

# Digitalni dvojček elektroobločne peči

Vito Logar

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

## A digital twin of an electric arc furnace

*Abstract. In recent years, the field of digital support of different industrial processes has experienced a significant growth. Not so long ago, industrial data acquisition systems were mostly used for monitoring of the processes and for storing the measured data. However, the potential of such systems, when properly upgraded with advanced software solutions, is much larger. Lately, a considerable attention has been given to the field of digital twins, which represent digital replications of the physical processes. Since these twins are placed inside simulation environments, they can overcome the drawbacks of the real processes, i.e., unmeasured or rarely measured process variables, difficult assessment of inputs influence, stability issues, problems with scenario testing and others. In this paper a digital twin of an electric arc furnace (EAF) process is presented, which was developed in the scope of the EU Horizon 2020 project INEVITABLE. The aim of the digital twin is twofold, i.e., first to allow offline simulation of the EAF process and thus facilitate process improvement through simulation, and second to allow online simulation in parallel to the actual EAF process and calculate the crucial unmeasured process values. The presented digital twin will be integrated into an industrial IT infrastructure (Siemens edge & cloud platforms) in SIJ Acroni steelworks, together with all data acquisition, transfer, and storage systems, as well as proper user interfaces allowing its use.*

## 1 Uvod

V zadnjih letih je področje digitalne podpore različnim industrijskim procesom doživelo znaten porast. Še ne dolgo nazaj so se industrijski sistemi za zajem podatkov uporabljali večinoma le za spremljanje delovanja procesov ter shranjevanje merjenih podatkov. Čeprav je to dejansko njihov glavni namen, pa je potencial le-teh, z ustrezno nadgradnjo v smislu programskih rešitev, mnogo večji. Trenutno se veliko pozornost namenja t.i. digitalnim dvojčkom, ki predstavljajo digitalni posnetek realnega procesa v ustreznih (matematični) obliki. Ker so le-ti del simulacijskega okolja, lahko z njihovo uporabo rešimo številne težave realnih procesov, npr. ocenimo nemerjene ali redko merjene veličine, ovrednotimo vpliv vhodov na učinkovitost procesa, omogočimo testiranje scenarijev, optimiziramo proces in druge. Še posebej je tovrstnim težavam podvržena elektroobločna peč (EOP), ki se uporablja za reciklažo jeklenega odpadka. Zaradi težavnih pogojev v peči (visoke temperature, tresljaji, prah itd.) ter zaradi določenih

procesno pogojenih lastnosti le-te (npr. slaba ponovljivost procesa, velika nihanja kazalnikov učinkovitosti, slab vpogled v proces itd.), je EOP še posebej primerna za razvoj in uporabo digitalnega dvojčka, s katerim želimo do določene mere izboljšati tako vpogled v proces reciklaže, kot tudi njegovo učinkovitost.

V članku je na kratko predstavljen digitalni dvojček EOP, ki je bil razvit v Laboratoriju za avtomatiko in kibernetiko (FE, UL), in sicer v sklopu EU Horizon 2020 projekta INEVITABLE. Namen digitalnega dvojčka je: 1) omogočiti nesprotno simulacijo procesa EOP ter s tem omogočiti iskanje boljših načinov vodenja, ter 2) omogočiti sprotno simulacijo procesa EOP ter s tem ocenjevati ključne procesne veličine, ki se na samem procesu ne merijo ali pa se merijo (pre)redko. Razviti digitalni dvojček predstavlja zgolj eno od razvitih programskih rešitev, saj se je v sklopu projekta razvilo še dve rešitvi, in sicer optimizacijsko okolje za proces EOP ter digitalni dvojček za ocenjevanje določenih procesnih veličin v fazi rafinacije (zadnja faza reciklaže jekla). Z uporabo vseh digitalnih rešitev se primarno naslavlja izboljšanje učinkovitosti procesa EOP, predvsem v smislu nižanja porabe električne energije, bodisi preko izboljšav vodenja le-te, ki ga omogoča nesprotna simulacija in optimizacija, ali pa preko ocenjevanja ključnih nemerjenih veličin, ki jih omogoča sprotna simulacija. Vse razvite rešitve bodo implementirane v industrijsko IT infrastrukturo podjetja SIJ Acroni (platformi Siemens edge in cloud), vključno z vsemi podpornimi sistemi kot so sistemi za zajem, prenos in shranjevanje podatkov ter uporabniškimi vmesniki.

Struktura članka je naslednja. V drugem poglavju je na kratko predstavljeno področje modeliranja procesov v EOP. V tretjem poglavju so predstavljene pomembnejše lastnosti modela, ki je osnova digitalnega dvojčka, razlike med njim in predhodno razvitimi modeli ter način njegovega izvajanja. V četrtem poglavju so prikazani rezultati vrednotenja modela ter ocena njegove točnosti. V zadnjem delu je predstavljen še nekaj pričakovanih ciljev, ki jih z uporabo vseh digitalnih rešitev zasledujemo.

## 2 Modeliranje procesov EOP

Osnova vsakega digitalnega dvojčka je model procesa. Pri modeliranju procesov, ki potekajo v EOP, je najpogosteje zaslediti teoretične pristope [1-7], sledijo pristopi na osnovi računske dinamike fluidov [8], najredkejši pa so eksperimentalni pristopi [9]. Različni pristopi k modeliranju so običajno posledica drugačnih ciljev oz. namenov uporabe razvitih modelov.

Numerični modeli se primarno uporabljajo za študije določenih pojavov v EOP, ki so večinoma vezani na pline ali tekočine, npr. obnašanje večfaznih tokov, prostorska dinamika ipd. Težava tovrstnih modelov je njihova velika računaska zahtevnost, zaradi česar je poleg zmogljive računalniške opreme potrebnega tudi veliko časa za izvajanje simulacij. Ravno zaradi časovne potratnosti so takšni modeli povsem neprimerni za uporabo v industrijskih okoljih. Eksperimentalni in podatkovni modeli se za modeliranje procesov v EOP uporabljajo redkeje, kar je večinoma posledica pomanjkanja meritev ključnih procesnih veličin, ki so za takšen pristop nujne. Kljub temu je tovrsten pristop možno uporabiti, če obstaja vsaj minimalno število posamičnih meritev veličin, ki jih želimo z modelom ocenjevati. Teoretični pristopi so v literaturi najštevilčnejši, saj gre za tehnike modeliranja, pri katerih meritve procesnih veličin niso nujne. Kljub temu pa je za izgradnjo uporabnega in relativno točnega modela še vedno potreben določen nabor meritev, ki so potrebne za posredno parametrizacijo in vrednotenje modelov.

Prvi konkretniji pristopi k teoretičnemu modeliranju procesov v EOP so se pojavili na prelomu tisočletja [1], v zadnjih dvajsetih letih pa je bilo predstavljenih mnogo nadgradenj, izboljšav in novih pristopov za izgradnjo modelov, ki so pomembni z vidika obratovanja EOP [2-7]. V Laboratoriju za avtomatiko in kibernetiko, FE, UL smo z razvojem celovitega teoretičnega modela EOP pričeli v letu 2009. Do danes je bilo razvito več verzij modela, ki vključujejo vse najpomembnejše procese, ki potekajo med reciklažo jekla v EOP [3-5]. To so električni, masni, kemijski in toplotni procesi, ki jih je za izgradnjo uporabnega modela nujno upoštevati, saj vsak od njih predstavlja pomemben del celotnega procesa EOP in ga v izgradnji modela ni mogoče zanemariti. Razvite verzije modela se med seboj razlikujejo v kompleksnosti modeliranja oz. v številu vključenih podprocesov in podrobnosti, s čimer so posamezni modeli prilagojeni njihovemu namenu. Omeniti velja, da pri modeliranju ne gre za povsem teoretični pristop, saj bi le-ta, zaradi neupoštevanja meritev, vodil do netočnega modela. Gre torej za kombinacijo teoretičnih in eksperimentalnih pristopov, pri čemer je za določitev strukture in znanih parametrov modela uporabljen teoretični pristop, za določitev nekaterih neznanih parametrov modela pa so uporabljeni eksperimentalni ter optimizacijski postopki.

### 3 Kombinirani model EOP

Kot uvodoma omenjeno, se predstavljeni model EOP uporablja kot osnova digitalnega dvojčka v sklopu digitalnih rešitev za proces EOP. Simulacija modela bo izvedena na dva načina, in sicer sprotno, tj. paralelno s procesom reciklaže v EOP z uporabo realno-časovnih obratovalnih podatkov ter nesprotno, tj. z uporabo arhiviranih obratovalnih podatkov. Načina izvajanja

simulacije sta povezana tudi z namenom obeh modelov. Sprotna simulacija je namenjena ocenjevanju ključnih procesnih veličin, ki so na EOP merjene redko ali pa sploh niso merjene. V sklopu tega bo model uporabljen za ocenjevanje naslednjih procesnih veličin:

- temperature jekla,
- raztaljenosti jekla (delež jekla v trdnem oz. raztaljenem stanju) ter
- energijske bilance EOP (delež vnosa električne in kemijske energije, delež uporabne energije ter delež energijskih izgub).

S sprotno oceno zgornjih veličin bo operaterjem EOP omogočen boljši vpogled v trenutno stanje v EOP, s čimer bo omogočeno tudi optimalnejše vodenje le-te. Na primer, z oceno raztaljenosti jekla je mogoče določiti najprimernejši čas za zakladanje nove košare ter oceniti ali je že nastopila faza rafinacije. Na osnovi temperature jekla je možno natančneje določiti potrebni vnos energije ter čas za doseganje končnih parametrov jekla. S pomočjo energijske bilance pa je možno oceniti, koliko električne in kemijske energije je bilo dovedeno ter kolikšne so bile izgube EOP.

Po drugi strani je nesprotna simulacija namenjena testiranju različnih načinov delovanja in zakladanja EOP. V sklopu tega bo model uporabljen za izračun vseh pomembnejših procesnih veličin:

- temperatur določenih con (trdno in raztaljeno jeklo, žlindra),
- mas določenih con (trdno in raztaljeno jeklo, žlindra),
- približne kemijske sestave taline ter
- energijske bilance EOP.

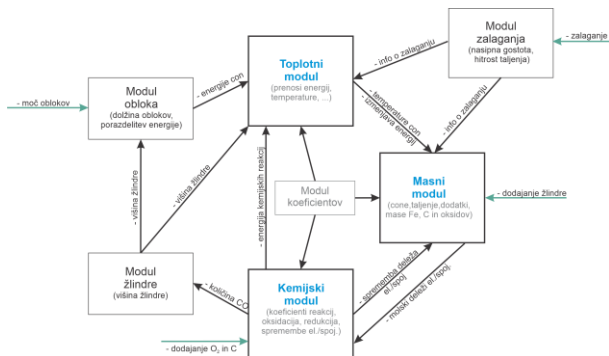
Z izračunom vseh ključnih veličin v EOP bo uporabnikom omogočena primerjava rezultatov pri definiciji različnih kombinacij vhodnih podatkov ter načinov zalaganja odpadnega jekla v košare. Pri tem lahko uporabnik izvede več zaporednih simulacij, pri čemer spreminja enega ali več vhodov ter s primerjavo rezultatov ugotovi najoptimalnejše nastavitve.

Struktura predstavljenega modela EOP je pridobljena z upoštevanjem osnovnih fizikalnih zakonitosti in je že bila predstavljena v več člankih [3-5]. Model, ki je uporabljen za izgradnjo digitalnega dvojčka je v primerjavi z izhodišnimi modeli močno spremenjen, in sicer z namenom zagotavljanja ciljev modeliranja. Najpomembnejše razlike so naslednje:

- odstranitev modula za izračun električnih veličin in nadomestitev le-tega z merjenimi veličinami električnih moči,
- poenostavljen kemijski modul (upoštevanje zgolj ključnih elementov in spojin z vidika energijske bilance: Fe, C, O<sub>2</sub>, FeO, CO, CO<sub>2</sub>, predpostavka o takojšnjem poteku reakcij z vpihanima O<sub>2</sub> in C),
- združitev con trdne in raztaljene žlindre v eno cono,
- odstranitev modula geometrije taljenja,
- odstranitev modula za izračun prenosa energije s sevanjem in nadomestitev le-tega s približno oceno (glede na višino žlindre),

- poenostavitev modula za izračun prenosa energij (odstranitev enačb za prenos energije med conami z nizko interakcijo),
- ponastavitev ocenjene temperature taline s prvo meritvijo (izboljšanje točnosti ocene v fazi rafinacije).

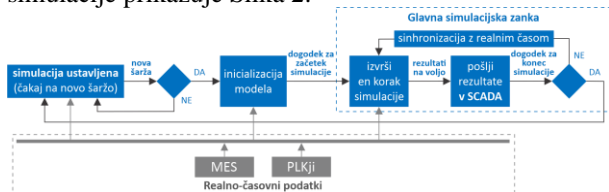
Strukturo celotnega modela, vključno z vsemi pomembnejšimi moduli, prikazuje Slika 1.



Slika 1: Struktura celotnega modela EOP

Poleg omenjenih razlik v primerjavi z izhodišnimi modeli, je model za uporabo v digitalnem dvojčku prilagojen tako za uporabo sprotnih, realno-časovnih podatkov, kot tudi nesprotnih, arhivskih podatkov.

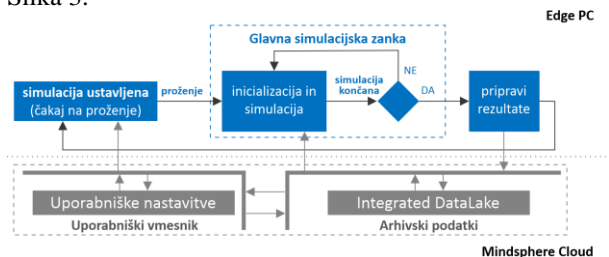
Algoritem izvajanja sprotno, realno-časovne simulacije prikazuje Slika 2.



Slika 2: Algoritem izvajanja sprotno simulacije

Kot prikazuje Slika 2 se simulacija modela prične v levem bloku »simulacija ustavljena«, v katerem se vsako sekundo preverja ali se je v podatkovni bazi pojavila nova šarža, kar predstavlja prožilnik za inicializacijo modela, ne pa tudi za začetek simulacije. Simulacija se začne, ko je v peč založena prva košara jekla. Sledi glavna simulacijska zanka, ki se izvaja enkrat na sekundo (sinhronizacija z realnim časom) in se konča, ko nastopi dogodek za končanje simulacije (odlivanje jekla). Hkrati se vsi simulirani rezultati pošiljajo v nadzorni sistem SCADA za prikaz operaterjem.

Algoritem izvajanja nesprotno simulacije prikazuje Slika 3.



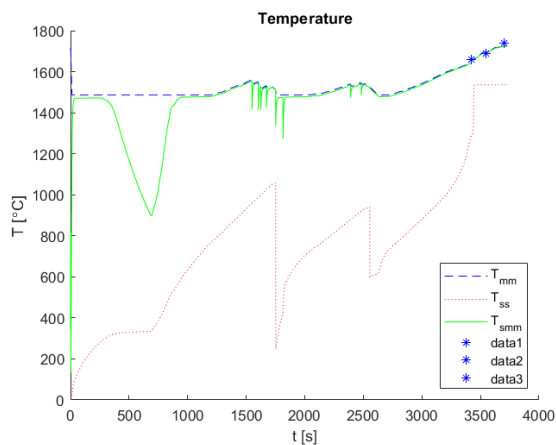
Slika 3: Algoritem izvajanja nesprotno simulacije

Kot prikazuje Slika 3 se simulacija modela prične v levem bloku »simulacija ustavljena«, v katerem čaka na prožilnik, ki se pošilja iz uporabniškega vmesnika (npr. pritisk gumba za začetek simulacije s strani uporabnika). Po pojavu prožilnika se takoj izvede inicializacija modela in njegova simulacija, in sicer v pospešenem času, ki traja toliko časa, kolikor je bila dolžina arhivskih podatkov. Ob koncu simulacije se vsi rezultati pošljejo nazaj v uporabniški vmesnik v oblaku in prikažejo, hkrati pa se shranijo tudi v t.i. aplikaciji Integrated Data Lake, ki je namenska aplikacija za shranjevanje strukturiranih in nestrukturiranih podatkov.

## 4 Rezultati

V nadaljevanju je prikazanih nekaj rezultatov vrednotenja modela na arhivskih obratovalnih podatkih. Glede na dejstvo, da je v EOP merjenih malo veličin, je bilo za vrednotenje modela uporabljenih več kot 300 različnih šarž, pri čemer sta glavna pokazatelja ustreznosti modela dva, in sicer: 1) ujemanje simulirane in izmerjene temperature taline v fazi rafinacije ter 2) simulirana masa trdnega vložka mora biti do nastopa prve meritve temperature pod 95 % skupne založene mase. Ujemanje temperature taline se izračunava na osnovi povprečne absolutne napake med simuliranimi in izmerjenimi vrednostmi, za praktično uporabo modela pa mora biti ta vrednost nižja od 30 °C pri prvi meritvi temperature ter nižja od 20 °C pri nadaljnjih meritvah temperature (po ponastavitvi izračunane temperature z izmerjeno).

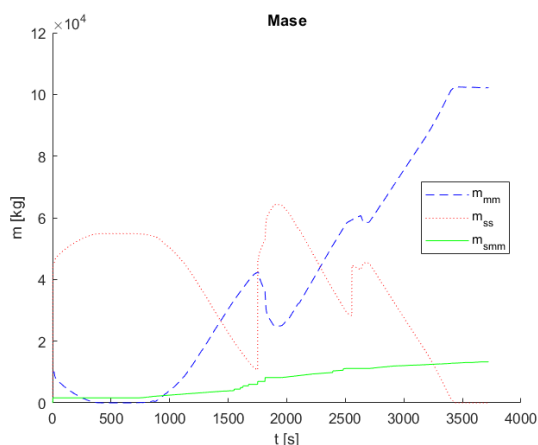
Slika 4 prikazuje simulirane poteke temperatur posameznih con (trdno in raztaljeno jeklo, žlindra) ter primerjavo z izmerjeno temperaturo taline za eno šaržo.



Slika 4: Simulirani poteki temperatur posameznih con ( $T_{mm}$  – temperatura taline,  $T_{ss}$  – temperatura trdnega jekla,  $T_{smm}$  – temperatura žlindre, *data* – izmerjena temperatura taline)

Kot je razvidno iz Slike 4, je ujemanje simulirane in izmerjene temperature taline za izbrano šaržo ustrezno. Natančnejši podatki o povprečnih absolutnih napakah za večje število šarž so prikazani v Tabeli 1.

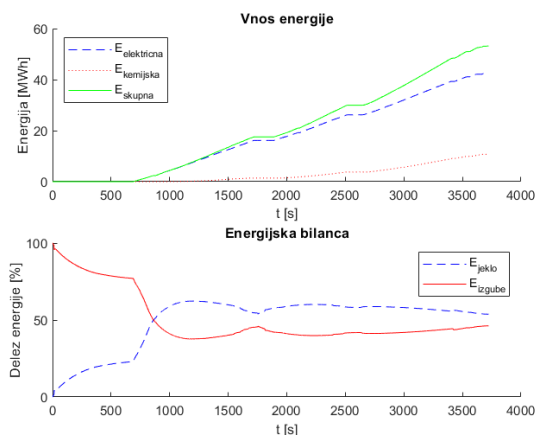
Slika 5 prikazuje simulirane poteke mas posameznih con (trdno in raztaljeno jeklo, žlindra) za eno šaržo.



Slika 5: Simulirani poteki mas posameznih con ( $m_{mm}$  – masa taline,  $m_{ss}$  – masa trdnega jekla,  $m_{smm}$  – masa žilindre)

Kot je razvidno s Slike 5, je masa trdnega vložka pri prvi meritvi temperature (pri cca. 3400 s) nižja od 95 % skupne začetne mase, kar je z vidika zahtev za ustrezno validacijo izpolnjeno.

Slika 6 prikazuje simulirane poteke energij (električna, kemijska, skupna, v jeklu, izgube) za eno šaržo.



Slika 6: Simulirani energijski poteki ( $E_{elektricna}$  – dovedena električna energija,  $E_{kemijska}$  – dovedena kemijska energija,  $E_{skupna}$  – skupna dovedena energija,  $E_{jeklo}$  – energija jekla (entalpija),  $E_{izgube}$  – energijske izgube)

V Tabeli 1 so prikazani še rezultati vrednotenja modela na osnovi povprečne absolutne napake (ang. Mean Absolute Error - MAE) in standardne deviacije (STD) pri oceni temperature taline za 305 šarž. Pri tem je za izračun povprečne absolutne napake za prvo meritev uporabljenih 305 meritev, za ostale meritve temperature pa 793 meritev (večkratno vzorčenje pri vsaki šarži).

	1. meritev $T_{mm}$ ( $N = 305$ )	Ostale meritve $T_{mm}$ ( $N = 793$ )
<b>MAE</b>	21,6 °C	11,9 °C
<b>STD</b>	24,3 °C	17,5 °C

Tabela 1: povprečna absolutna napaka modela ter standardna deviacija pri oceni temperature taline

Kot je razvidno iz Tabele 1, znašata povprečni absolutni napaki 21,6 °C za 1. meritev temperature ter 11,9 °C za ostale meritve temperature (po ponastavitvi ocenjene temperature z izmerjeno), kar pomeni, da sta obe napaki nižji od postavljenih zahtev. S tega vidika lahko model ocenimo kot ustrezen.

## 5 Zaključek

Članek na kratko predstavlja model procesov v EOP, ki je osnova digitalnega dvojčka le-te. Omenjeni model bo vgrajen v industrijsko IT omrežje podjetja SIJ Acroni Jesenice. Pričakuje se, da bo njegova uporaba in uporaba ostalih digitalnih rešitev za proces EOP vodila do zmanjšanja porabe električne energije do 10 kWh/tono, posrednega zmanjšanja izpustov CO<sub>2</sub> do 3 kg/tono ter zmanjšanja števila vzorčenja taline za 1.

## 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] J. G. Bekker, I. K. Craig, P. C. Pistorius, Modeling and simulation of an electric arc furnace process, ISIJ International, Vol. 39 (1), pp. 23-32, 1999.
- [2] R. MacRosty, C. Swartz, Dynamic modeling of an industrial electric arc furnace, Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 44, pp. 8067-8083, 2005.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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.
- [7] T. Hay, T. Echterhof, V.-V. Visuri, Development of an electric arc furnace simulator based on a comprehensive dynamic process model, Processes, Vol. 7 (11), pp. 852, 2019.
- [8] J. Gruber, T. Echterhof, H. Pfeifer, Investigation on the influence of the arc region on heat and mass transport in an eaf freeboard using numerical modeling, Steel Research International, Vol. 87, pp. 15-28, 2016.
- [9] A. Blažič, I. Škrjanc, V. Logar, Soft sensor of bath temperature in an electric arc furnace based on a data-driven Takagi-Sugeno fuzzy model, Applied Soft Computing, Vol. 113, 2021.