

Uporaba modeliranja in simulacije v digitalizaciji procesa elektroobločne peči

Vito Logar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000, Ljubljana
E-pošta: vito.logar@fe.uni-lj.si

The use of modelling and simulation in the digitalization of the electric arc furnace process

Abstract. In the past decade, the steelmaking industry has been undergoing an important and significant process of digitalization and informatization. Whether in the past, data acquisition systems, i.e., SCADAs, were used mainly for process monitoring and detection of equipment malfunctions, large amounts of acquired historical data facilitate the use of advanced software-support methods, aiming to improve the key performance indicators of various steelmaking processes. The following paper presents the concept and methodology of digital transformation of the electric-arc-furnace (EAF) process in SIJ Acroni steelworks, in the scope of an EU Horizon 2020 project INEVITABLE. Different aspects and approaches of digitalization, and more important, proper software tools, to support and enhance the EAF process, are briefly presented. First, the EAF digitalization concept is presented, followed by the presentation of the methodology, explaining the envisioned concepts of modelling and optimization. Afterwards, the planned implementation of the developed tools into industrial environment is presented. Finally, some of the expected goals of the proposed solutions are given.

1 Uvod

V zadnjih desetletjih so bili procesi v jeklarstvu podvrženi znatni modernizaciji v smislu digitalizacije in informatizacije, kar lahko pripisujemo povečani konkurenci na trgu, prizadevanjem za učinkovitejšo rabo surovin in energije ter strožjim okoljskim predpisom. Prvi sistemi s področja digitalizacije, ki so se pojavili v jeklarski industriji, so bili sistemi za spremljanje procesov in zajem podatkov (ang. SCADA). Dandanes so praktično vsi jeklarski procesi podprti s tovrstnimi sistemi, vendar pa se zajeti podatki uporabljajo zgolj za spremljanje procesov ter zaznavanje okvar. Skozi leta obratovanja se je v podatkovnih bazah akumulirala ogromna količina procesnih podatkov, ki omogočajo različne možnosti za izboljšave procesov, npr. izgradnjo procesnih modelov in njihovo simulacijo, uporabo metod rudarjenja podatkov, optimizacijo na osnovi podatkov idr.

V članku je na kratko predstavljena metodologija digitalne transformacije procesa elektroobločne peči (EOP) ter orodja, ki slonijo na implementirani digitalni

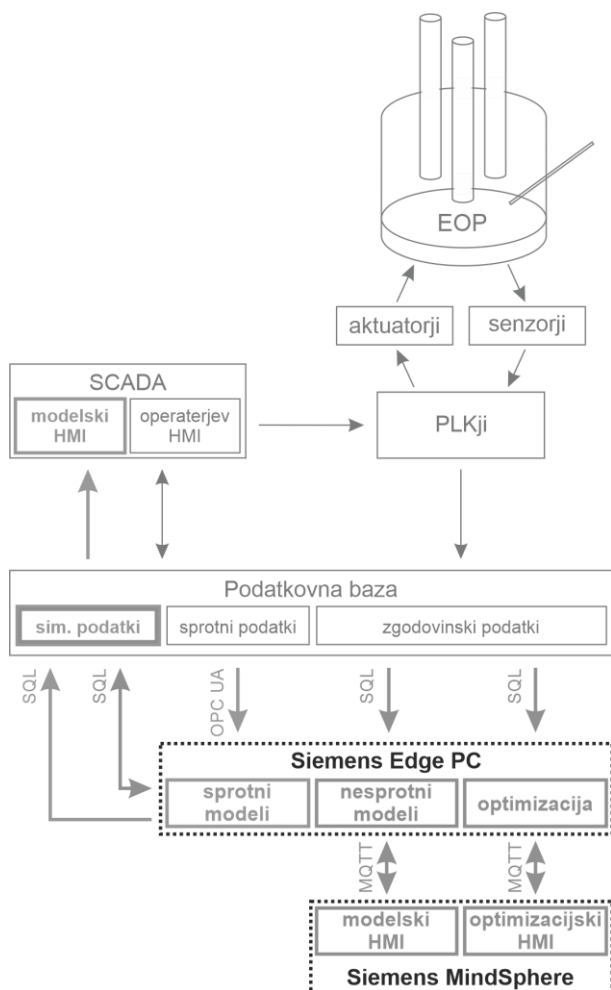
infrastrukturi, in so namenjena različnim izboljšavam procesa.

Laboratorij za avtomatiko in kibernetiko (FE, UL) sodeluje v tekočem EU Horizon 2020 projektu INEVITABLE (Optimization and performance improving in metal industry by digital technologies), ki primarno naslavlja implementacijo naprednih programskih metod v procese jeklarske industrije, z namenom izboljšanja njihove učinkovitosti. V sklopu projekta je izbranih več jeklarskih procesov, tj. elektroobločna peč, ponovčna peč, naprava za vakuumsko odplinjevanje ter naprava za kontinuirno ulivanje jekla. Vsi ti procesi bodo podvrženi procesu popolne digitalizacije in nadgrajenij z modernimi programskimi rešitvami, ki bodo vsebovale matematične modele, modele na osnovi podatkov ter različne optimizacijske metode. Glavni cilji, h katerim stremi omenjena metodologija so nižanje porabe energije, surovin in izpustov toplogrednih plinov. Eden od primerov uporabe je tudi implementacija naprednih programskih rešitev za proces reciklaže jekla v EOP.

V sklopu digitalizacije in programske podpore procesu EOP se razvijajo tako koncepti digitalizacije kot tudi primerna programska orodja, ki so namenjena spremljanju in izboljšavam procesa EOP, njihova implementacija pa je predvidena v obstoječa in nova programska in strojna okolja. Prva naloga digitalizacije EOP je izbira in implementacija primernih metod za zajem procesnih podatkov, komunikacijskih protokolov in načinov za shranjevanje podatkov. Druga, zahtevnejša naloga, zajema razvoj in vrednotenje naprednejših metod obdelave podatkov, procesnih modelov in optimizacije. Tretja, izvedbena naloga, pa zajema integracijo razvitih rešitev v sklop obstoječih sistemov EOP in razvoj ustreznih vmesnikov za prikaz rezultatov operaterjem EOP. Med vsemi tremi, druga naloga predstavlja najpomembnejši korak v celotnem procesu digitalizacije, saj zajema razvoj metod, ki stremijo k izboljšanju vpogleda v delovanje EOP ter k izboljšanju njenih kazalcev učinkovitosti. Slika 1 prikazuje koncept digitalizacije, vključno z vsemi rešitvami, ki so predvidene za implementacijo v industrijsko okolje.

Struktura članka je naslednja. Najprej je podrobneje predstavljen predvideni koncept digitalizacije, vključno z rešitvami za zajem podatkov ter komunikacijskimi protokoli, ki predstavlja osnovo za višje-nivojske rešitve. V drugem sklopu so predstavljene razvite

metode, namenjene boljšemu vodenju EOP. Nadalje pa je predstavljena še planirana implementacija metodologije v proces EOP, vključno s predvidenim robnim računanjem (ang. Edge Computing) ter računanjem v oblaku (ang. Cloud Computing). Na koncu je predstavljenih še nekaj ciljev in pričakovanj uporabe omenjene metodologije.



Slika 1: predvideni koncept digitalizacije, implementacije razvitih rešitev ter prikaza njihovih rešitev

2 Digitalizacija procesa EOP

Ideja digitalizacije procesa EOP je v uporabi primernih sistemov za zajem vseh potrebnih obratovalnih podatkov, njihova uporaba v bodisi sprotni ali nesprotni obliki v različnih programskih orodjih za izboljšano spremljanje procesa, napredno podporo operaterjem ali optimizacijo procesa, ter uporaba njihovih rezultatov za izboljšanje procesa. V sklopu projekta INEVITABLE se razvijata dve glavni veji rešitev, in sicer procesni modeli (namenjeni tako sprotni, paralelni kot tudi nesprotni simulaciji procesa EOP) ter optimizacijsko okolje (namenjeno nesprotni optimizaciji vhodnih profilov).

2.1 Procesni podatki

Osnova vsakega digitaliziranega procesa, pri čemer EOP ni izjema, je ustrezen zajem vseh potrebnih meritev in ostalih informacij o procesu, ter njihov prenos od senzorjev do krmilnikov in naprej do podatkovnih baz. V tem poglavju so na kratko predstavljeni potrebni procesni podatki EOP, ki so potrebni za razvoj in implementacijo razvitih programskih rešitev.

EOP lahko smatramo kot šaržni proces, kjer v procesu nastopajo tako zvezni kot prekinjeni tokovi in veličine. Razvita metodologija v sklopu projekta se osredotoča zgolj na zvezne dele procesa EOP, ki predstavljajo najkompleksnejši del reciklaže jekla. Eden izmed razlogov za to je vsekakor pomanjkanje meritev ključnih procesnih spremenljivk ter s tem slab vpogled v trenutno dogajanje v peči. Zaradi narave procesa (visoke temperature) veliko veličin, npr. temperatura, sestava in raztaljenost jekla, niso merjene zvezno, čeprav bi bilo z vidika vodenja EOP to zaželeno. Meritve temperature taline se izvajajo zgolj na zahtevo operaterja in so omejene na fazo rafinacije. Prav tako se lahko vzorec taline za kemijsko analizo sestave odvzame šele pred odlivanjem taline v fazi rafinacije, raztaljenost jekla pa je z obstoječo merilno instrumentacijo nemogoče izmeriti in se jo zgolj ocenjuje na podlagi vnesene električne energije. Po drugi strani, so meritve nekaterih drugih veličin dostopne v realnem času z ustreznimi časi vzorčenja. Prav tako se na peči beležijo vsi dogodki, ki so pomembni za njeno delovanje, npr. kvaliteta proizvajane jekla, čas delovanja peči, čas celotnega postopka reciklaže, ocena ostanka taline v peči, sestava jekla v košarah in čas njihovega zakladanja, posamezne meritve temperature taline, moč na transformatorju, pretoki kisika in ogljika, količina dodanih žlindrotvornih dodatkov in mnogi drugi. Meritve se izvajajo z ustreznimi merilniki in se preko programirljivih logičnih krmilnikov prenašajo v različne podatkovne baze, npr. bazi MES in ERP.

Ena od predlaganih rešitev v sklopu projekta se osredotoča prav na izboljšanje vpogleda v EOP, in sicer z nadomestitvijo manjkajočih veličin z njihovo oceno iz simulacije procesnih modelov.

2.2 Programska in strojna podpora

Za uspešno integracijo predlaganih rešitev je kot prvo potrebno izbrati ustrezno strojno in programsko opremo, ki bosta zmožni poganjati nameščena programska orodja. V konkretnem primeru bodo vse digitalne rešitve implementirane z uporabo robnega računanja ter računanja v oblaku. Za ta namen bosta dve Siemensovi platformi, tj. Edge Streaming Analytics ter Mindsphere, ki bosta izkoriščali nadgrajeno digitalno infrastrukturo, vključeni v obstoječe industrijske sisteme.

Predvidena integracija programskih podpornih orodij v nove digitalne platforme je prikazana na Sliki 1. Kot je razvidno, se bodo vse programske rešitve izvajale s pomočjo robnega računanja. Čeprav bi podobno funkcionalnost omogočalo tudi računanje v oblaku, je primarni namen robnega računanja na namenskem računalniku hitrejši procesiranje podatkov in poganjanje rešitev, s čimer je zagotovljena ustrezna računska moč ter realno-časovno izvajanje, ki je še posebej pomembno za simulacijo procesnih modelov, ki so namenjeni sprotni simulaciji, paralelno s procesom EOP. Oblačna platforma bo uporabljena zgolj za implementacijo vmesnikov med operaterjem in programskimi orodij in bo omogočala enostavno delo z njimi. Za prenos podatkov med podatkovnimi bazami, računalnikom in oblakom bodo uporabljeni različni komunikacijski protokoli. Sprotni podatki, ki so namenjeni uporabi v modelih za paralelno simulacijo, se bodo med podatkovno bazo in računalnikom prenašali preko protokola OPC UA. Nesprotni podatki, ki so namenjeni uporabi v nesprotni simulaciji modelov in optimizacijskem okolju se bodo med podatkovno bazo in računalnikom prenašali preko protokola SQL. Podobno se bodo prenašali tudi simulirani podatki nazaj do podatkovne baze. Na ta način bodo simulirani podatki dostopni tudi obstoječemu SCADA sistemu za prikaz rezultatov operaterjem ter za morebitne kasnejše analize. Komunikacija med nesprotnimi rešitvami ter uporabniškimi vmesniki v oblaku Mindsphere bo izvedena preko protokola MQTT.

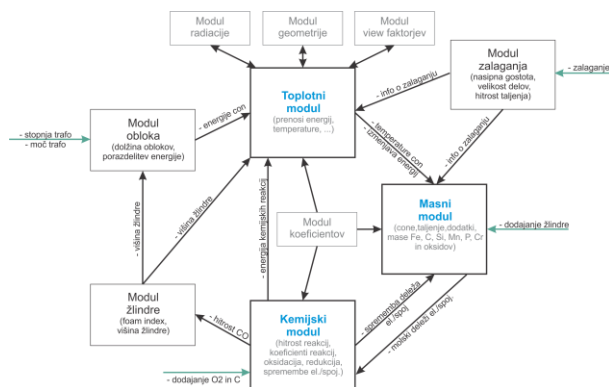
3 Metodologija in programske rešitve

Ideja procesnih modelov EOP je opisati dinamiko posameznih procesov oz. podprocesov, ki potekajo med reciklažo jekla, z zadostno natančnostjo in s tem omogočiti boljše sprotno spremljanje procesa, sprotno oceno nemerjenih procesnih veličin ter nesprotno simulacijo procesa. V sklopu projekta je predvidena implementacija modelov, ki temeljijo na dveh različnih modelerskih pristopih.

Prvi pristop temelji na teoretičnem modeliranju z upoštevanjem znanih fizikalnih zakonov ter parametrizaciji modelov z uporabo razpoložljivih obratovalnih podatkov. Tovrstni modeli združujejo vse potrebne pojave med reciklažo jekla v EOP ter pripadajoče enačbe, ki jih opisujejo. Pri tem je potrebno upoštevati tri glavne skupine procesov, ki pomembno vplivajo na delovanje EOP, in sicer toplotne, kemijske in masne procese. Poleg tega je potrebno za ustrezno delovanje in točnost izračunov potrebno upoštevati še ostale procese in pojave, in sicer dinamiko oblokov, dinamiko žlindre, zakladanje peči, geometrijo taljenja, spremenljivost ključnih parametrov idr. Strukturo teoretičnega modela lahko poenostavljeno prikažemo na sliki 2.

Namen teoretičnih modelov EOP je dvojni in je odvisen od načina njihove simulacije. V prvem načinu bodo ti modeli simulirani sprotno, tj. paralelno s procesom EOP, v realnem času, s ciljem oceniti določene

spremenljivke, ki operaterjem sicer niso dostopne. Med drugimi bodo ocene spremenljivk vsebovale temperaturo taline, temperaturo ostalih elementov peči, energijsko bilanco peči ter stopnjo raztaljenosti jeklenega vložka. Ker te veličine niso merjene, bodo modelske ocene le-teh operaterju omogočile boljši vpogled v delovanje EOP ter s tem možnost prilagoditve vodenja za doseganje boljšega izkoristka EOP.

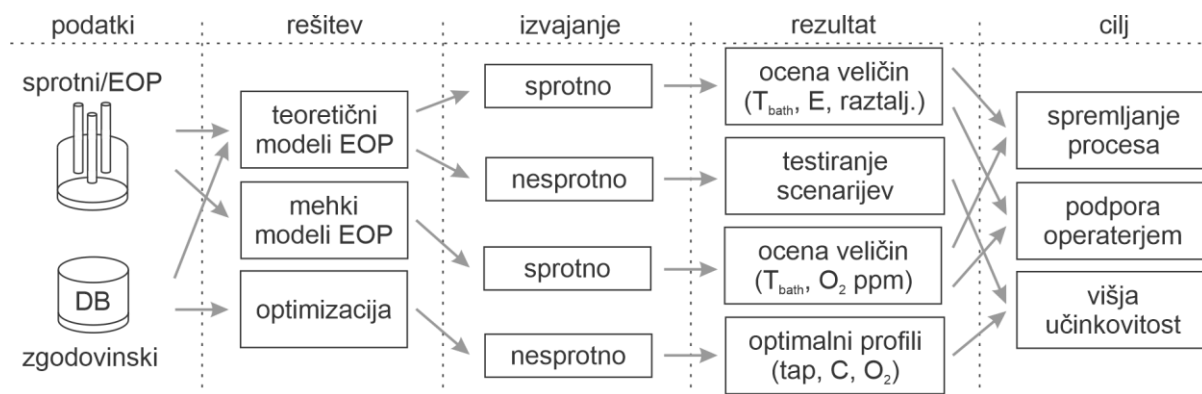


Slika 2: struktura teoretičnega modela EOP

V drugem načinu bodo teoretični modeli simulirani nesprotno, tj. z uporabo zgodovinskih podatkov, s ciljem preverjanja in testiranja različnih talilnih scenarijev in njihove učinkovitosti. Na ta način bo omogočeno preverjanje nastavitve posameznih vhodov v EOP ter njihov vpliv na končni rezultat.

Teoretični model je bil razvit s strani Laboratorija za avtomatiko in kibernetiko ter do danes večkrat spremenjen in dopolnjen [1-6]. Trenutna verzija modela je v primerjavi s preteklimi znatno poenostavljena (modularna zasnova, enostavnejša geometrija taljenja, enostavnejša geometrija peči, izračun sevalne energije in kemijskih reakcij) ter prilagojena v smislu ustrezne obdelave sprotnih podatkov, s čimer je zagotovljeno tudi ustrezno izvajanje v realnem času. Modularna zasnova modela omogoča enostavno zamenjavo posameznih modulov, s čimer se v model lahko vključi več ali manj procesov, hkrati pa se ga lahko enostavneje prilagodi tudi na ostale konfiguracije EOP.

Drugi pristop temelji na modeliranju iz podatkov, pri čemer je informacija o fizikalnem ozadju procesov vključena le minimalno, relacije med vhodi in izhodi modela pa so definirane s pomočjo merjenih podatkov. V konkretnem primeru gre za podatkovni nelinearni model, ki temelji na mehki logiki Takagi-Sugeno. Namen tovrstnega modela je opisati dinamične relacije med ključnimi vhodi v EOP ter želenimi izhodi, z uporabo enostavnejše strukture ter z kar se da malo vhodi. Za ta namen sta bila razvita dva mehka modela, s ciljem ocenjevanja temperature taline ter deleža raztopljenega kisika v talini. Ker je za parametrizacijo mehkih modelov potrebna zadostna količina podatkov, sta ta dva modela omejena na sprotno simulacijo procesa zgolj v zaključni fazi reciklaže (faza rafinacije). Razlog temu je v pomanjkanju meritev veličin, ki so potrebne tako za parametrizacijo, kot tudi za sprotno



Slika 3: predstavitev programskih rešitev v sklopu projekta INEVITABLE

simulacijo, v glavni fazi taljenja. Pridobljeni rezultati so pokazali, da zmore mehki model oceniti temperaturo taline z višjo točnostjo kot teoretični model.

Vse predlagane rešitve, tj. teoretični modeli EOP, mehki modeli EOP ter optimizacijsko okolje so shematsko prikazani na sliki 3, vključno z načinom njihovega izvajanja, pričakovanimi rezultati ter učinki oz. cilji, h katerim pripomorejo.

4 Pričakovani rezultati in izboljšave procesa

Za ovrednotenje učinkov digitalizacije in uporabe naprednih programskih rešitev so bili definirani ključni kazalniki učinkovitosti (ang. Key Performance Indicators - KPIs) EOP, katerih namen je prikazati učinkovitost obratovanja EOP pred in po implementaciji vseh digitalnih rešitev. Vsi izbrani kazalniki se trenutno že spremljajo, njihove vrednosti pa se bodo v zaključku projekta primerjale z vrednostmi kazalnikov po implementaciji rešitev. Definirani kazalniki so naslednji: poraba električne energije v kWh/t, izpusti CO₂ v kg/t ter število odvzetih vzorcev taline (meritev temperature in raztopljenega O₂). Z uporabo razvite metodologije se zasleduje cilj znižanja porabe električne energije za do 10 kWh/t, znižanja izpustov CO₂ za do 4 kg/t ter znižanja števila odvzetih vzorcev za 1 na šaržo.

Poleg izboljšav v definiranih kazalnikih učinkovitosti, je namen predstavljene metodologije tudi izboljšanje vpogleda v delovanje EOP. Z oceno nekaterih nemerjenih procesnih veličin (temperatura, stopnja raztaljenosti idr.) so operaterju dostopne dodatne informacije o trenutnem stanju v peči, s čimer ima le-ta možnost sprotnih sprememb v vodenju EOP (spremembe vhodnih profilov, zakladanja) ter s tem bolj učinkovitega vodenja EOP, npr. primerno dodajanje ogljika in kisika v fazi rafinacije za doseganje ustreznega deleža ogljika v talini, primerno vodenje stopnje transformatorja za doseganje primerne temperature taline itd. Poleg tega metodologija omogoča tudi oceno potrebnih virov za reciklažo konkretne šarže pred dejansko izvedbo, s čimer je

omogočena tudi optimizacija zakladanja košar in talilnih profilov za doseganje boljšega izkoristka EOP.

5 Zaključek

Članek na kratko predstavlja koncept digitalne transformacije procesa EOP v sklopu EU Horizon 2020 projekta INEVITABLE. Omenjena EOP je zgolj eden od procesov, ki bodo podvrženi digitalni nadgradnji z naprednimi programskimi rešitvami. Pri tem je zasledovani cilj za vse procese enak, tj. popolna digitalizacija procesa, podprta z ustreznimi metodami, ki vodijo do izboljšane učinkovitosti procesa ter manjših vplivov na okolje.

Zahvala

Delo predstavljeno v članku je bilo izvedeno v sklopu programa EU Horizon 2020, sklopa SPIRE, projekta INEVITABLE ("Optimization and performance improving in metal industry by digital technologies"), Grant Agreement No. 869815.

Literatura

- [1] V. Logar, D. Dovžan, I. Škrjanc, Modelling and validation of an electric arc furnace: Part 1, heat and mass transfer, ISIJ International, Vol. 52, pp. 402-412, 2012.
- [2] V. Logar, D. Dovžan, I. Škrjanc, Modelling and validation of an electric arc furnace: Part 2, thermo-chemistry, ISIJ International, Vol. 52, pp. 413-423, 2012.
- [3] V. Logar, D. Dovžan, I. Škrjanc, Mathematical modelling and experimental validation of an electric arc furnace, ISIJ International, Vol. 51 (3), pp. 382-391, 2011.
- [4] V. Logar, I. Škrjanc, Development of an electric arc furnace simulator considering thermal, chemical, and electrical aspects, ISIJ International, Vol. 52 (10), pp. 1924-1926, 2012.
- [5] V. Logar, I. Škrjanc, Modelling and validation of the radiative heat transfer in an electric arc furnace, ISIJ International, Vol. 52 (7), pp. 1225-1232, 2012.
- [6] V. Logar, A. Fathi, I. Škrjanc, A computational model for heat transfer coefficient estimation in electric arc furnace, Steel Research International, Vol. 87 (3), pp. 330-338, 2016.