

Optimizacija delovanja elektroobločne peči prek intuitivnega uporabniškega vmesnika na platformi Siemens MindSphere

Simon Tomažič, Vito Logar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: simon.tomazic@fe.uni-lj.si

Povzetek. V prispevku je predstavljen nov in inovativen sistem podpore odločanju za operaterje elektroobločne peči, namenjen optimizaciji učinkovitosti upravljanja procesov. Ta sistem združuje dve orodji, in sicer Simulator EOP ter Optimizator EOP, ki vključujeta napredne mehanistične in podatkovne modele. Ti so bili izurjeni na zgodovinskih podatkih ter omogočajo simulacijo načrtovanih šarž s podatki v realnem času. Tako so operaterjem na voljo dragocene informacije, ki jih vodijo pri prilagajanju nastavitvev peči. Ključna lastnost sistema je intuitiven grafični vmesnik, implementiran v okolju Siemens MindSphere ter Node-RED, ki omogoča interaktivno analizo in upravljanje. Prek tega vmesnika lahko operaterji analizirajo in primerjajo zgodovinske šarže s simulacijami ter prilagajajo različne vhodne podatke in parametre taljenja. Orodja ponujajo možnost določanja optimalnih nastavitvev peči, kar pripomore k optimizaciji procesa in zmanjšanju obratovalnih stroškov predvsem porabe električne energije. Sistem podpore odločanju je mogoče predstaviti tudi kot zmožljiv digitalni dvojček, ki operaterjem elektroobločne peči zagotavlja podlago za informirane odločitve, kar vodi k trajnejšemu in ekonomičnejšemu delovanju.

Ključne besede: uporabniški vmesnik, sistem za podporo odločanju, MindSphere, elektroobločna peč, storitve v oblaku, MQTT, optimizacija procesa, digitalni dvojček

Optimising the operation of an electric arc furnace through an intuitive user interface on the Siemens MindSphere platform

The paper presents a new and innovative decision support system for electric arc furnace operators to optimise the process control efficiency. The system combines two tools, the EAF Simulator and EAF Optimiser, which contain advanced mechanistic and data-driven models. They have been trained using historical data and allow simulation of planned batches with real-time data. This provides operators with valuable information on how to adjust furnace settings. The main feature of the system is the intuitive graphical interface implemented in the Siemens MindSphere environment and Node-RED, which enables interactive analysis and management. The interface allows operators to analyse historical batches and compare them with simulations, as well as adjust various input data and melting parameters. Furthermore, the tools added benefit of being able to determine the optimal furnace settings to optimise the process and reduce operating costs, particularly energy consumption. The decision support system is a powerful digital twin that helps electric arc furnace operators make decisions and leads to more sustainable and efficient operations.

1 UVOD

Z razmahom digitalizacije in tehnologije interneta stvari (IoT) [1] so se pojavile nove priložnosti za izboljšanje procesov in povečanje učinkovitosti v industriji. V za-

dnjem desetletju je industrija dosegla drastičen napredek, saj so se tradicionalni proizvodni procesi začeli preoblikovati s pomočjo digitalnih tehnologij. Razvoj in implementacija algoritmov ter sistemov, ki operaterjem procesov nudijo učinkovito podporo pri odločanju na podlagi preteklih podatkov in/ali podatkov v realnem času ter naprednih modelov [2, 3, 4], sta priložnost za izboljšanje učinkovitosti procesov in s tem povečanje produktivnosti.

V sodobni industriji so simulacijska okolja ključnega pomena [5, 6], saj omogočajo testiranje in optimizacijo procesov v varnem in nadzorovanem okolju, preden se spremembe uvedejo v dejansko proizvodnjo. Simulacije inženirjem in operaterjem procesov omogočajo, da predvidijo morebitne težave, optimizirajo delovanje sistema in zagotovijo boljše rezultate brez nepotrebnih stroškov ali izgubljenega časa [7, 8].

Kljub tehnični dovršenosti simulacijskih okolij je ključnega pomena, da je uporabniški vmesnik intuitiven. Intuitiven uporabniški vmesnik uporabnikom omogoča, da hitro in učinkovito dostopajo do potrebnih informacij, analizirajo rezultate in sprejemajo odločitve brez nepotrebnega zapravljanja časa ali napora. Intuitivnost vmesnika lahko zmanjša napake, poveča produktivnost in zagotovi, da se vse prednosti digitalne tehnologije v celoti izkoristijo.

V tem kontekstu je platforma Siemens MindSphere [9] postala ena izmed vodilnih rešitev za industrijo 4.0,

ki omogoča povezovanje, analizo in vizualizacijo podatkov v realnem času. Predstavljeno delo se nanaša na eno od tem projekta Evropske unije INEVITABLE [10], katerega cilj sta optimizacija in izboljšanje proizvodnih procesov z uporabo digitalnih tehnologij. V okviru tega projekta smo razvili intuitivni uporabniški vmesnik za optimizacijo delovanja elektroobločne peči, ki temelji na platformi Siemens MindSphere.

Članek je razdeljen na pet poglavij. Naslednje poglavje v grobem opisuje proces taljena jekla v elektroobločni peči, za katerega so bili razviti modeli in uporabniški vmesniki, opisani v tem prispevku. V tretjem poglavju sta predstavljena sistem za podporo odločanju in platforma, na kateri temelji predlagana rešitev. Četrto poglavje podrobneje predstavlja celotno rešitev in s tem povezane grafične uporabniške vmesnike. V zadnjem poglavju so podane ugotovitve.

2 ELEKTROOBLOČNA PEČ

Elektroobločna peč (EOP), ki se je v industriji uporabljala že pred več kot sto leti, zgodovinsko še vedno velja za velik tehnološki preboj v industriji recikliranja jekla, saj še danes ustreza sodobnim smernicam krožnega gospodarstva. Gre za tip peči, zasnovan posebej za taljenje odpadnega jekla. Njeno delovanje temelji na električnem obloku, ki prepušča električni tok skozi zrak ali plazmo pri visokih temperaturah, ki se gibljejo med 4.000 in 6.000 K. To ne povzroči samo taljenje jekla, ampak omogoča tudi pretvorbo staljenega jekla v nove, uporabne izdelke.

Osrednji del EOP je peč, katere notranjost je obložena z ognjevzdržnim materialom za preprečevanje prekomernega segrevanja. Za prenos električne energije v peč se uporabljajo grafitne elektrode, ki ustvarjajo električni oblok za taljenje založenega materiala. Da bi zagotovili optimalno delovanje in varnost, je peč opremljena z vrsto drugih komponent. Zmogljiv transformator (z močjo do 250 MVA) prilagaja napetost in tok, potreben za ustvarjanje električnega obloka, medtem ko sistem za dovod plina, običajno argona, zmanjšuje oksidacijo in poškodbe elektrod. Za uravnavanje temperature je vgrajen hladilni sistem, poleg tega je tu še sistem za odvajanje prahu in plinov, ki skrbi za odstranjevanje nezaželenih odpadnih produktov, sproščenih med postopkom. Stopljeno jeklo se nato s pomočjo sistema za nalivanje prelije v kalupe, da se iz njega oblikujejo novi izdelki. Ves ta postopek se nadzira s pomočjo kontrolnega panela, ki operaterju omogoča celovit pregled in upravljanje peči.

V procesu taljenja v EOP se poleg taline tvori tudi žlindra, ki ima ključno vlogo pri čiščenju staljenega jekla. Žlindra je stranski produkt, sestavljen iz oksidov, kovin, silikatov in drugih nečistoč. Med taljenjem plava na površini stopljenega jekla in pomaga pri odstranjevanju nečistoč iz jekla, saj se nečistoče bolj topijo v žlindri kot v jeklu. Poleg čiščenja ima žlindra tudi druge

koristne funkcije, kot so izolacija stopljenega jekla, kar zmanjšuje izgubo toplote, zakritje oblokov in posledično manj izgub s sevanjem, zaščita jekla pred oksidacijo ter uravnavanje kemične sestave in temperature jekla. Po končanem postopku taljenja se žlindra običajno odstrani, obdeluje in lahko ponovno uporabi v različne industrijske namene ali pa se odloži na posebej določenih mestih. Vloga žindre je zelo pomembna, saj omogoča izdelavo kakovostnejših jeklenih izdelkov in prispeva k učinkovitejši in trajnostni uporabi virov.

Shematični prikaz delovanja EOP je prikazan na sliki 1. Ta tehnologija je ključna za trajnostno prihodnost industrije, saj jeklo, eden najbolj uporabljenih materialov na svetu, omogoča recikliranje brez poslabšanja kakovosti. Če primerjamo proces taljenja jekla v EOP s procesom v oksidacijski talilni peči (BOF), se izkaže, da je postopek EOP energetsko učinkovitejši in zahteva manj surovin. To je še posebej pomembno, saj približno 30 % svetovne proizvodnje jekla izvira iz procesa EOP. Tako EOP ne izpolnjuje le potreb industrije, ampak tudi znatno prispeva k zmanjšanju porabe energije in ohranjanju naravnih virov.

3 SISTEM ZA PODORO ODLOČANJU

Sistem za podporo odločanju pri procesu EOP je namenjen pomoči operaterju pri sprejemanju učinkovitih odločitev v zvezi z upravljanjem elektroobločne peči. Na podlagi arhivskih in uporabniško opredeljenih vhodnih podatkov sistem operaterju zagotavlja ustrezne informacije, ki jih potrebuje za izboljšanje procesa. Razviti sta bili dve podporni orodji, in sicer Simulator EOP, ki je namenjen simulaciji procesa EOP, in Optimizator EOP, ki je namenjen optimizaciji porabe električne energije v EOP. Omenjeni orodji sta podrobneje opisani v nadaljevanju.

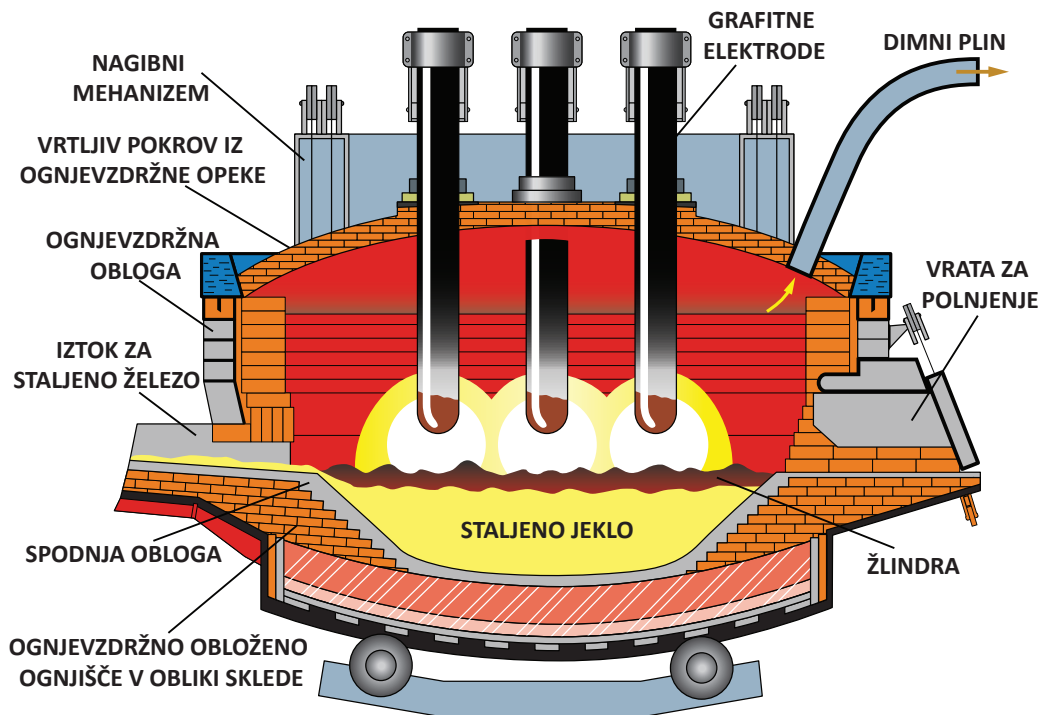
Obe orodji za podporo odločanju sta implementirani lokalno na strežniku Siemens Edge, ki omogoča medsebojno komunikacijo med lokalnim grafičnim uporabniškim vmesnikom in vmesnikom v oblaku prek protokola MQTT [11]. Takšna izvedba uporabniku omogoča izbiro med uporabo lokalne (Node-RED [12]) in oblačne (MindSphere Visual Flow Creator - VFC [13]) različice grafičnega vmesnika. Zato je simulator trenutno zasnovan tako, da ga lahko naenkrat uporablja samo en uporabnik.

3.1 Okolje Siemens MindSphere

Siemens MindSphere je vodilna rešitev za industrijski internet stvari – IIoT v oblaku, ki podpira celoten ekosistem IIoT. Z napredno analitiko in umetno inteligenco MindSphere združuje podatke iz povezanih izdelkov, obratov in sistemov za optimizacijo delovanja, ustvarjanje kakovostnejših izdelkov in uvajanje novih poslovnih modelov [9].

Storitev MindSphere omogoča tudi robno računalništvo za izvajanje in obdelavo podatkov

PROIZVODNJA JEKLA V ELEKTROOBLOČNI PEČI



Slika 1: Proizvodnja jekla v elektroobločni peči.

na robu (prek aplikacije Edge Streaming Analytics [14]), kar zagotavlja večjo robustnost, obdelavo v realnem času in hiter odziv na spremembe. Hkrati se podatki z robne naprave prenesejo v oblak za daljše obdobje shranjevanja ter poznejšo in celovitejšo analizo.

MindSphere omogoča upravljanje, analizo in uporabo podatkov za optimizacijo proizvodnje, povečanje učinkovitosti in izboljšanje storitev. Vključuje tudi aplikacije za napovedovanje napak, nadzor kakovosti in upravljanje zalog ter druge aplikacije, potrebne za izboljšanje poslovnih procesov. Prav tako vključuje različne aplikacije in storitve za obdelavo podatkov, ki jih lahko uporabniki uporabljajo za izboljšanje svojih poslovnih procesov.

3.2 Visual Flow Creator

Ena od omenjenih aplikacij znotraj okolja MindSphere je tudi Visual Flow Creator [13], ki je bila razvita posebej za internet stvari in omogoča vizualni pretok podatkov. VFC je izpeljanka programskega orodja Node-RED in temelji na tako imenovanih vozliščih. Ta vozlišča predstavljajo preproste, vnaprej določene funkcionalne enote, ki lahko sprejemajo, obdelujejo in pošiljajo podatke. Med seboj jih je mogoče povezati

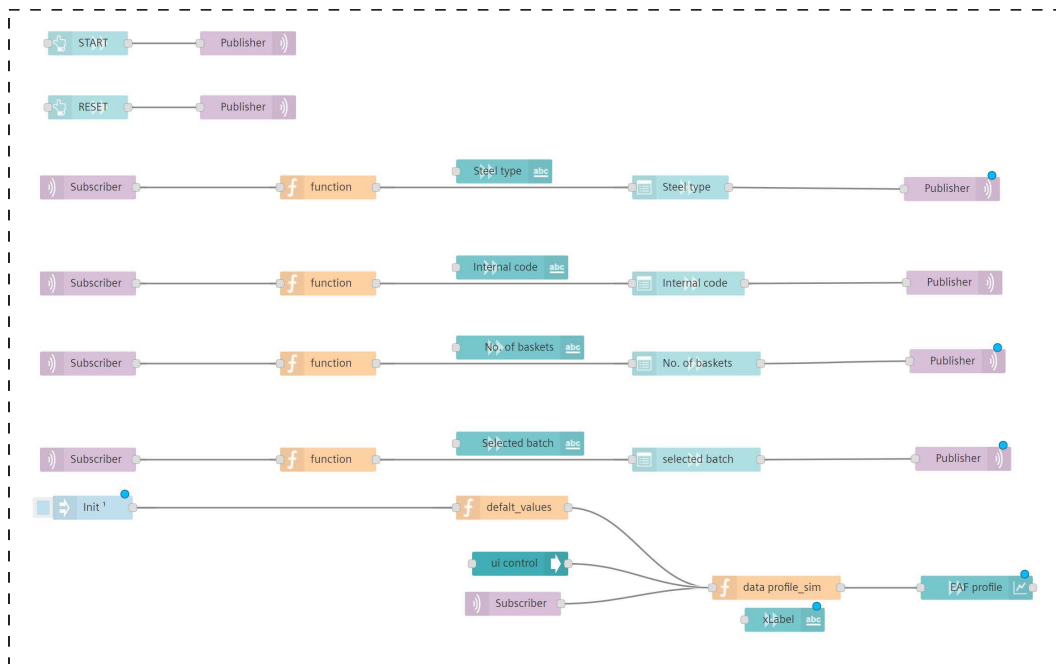
in dodati na delovno območje, kar omogoča hitro in preprosto konfiguracijo zapletenih podatkovnih tokov.

VFC se ponaša z bogato knjižnico vozlišč, ki omogočajo integracijo z različnimi platformami in storitvami. V kontekstu varnosti je okolje zasnovano tako, da zagotavlja zaščito podatkovnih tokov, kar je še zlasti pomembno v svetu interneta stvari. Za tiste, ki želijo prilagoditi delovanje, VFC omogoča dodajanje lastnih vozlišč in prilagojenih funkcij, ki ustrezajo specifičnim potrebam.

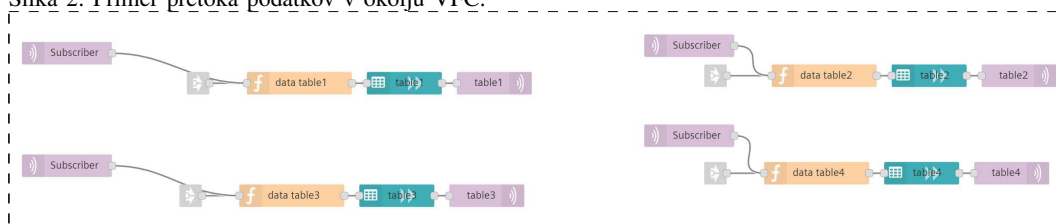
Vizualno ali grafično programiranje omogoča hitrejši razvoj in izvedbo prototipne rešitve. Ena od prednosti uporabe VFC je združljivost s platformo Node-RED, kar pomeni, da je mogoče program razviti in preizkusiti v okolju Node-RED na lokalnem računalniku, po preizkusu pa ga z minimalnimi popravki uvoziti v oblako okolje VFC. Slika 2 prikazuje primer zasnove uporabniškega vmesnika v okolju VFC.

3.3 Izmenjava podatkov

Izmenjava podatkov med EOP modelom oz. modelom porabe električne energije [2] in uporabniškim vmesnikom (v okolju Node-RED in MindSphere) v celoti temelji na protokolu MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) [11]. Odprtokodni protokol MQTT, ki



Slika 2: Primer pretoka podatkov v okolju VFC.



Slika 3: Primer podatkovnega toka za komunikacijo prek MQTT protokola.

deluje po načelu objavi-naroči (angl. publish-subscribe), zagotavlja enostavno in zanesljivo komunikacijo med programskimi moduli in napravami. Razvit je bil za uporabo v industrijskih aplikacijah in IoT s ciljem učinkovite izmenjave podatkov ter podpira tudi različne kategorije storitev, vključno s kakovostjo storitev – QoS in vzdrževanjem stanja povezave, kar zagotavlja zanesljiv prenos podatkov tudi ob omejenih virih naprave ali šibkejši omrežni povezavi.

Primer izmenjave podatkov prek protokola MQTT v okolju VFC je prikazan na sliki 3. V tem primeru se sporočilo MQTT z določenimi podatki prek vhodnega vozlišča "Subscriber" pretvori v objekt JSON in nato prek funkcije (zapisane v jeziku JavaScript) v ustrezno obliko za prikaz v tabeli (definirani v formatu JSON). Vsaka sprememba v tabeli se prek sporočila MQTT pošlje v potrditev v okolje modela EOP prek izhodnega vozlišča "Publisher" vnaprej določeno temo (angl. topic).

3.4 Interaktivni grafični elementi po meri

Glede na zahteve pri zasnovi uporabniškega vmesnika je bilo treba implementirati več prilagojenih vozlišč, ki predstavljajo ustrezne interaktivne grafične elemente, saj VFC v okolju Siemens MindSphere v osnovi ne

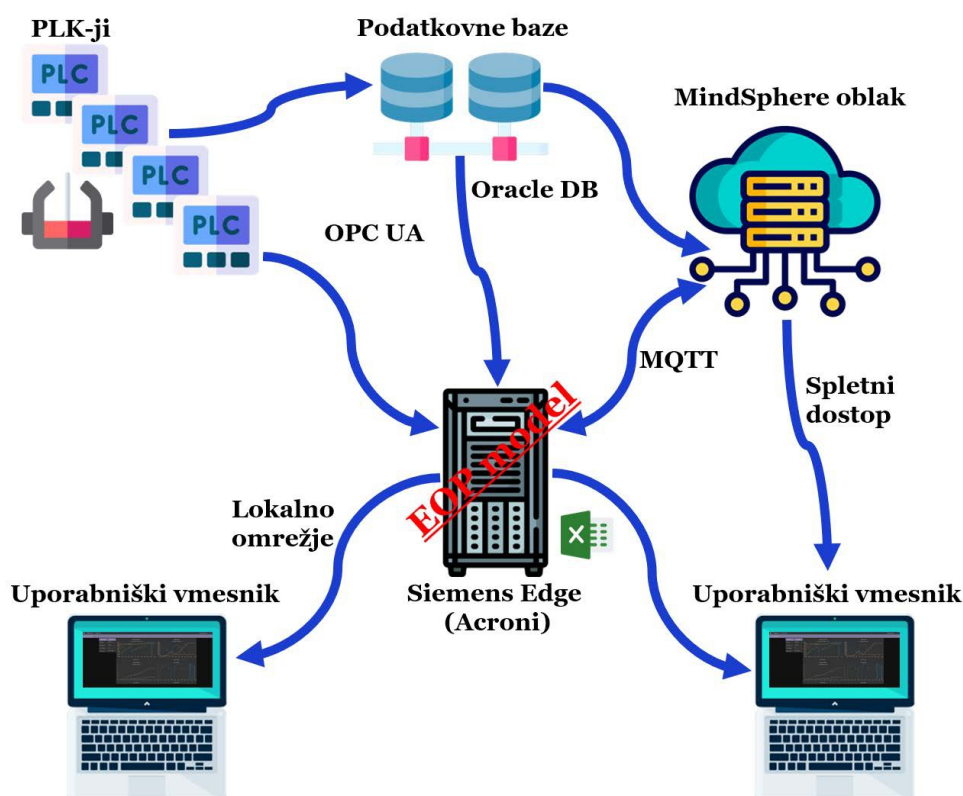
podpira vseh vozlišč, ki so za ta namen na voljo v okolju Node-RED. Za rešitev potreb po prilagojenih komponentah lahko uporabimo sklad tehnologij, znan kot "frontendšklad HTML/CSS/JS, s katerim lahko ustvarjamo interaktivne grafične elemente. V našem primeru so bili s takšnim pristopom razviti naslednji elementi:

- spustni seznam z možnostjo izbire več elementov;
- I/O tabele, ki omogočajo prikaz in urejanje posameznih polj ter po vsaki spremembi posredujejo informacije v EOP model;
- drsniki s poljubno ločljivostjo za nastavitve vplivnih parametrov modela EOP.

Po temeljiti primerjavi obeh platform lahko ugotovimo, da je Node-RED v številnih aspektih bolj vsestranski, medtem ko je Visual Flow Creator z optimizacijami na področju varnosti in upravljanja dostopa robustnejši in prilagojen za industrijsko okolje.

4 REZULTATI

V tem poglavju je predstavljena celovita rešitev, tj. sistem za podporo odločanju, ki vključuje dve orodji – Simulator EOP in Optimizator EOP. Grafična vmesnika



Slika 4: Struktura orodja Simulator EOP.

obeh orodij sta bili implementirana tako v okolju Node-RED kot tudi v Siemens MindSphere.

4.1 Simulator EOP

Namen orodja Simulator EOP je (off-line) simulacija procesa EOP z uporabo arhivskih ali uporabniško definiranih vhodnih podatkov, da bi operater lahko analiziral delovanje sistema v različnih scenarijih, preizkusil različne strategije delovanja ali prakse (recepte) in preveril njihov vpliv na učinkovitost sistema EOP.

Orodje omogoča simulacijo delovanja EOP, pri čemer je mogoče spreminjati vse ključne vhodne podatke (mase založenih materialov po posameznih košarah, transformatorski profil EOP, profil dodatnega ogljika in profil dodatnega kisika) in tako opazovati spremembe v delovanju sistema EOP. Orodje omogoča tudi primerjavo simuliranih rezultatov za poljubno število preteklih šarž, kar omogoča neposredno primerjavo rezultatov in opazovanje odstopanj med njimi glede na spremembe vhodnih podatkov, ki jih izvede uporabnik.

Struktura celovite rešitve simulacije EOP je prikazana na sliki 4. Ključni gradniki celovite rešitve so mehanistični model EOP, aplikacija za zbiranje in predobdelavo podatkov Edge Streaming Analytics (okolje MindSphere) ter Node-RED, ki delujeta na robu (Edge server), in MindSphere VFC, ki deluje v oblaku. Komunikacijski protokol za zbiranje podatkov s PLC je

OPC-UA [15], za interakcijo med modelom in grafičnim vmesnikom pa se uporablja protokol MQTT. Do uporabniškega vmesnika je mogoče dostopati prek portala MindSphere (VFC) ali lokalno (Node-RED).

Prva podstran grafičnega uporabniškega vmesnika (slika 5) vsebuje le ključne elemente, potrebne za zagon simulacije, ponastavitev parametrov, spustna polja za izbiro vhodnih podatkov (preteklih šarž) in štiri grafe, ki prikazujejo temperature, mase, energije in profil transformatorja EOP med postopkom taljenja.

Druga podstran (slika 6) omogoča nastavitve parametrov simulacije prek vhodno-izhodnih tabel. V zgornji tabeli "Inputs" (vhodi) uporabnik nastavi mase založenih materialov po posameznih košarah, v tabelah ob grafih pa profil za transformator EOP, profil dodatnega ogljika (C) ter profil dodatnega kisika (O_2).

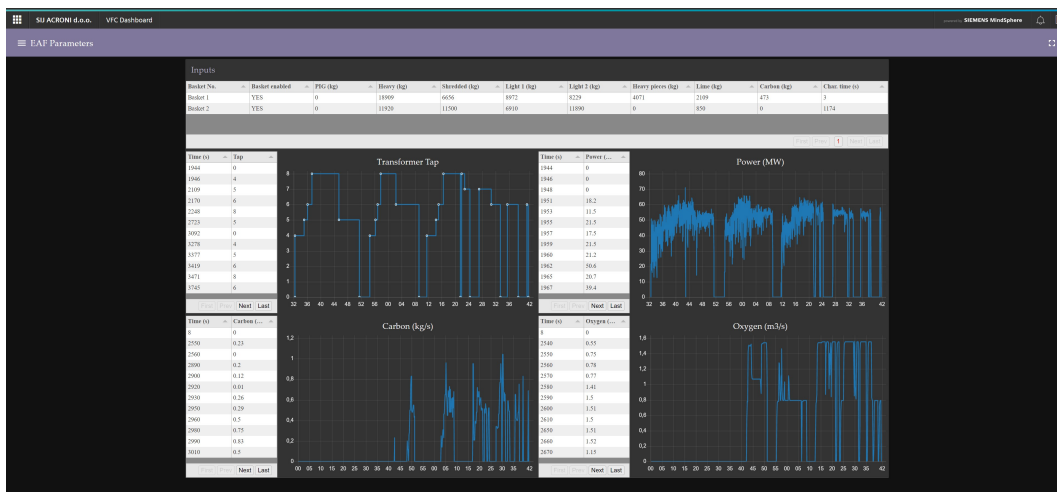
Tretja podstran (slika 7) je namenjena primerjavi rezultatov simulacij ob spreminjanju vhodnih parametrov. Uporabnik prek spustnega seznama najprej izbere pretekle simulacije, ki jih želi primerjati, nato na grafih izbere zelene spremenljivke za prikaz.

4.2 Optimizator EOP

Namen orodja Optimizator EOP, ki temelji na mehkem (fuzzy) modelu [2], je optimizacija porabe električne energije v EOP (off-line) z uporabo arhivskih ali uporabniško določenih vhodnih podatkov. Orodje



Slika 5: Glavna (nadzorna) stran.



Slika 6: Nastavitev parametrov simulacije.

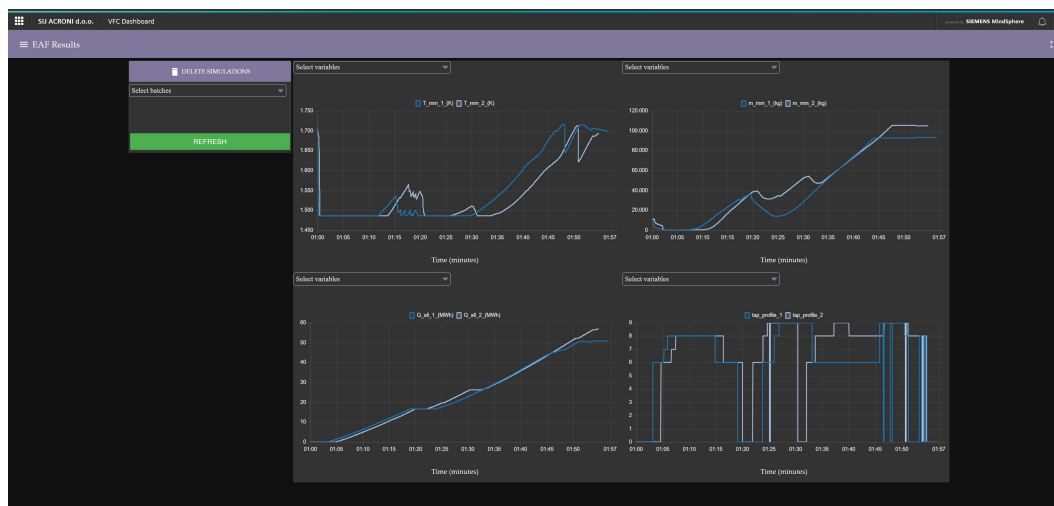
omogoča napovedovanje optimiziranega vhodnega profila transformatorja, ki naj bi privedel do manjše porabe električne energije. Pri tem uporabnik določi štiri ključne vhodne podatke, tj. maso založenega materiala po košarah, pričakovani vnos O_2 in C ter želena temperaturo taline pri prebodu. Nato orodje (na osnovi predikcije mehkega modela) predlaga optimalni profil stopnje transformatorja za vsako košaro, s katerim naj bi dosegli najnižjo porabo električne energije. Grafični uporabniški vmesnik orodja Optimizator EOP, ki ga je mogoče v celoti upravljati na eni strani, je prikazan na sliki 8.

Zgodovinski podatki preteklih šarž, na podlagi katerih se nastavijo vhodni parametri optimizacije, se izberejo na enak način kot pri orodju Simulator EOP. Vhodni parametri, ki sicer najbolj vplivajo na porabo električne energije in jih lahko določi uporabnik, so skupna pričakovana količina kisika (O_2 [Nm^3]), skupna pričakovana količina dodanega ogljika med postopkom taljenja (C [kg]), zelena temperatura taline pri izlitju (T

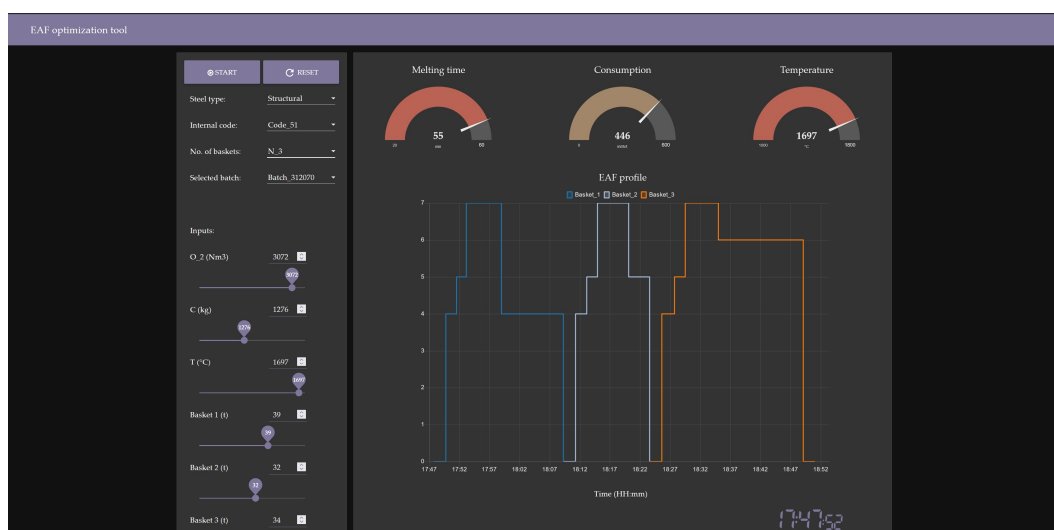
[$^{\circ}C$]) in skupna masa založenega materiala po posameznih košarah ($Basket_i$ [kg]).

Uporabnik lahko z drsniki poljubno spreminja parametre in opazuje vpliv na čas taljenja oziroma porabo električne energije. Rezultati orodja (izhodi modela), ki so vidni v osrednjem delu vmesnika, tj. na grafičnih ("analognih") instrumentih in grafu, so naslednji: celoten čas taljenja, ocenjena poraba električne energije (kWh/t), temperatura taline pri odlivanju in profil stopnje transformatorja.

Orodje Optimizator EOP je bilo zasnovano kot pomočnik operaterjem pri iskanju potencialno najboljših parametrov peči. Njegova glavna naloga ni nadomestiti znanje in izkušnje operaterja, temveč mu ponuditi smernice za optimizacijo procesa taljenja. Predlogi, ki jih orodje nudi, temeljijo na matematičnih modelih in simulacijah, kar pomeni, da lahko v praksi pride do odstopanj. Zato je ključnega pomena, da operater sproti preizkuša predlagane nastavitve v realnih pogojih in opazuje učinke na postopek taljenja.



Slika 7: Primerjava rezultatov simulacije.



Slika 8: Optimizator EOP - grafični uporabniški vmesnik.

5 ZAKLJUČEK

Uspešno smo razvili in vpeljali integrirano rešitev za podporo odločanju operaterja procesa EOP. Orodji Simulator EOP in Optimizator EOP omogočata simulacijo in optimizacijo procesa EOP na osnovi arhivskih ali uporabniško določenih vhodnih podatkov. Sistem operaterju zagotavlja ustrezne informacije, ki mu pomagajo pri sprejemanju učinkovitih odločitev v zvezi z delovanjem procesa. Simulator EOP omogoča simulacijo delovanja EOP in analizo delovanja sistema v različnih scenarijih ter testiranje različnih strategij delovanja, s katerimi je mogoče preveriti učinkovitost delovanja EOP. Optimizator EOP omogoča optimizacijo porabe električne energije v sistemu EOP, kar lahko privede do manjše porabe električne energije in s tem do nižjih stroškov obratovanja.

Izvedba sistema na lokalnem strežniku Siemens Edge

operaterju omogoča, da izbere med uporabo lokalne (Node-RED) ali oblačne (Mindsphere VFC) različice grafičnega uporabniškega vmesnika, kar zagotavlja večjo prilagodljivost. Prav tako je implementacija obeh različic omogočila primerjavo med obema platformama za vizualizacijo in upravljanje podatkov.

V prihodnje vidimo priložnosti za dodatne izboljšave, vključno s sprotnim spremljanjem in optimizacijo v realnem času. Kljub temu smo s tem projektom že zagotovili dragoceno rešitev, ki prispeva k boljši učinkovitosti procesa EOP.

LITERATURA

- [1] Dimitri Petrik and Georg Herzwurm. Iiots ecosystem development through boundary resources: A siemens mindsphere case study. In *Proceedings of the 2nd ACM SIGSOFT International Workshop*

- on *Software-Intensive Business: Start-Ups, Platforms, and Ecosystems*, IWSiB 2019, page 1–6, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery. ISBN 9781450368544. doi: 10.1145/3340481.3342730. URL <https://doi.org/10.1145/3340481.3342730>.
- [2] Simon Tomažič, Goran Andonovski, Igor Škrjanc, and Vito Logar. Data-driven modelling and optimization of energy consumption in eaf. *Metals*, 12(5), 2022. ISSN 2075-4701. doi: 10.3390/met12050816. URL <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/5/816>.
- [3] Yadollah Saboohi, Amirhossein Fathi, Igor Škrjanc, and Vito Logar. Optimization of the electric arc furnace process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(10):8030–8039, 2019. doi: 10.1109/TIE.2018.2883247.
- [4] Amirhossein Fathi, Yadollah Saboohi, Igor Škrjanc, and Vito Logar. Comprehensive electric arc furnace model for simulation purposes and model-based control. *steel research international*, 88, 2017. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138125855>.
- [5] Thomas Hay, Thomas Echterhof, and Ville-Valtteri Visuri. Development of an electric arc furnace simulator based on a comprehensive dynamic process model. *Processes*, 2019. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:208029689>.
- [6] Vito Logar and Igor Škrjanc. Development of an electric arc furnace simulator considering thermal, chemical and electrical aspects. *Isij International*, 52:1924–1926, 2012. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:60049586>.
- [7] Vito Logar and Igor Škrjanc. The influence of electric-arc-furnace input feeds on its electrical energy consumption. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(3):1013–1026, Sep 2021. ISSN 2199-3831. doi: 10.1007/s40831-021-00390-y. URL <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00390-y>.
- [8] Aljaž Blažič, Igor Škrjanc, and Vito Logar. Soft sensor of bath temperature in an electric arc furnace based on a data-driven takagi–sugeno fuzzy model. *Applied Soft Computing*, 113:107949, 2021. ISSN 1568-4946. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107949>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494621008711>.
- [9] Siemens. Mindsphere, 2023. URL <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/mindsphere/>.
- [10] Projekt H2020. Inevitable 2018-2023. URL <http://inevitable-project.eu>. 10. 9. 2023.
- [11] G. C. Hillar. *MQTT Essentials - A Lightweight IoT Protocol*. Packt Publishing Ltd, 2017. ISBN 1787287811.
- [12] Simon McLean. *Node-RED: The Definitive Guide*. Packt Publishing, 2021. ISBN 9781789808067.
- [13] Siemens AG. Mindsphere visual flow creator, 2023. URL <https://documentation.mindsphere.io/resources/pdf/visual-flow-creator-en.pdf>.
- [14] Siemens. Siemens edge streaming analytics. URL https://www.dex.siemens.com/edge/manufacturing-process-industries/edge-analytics-engine-for-industrial-edge?cclcl=en_US.
- [15] W. Mahnke, S.-H. Leitner, and M. Damm. *OPC Unified Architecture*. Springer, Berlin, 2009. ISBN 978-3540899664. ISBN-10: 3540899665.

Simon Tomažič je leta 2012 diplomiral in leta 2016 doktoriral s področja elektrotehnike na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je zaposlen kot asistent v Laboratoriju za avtomatiko in kibernetiko na isti fakulteti. Njegovi glavni raziskovalni interesi vključujejo identifikacijo mehkih modelov, simulacijo procesov v elektroobločni peči ter modeliranje in vodenje bioloških procesov. Poleg tega se ukvarja tudi z adaptivnimi in prediktivnimi regulacijskimi sistemi, vizualno odometrijo, Bluetooth lokalizacijo ter uporabo inercialnih senzorjev in senzorske fuzije.

Vito Logar je docent na Fakulteti za elektrotehniko, Univerze v Ljubljani in član Laboratorija za avtomatiko in kibernetiko. Raziskovalno deluje predvsem na področju modeliranja, simulacije in optimizacije procesov, ki potekajo pri reciklaži odpadnega jekla v elektroobločnih pečeh (EOP).