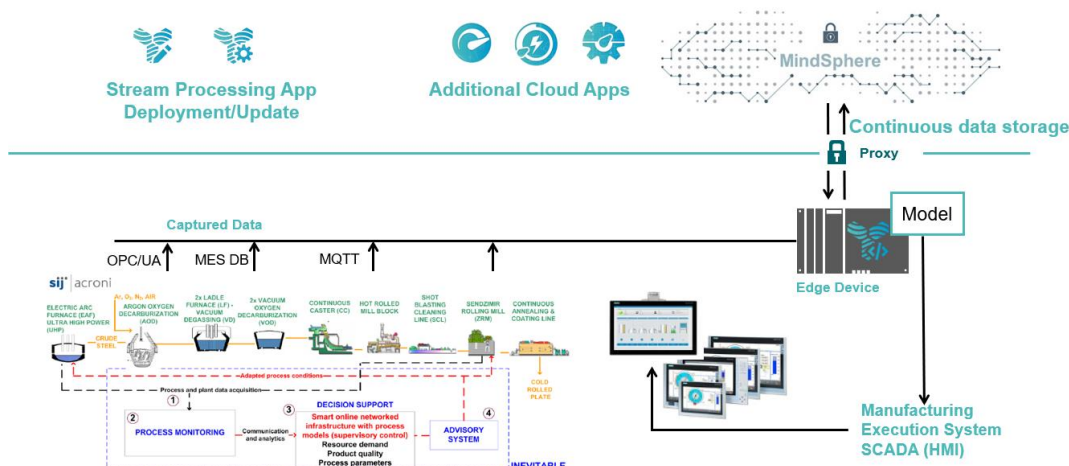
Slika 44: Okno aplikacije "Edge Streaming Creator" - razvoj modela za analizo podatkovnega toka.



Konfiguracija modela poteka v obliki kreiranja podatkovnega toka, v katerem iz različnih podatkovnih virov pridobimo potrebne podatke, kasneje izvedemo različne obdelave nad temi podatki, ter rezultate posredujemo nazaj v proizvodni proces in/ali v hrambo. Pogajanje modelov na robnem strežniku omogoča obdelavo v skoraj realnem času, ter uporabo rezultatov v proizvodnem procesu v različnih povratnih zankah. Del obdelanih rezultatov se posreduje v MindSphere oblak, kjer se dolgoročno shrani, hkrati pa omogoča razne statistične obdelave, hkrati pa je tudi podlaga za izboljšave samega modela. Topologija celotne rešitve je razvidna iz slike 9, ki prikazuje vključitev podatkov iz proizvodnega okolja SIJ Acroni v proces obdelave

podatkovnih tokov ter vračanje rezultatov nazaj v proizvodni proces, na drugi strani pa shranjevanje procesnih informacij v oblak za kasnejšo analizo.

Slika 45: Topologija rešitve na osnovi oblačnih tehnologij v kontekstu SIJ Acroni.



Med procesom validacije rešitve modelov za primera EOP in ZRM bodo podatki pridobljeni iz »IBA« zgodovinskega strežnika in MES podatkovne zbirke za primer ZRM oziroma pridobljeni iz PLC-jev in MES podatkovne zbirke za primer EOP, obdelani s pomočjo ESA na robnem strežniku, rezultat bo pa posredovan nazaj v upravljavski proces na HMI naprave operaterjev, ki bodo lahko na podlagi te informacije prilagodili proces. Zgodovinski podatki teh procesov bodo posredovani v MindSphere, kjer bo pripravljena vizualizacija teh, ter statistični pregledi učinkovitosti delovanja modelov. V MindSphere bo s pomočjo platforme za strojno učenje možno tudi prilagajati posamezne dele ESA modelov; predvsem gre tu za izboljšave računskih delov modelov.

S pomočjo razvite metodologije bo mogoče pilotski projekt nadzorovati ter ugotavljati celotno uspešnost izvedbe ter ustreznost rešitve glede na kriterije in ključne kazalnike, ki so bili določeni, kar je podlaga za prehod v kasnejšo produkcijo uporabo.

Zaključek

Uporaba pripravljene metodologije je omogočila pripravo digitalne platforme s kognitivnimi funkcionalnostmi, katere cilji so povezani z izboljšanjem ključnih kazalnikov v izbranih jeklarskih procesih. Hkrati z aplikacijo metodologije je potekala tudi njena validacija, skozi katero se je izkazalo, da so posamezne faze jasno določene, med seboj pa tudi smiselno povezane, tako da vsaka s svojimi rezultati omogoča uspešno delo v naslednji.

Izbira industrijske platforme se je izkazala za pravilno, je pa začetni fazi prišlo do nekaj ovir, ki jih lahko pripišemo dejstvu, da so tehnologije nove – temeljijo sicer na preverjenih osnovah, vendar njihova usmerjenost v industrijska okolja zahteva nekaj svežih pristopov, kjer je bilo potrebno vložiti malo več napora. Prednost takega pristopa je po drugi strani tudi popolna

osredotočenost na implementacijo funkcionalnosti, brez dela na področju tehnične platforme, ki je že razpoložljiva v okviru oblačnih storitev, kar prihrani precej dela. Poleg tega so tehnični vidiki platforme, vključno s kibernetsko varnostjo, upravljani s strani ponudnika, kjer se upošteva potrebne standarde informacijske varnosti in zaščite. Edge Streaming Analytics se je izkazal prav tako za izredno zmogljivo orodje, ki pa s svojo osredotočenostjo na obdelavo podatkovnih tokov prinaša spremembo paradigme obdelave podatkov v skoraj realnem času. To je sicer zahtevalo prilagoditev predhodno razvitih modelov, trenutni rezultati pa nakazujejo, da je pristop uspešen.

Celotna rešitev vključuje množico rešitev, ki trenutno predstavljajo vrh napredka na področju digitalizacije industrijskih procesov, ob upoštevanju potrebe po tem, da mora zrelost rešitev, ki se uvajajo v industriji biti na višji stopnji, predvsem kar se tiče zanesljivosti. Pri tem pa seveda nikakor ne gre zanemariti ključnega vidika vseh aktivnosti, ki se nanašajo na digitalno transformacijo – to je pravilno sestavljena ter strokovna ekipa, ki se s takšnimi rešitvami ukvarja. Danes to pomeni vključevanje deležnikov iz izobraževalnega okolja, raziskovalce, tehnično strokovno osebje, ter predstavnike industrije, ki imajo ključno domensko znanje, potrebno za uspeh.

Zahvala

Delo je bilo izvedeno v okviru mednarodnega projekta INEVITABLE (*“Optimization and performance improving in metal industry by digital technologies”*) (GA No. 869815), ki je sofinanciran s strani Evropske komisije v okviru programa Obzorja 2020, SPIRE.

Viri in literatura

Abrams, L. (13. 1 2022). *Microsoft pulls new Windows Server updates due to critical bugs.*

Pridobljeno iz Bleeping Computer:

<https://www.bleepingcomputer.com/news/microsoft/microsoft-pulls-new-windows-server-updates-due-to-critical-bugs/>

Center for Internet Security. (23. 1 2022). *Center for Internet Security.* Pridobljeno iz Center for Internet Security: <https://www.cisecurity.org/>

Demšar, M. (2021). D5.2: Preparation of design principles for the communication infrastructure. INEVITABLE Project.

Demšar, M. (2021). D5.3: Preparation of design principles for the data infrastructure. INEVITABLE Project.

González, A., & Santos, F. (2021). Final requirements & specifications for Use case 3: Deployment of digital cognitive architecture in nonferrous industrial case. INEVITABLE Project.

IEC. (2010). IEC 62443-2-1: Security for Industrial Automation and Control Systems, Part 2-1: Establishing an Industrial Automation and Control Systems Security Program. IEC.

IEC. (2013). IEC 62443-3-3: Security for Industrial Automation and Control Systems, Part 3-3: System security requirements and security levels. IEC.

IEC. (2018). IEC 62443-4-1: Security for Industrial Automation and Control Systems, Part 4-1: Secure product development lifecycle requirements. IEC.

IEC. (2019). IEC 62443-4-2: Security for Industrial Automation and Control Systems, Part 4-2: Technical security requirements for IACS components. IEC.

IEC 62443-2-4. (8 2017). Security for industrial automation and control systems - Part 2-4: Security program requirements for IACS service providers.

ISA. (20. 7 2021). *White Paper: Applying ISO/IEC 27001/2 and the ISA/IEC 62443 Series for Operational Technology Environments*. Pridobljeno 18. 8 2021 iz <https://www.isa.org/news-press-releases/2021/july/new-white-paper-applying-iso-iec-27001-2-and-the-i>

ISO/IEC 27019:2017. (6. 8 2022). Pridobljeno iz ISO: <https://www.iso.org/standard/68091.html>

Logar, V., Glavan, M., Gradišar, D., & Lončnar, M. (2021). Final requirements & specifications for Use case 1: Implementation of the EAF and ZRM optimization. INEVITABLE Project.

NIST. (23. 1 2022). *Industrial Control Systems Cybersecurity*. Pridobljeno iz National Institute for Standards and Technology: <https://www.nist.gov/industry-impacts/industrial-control-systems-cybersecurity>

Raptis, T. P., Passarella, A., & Conti, M. (2019). Data Management in Industry 4.0: State of the Art and Open Challenges. *IEEE Access*, 7.

VDI/VDE Society Measurement and Automatic Control. (2018). Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). VDI/VDE Society Measurement and Automatic Control.

Wollschlaeger, M., Sauter, T., & Jasperneite, J. (2017). The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1), 17-27.