

# Razvoj energijskih digitalnih dvojčkov kosovne proizvodne linije

Miha Glavan, Rok Struna, Vinko Longar, Dejan Gradišar

## Izveček:

Prispevek obravnava razvoj energetskih digitalnih dvojčkov za kosovne proizvodne procese z namenom izboljšanja upravljanja porabe energije. Zaradi naraščajoče cenovne nestabilnosti energentov in zahtev po zelenem prehodu postaja natančno napovedovanje porabe energije ključno za konkurenčnost podjetij. Predstavljen je podatkovno gnan pristop, ki združuje diskretno dogodkovno modeliranje proizvodnega procesa s statističnim opisom ponovljivih profilov porabe posameznih operacij. Najprej se na podlagi meritev identificirajo prototipi porabe za posamezne operacije, nato pa se s pomočjo stohastičnih Petrijevih mrež modelira potek proizvodnje. Z uporabo Monte Carlo simulacij je mogoče napovedati skupno porabo energije ter ovrednotiti njeno variabilnost. Pristop je bil demonstriran na demonstracijski proizvodni liniji LabTop, kjer rezultati kažejo dobro ujemanje med napovedano in dejansko porabo energije. Razviti model omogoča časovno odvisno napoved porabe za različne proizvodne plane ter podpira optimizacijo razporejanja proizvodnje. Energetski digitalni dvojčki tako predstavljajo pomembno orodje za zmanjševanje koničnih obremenitev, izboljšanje energetske učinkovitosti, zaznavanje anomalij ter podporo trajnostnemu in prilagodljivemu upravljanju industrijskih procesov.

## Ključne besede:

energetski digitalni dvojček, proizvodni procesi, kosovna proizvodnja, napovedovanje porabe energije, diskretno dogodkovno modeliranje, stohastične Petrijeve mreže, Monte Carlo simulacija, upravljanje energije, optimizacija proizvodnje, industrijska energetika

## 1 Uvod

Cenovna nestabilnost energentov in težnja po zelenem prehodu postavljata v ospredje energetski vidik proizvodnega obratovanja, ki s tem postaja vedno bolj pomemben dejavnik konkurenčnosti in stabilnosti delovanja podjetja [1][2]. Podjetja se srečujejo s pritiski po zmanjšanju emisij toplogrednih plinov, izboljšanju učinkovitosti energetskih virov in integraciji obnovljivih virov energije v proizvodna okolja [3]. V ta namen se izvaja elektrifikacija procesov, uvajajo se energetske učinkovite tehnologije ter celovite rešitve za nadzor in upravljanje porabe energentov, ki podpirajo nove koncepte, kot sta odziv na povpraševanje in napovedovanje porabe.

V tem kontekstu postane natančno kratkoročno napovedovanje porabe energije ključnega pomena za zagotavljanje operativne stabilnosti in ekonomske učinkovitosti [4]. To je še posebej izrazito v razmerah, ko imamo spremenljivo oskrbo z energijo in možnosti uporabe dinamičnih proizvodnih urnikov [5][6].

V tem prispevku je predstavljen pristop za razvoj energetskih

digitalnih dvojčkov ponovljivih proizvodnih procesov. Pristop združuje diskretno dogodkovno modeliranje operacij procesa in statistični opis ponovljivosti porabe posameznih operacij. Za modeliranje se uporabljajo procesne meritve porabe in indikatorji delovanja posameznih operacij. Pristop je primeren za modeliranje porabe ponovljivih procesov, kot je kosovna industrija. Na zgodovinskih podatkih temelječ model pa je nato mogoče uporabiti za napovedovanje in napredno upravljanje porabe energije procesa.

Prispevek je strukturiran na naslednji način. V naslednjem poglavju so predstavljeni osnovni koncepti energetskih digitalnih dvojčkov proizvodnih procesov in načini njihove uporabe. V tretjem poglavju je predstavljen predlagan pristop za razvoj modelov energetskega digitalnega dvojčka na podlagi zgodovinskih podatkov primerov proizvodnega obratovanja. V četrtem poglavju je na primeru proizvodnega procesa LabTop prikazan primer razvoja modela. Peto poglavje poda končne zaključke in možnosti prenosa predstavljenega pristopa na druge primere ter predstavi možnosti praktične uporabe razvitega energetskega digitalnega dvojčka.

## 2 Energetsko upravljanje proizvodnih procesov

Energija je pomemben dejavnik stroškov v proizvodnji. Vključevanje energije v načrtovanje in nadzor proizvodnje omogoča boljše razporejanje proizvodnih nalog, zmanjšanje izgub v mirovanju/pripravljenosti in nižji odjem energije. V ta namen se vedno bolj uporablja simulacija proizvodnje in porabe, kar je tudi namen energetskih digitalnih dvojčkov.

Dr. Miha Glavan, univ. dipl. inž., Institut Jožef Stefan,  
Rok Struna, inž., Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko  
središče Novo mesto, Vinko Longar, mag. inž., Rudolfovo –  
Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto, dr. Dejan  
Gradišar, univ. dipl. inž., Institut Jožef Stefan



© The Authors 2026. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-2.20>

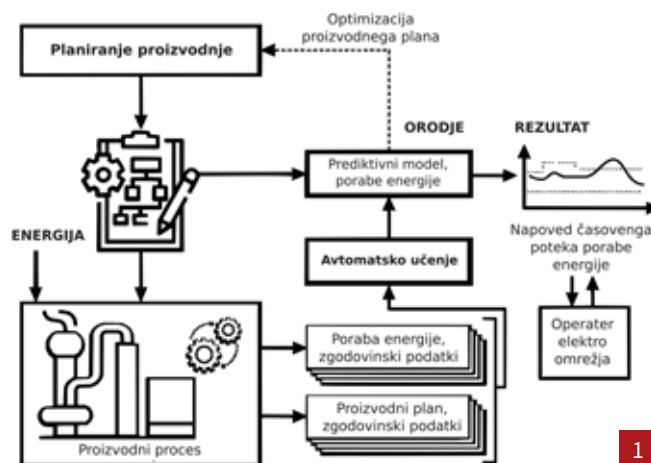
## 2.1 Energetski digitalni dvojčki proizvodnih procesov

Energetski digitalni dvojčki proizvodne opreme so virtualni modeli strojev in proizvodnih linij, ki se osredotočajo predvsem na to, kako se energija porablja med proizvodnjo [7]. Namesto da bi simulirali proizvodni proces, ti dvojčki v realnem času spremljajo in napovedujejo predvsem porabo energije, pri čemer se tipično osredotočajo na porabo glavnih procesnih energentov, kot so električna energija, plin, stisnjen zrak, toplota.

Energetski digitalni dvojčki spremljajo ključne proizvodne parametre, kot so moč sistema, temperature procesa, tlak (za sisteme zrak/plin), stanja stroja (prosti tek, zagon, polna obremenitev), ter druge procesne parametre, ki pomembno vplivajo na porabo procesa. Pri tem je potrebno ustrezno vzorčenje ključnih veličin procesa, ki morajo biti v skladu z dejansko dinamiko procesa. Na podlagi procesnih meritev in razumevanja procesa je mogoče razviti energetski model proizvodnega procesa, ki povezuje stanje procesa ter lastnosti izdelka z dejansko potrebo po energiji. Za razvoj modela se lahko opiše fizika stroja/procesa (npr. [8][9]) ali pa se za opis porabe procesa uporabijo pristopi strojnega učenja, ki se učijo na podlagi zgodovinskih primerov obratovanja (npr. [10][11]).

## 2.2 Uporabna vrednost energetskih digitalnih dvojčkov

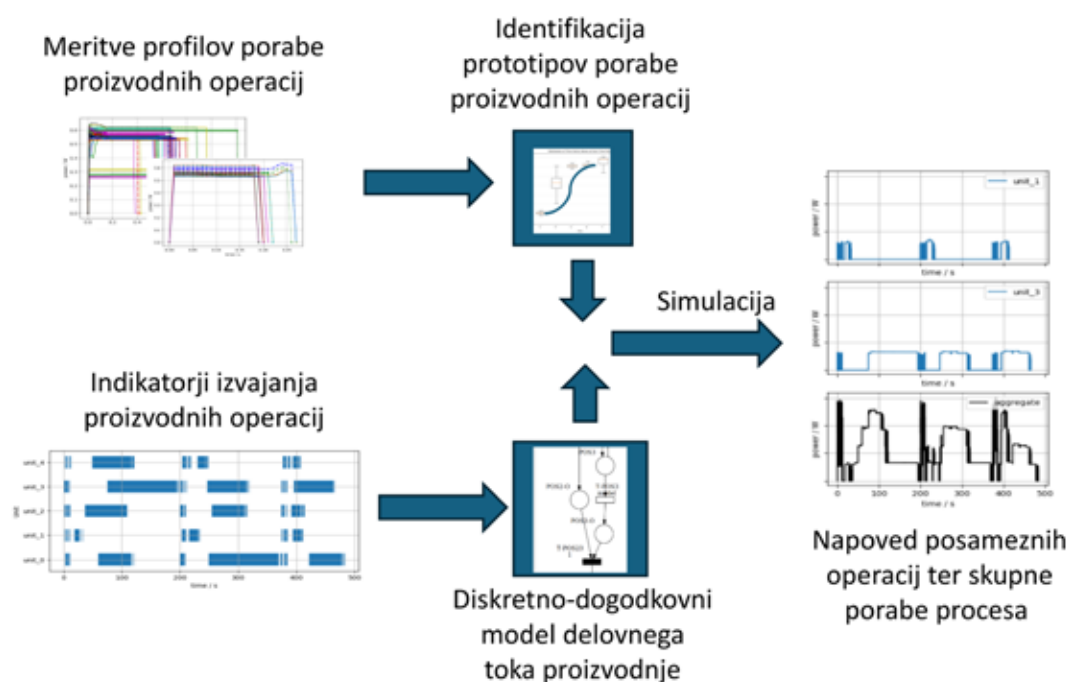
Z napovedovanjem energetskih potreb na ravni posameznih strojev ali proizvodnih linij lahko podjetje optimizira razporejanje proizvodnih nalog, kot to konceptualno prikazuje *slika 1*. Energijsko in stroškovno učinkovito planiranje ter razvrščanje (npr. [12],[13]) lahko pomagata pri optimizaciji energije



Koncept upravljanja proizvodnega plana z namenom optimizacije [17]

(zmanjševanje mrtvega časa naprav), omogočata zmanjšanje konične obremenitve in usklajitev procesne aktivnosti z obdobji nižjih stroškov energije ali večjo razpoložljivostjo obnovljivih virov energije. Poleg tega kratkoročno napovedovanje podpira odločanje v realnem času, kar omogoča prilagodljive mehanizme upravljanja, ki se odzivajo tako na notranje razmere kot na zunanje signale iz omrežja. Uvajanje napovednih energetskih modelov bo tako v prihodnje postalo pomemben dejavnik, ki omogoča trajnostne in odporne industrijske procese. Stroškovni prihranki takšnih pristopov so seveda močno odvisni od narave procesa, cen energijskih virov in njihovih omejitev. V literaturi zasledimo različne scenarije uporabe in prihrankov od 2 pa vse do 20 % [14–16].

Energetski digitalni dvojčki pa omogočajo tudi druge načine uporabe, kot so: (i) identifikacija neracionalne porabe energije (npr. poraba energije v prostem teku v primerjavi z aktivno porabo energije), (ii) upravljanje učinkovitosti procesa (model



2

Pristop za razvoj energetskega digitalnega dvojčka z združevanjem prototipov porabe operacij in diskretno-dogodkovnega modela proizvodnje

učinkovitosti v različnih obratovalnih pogojih in nastavitvah hitrosti, temperatur ali velikosti serij ter iskanje ustrezne optimizacije procesnih parametrov), (iii) izboljšanje vzdrževanja (energijske anomalije pogosto signalizirajo težave, kot so obraba ali nepravilno delovanje).

### 3 Pristop za identifikacijo energetskega digitalnega dvojčka procesa ponovljivih operacij

Kadar proizvodni proces izkazuje veliko ponovljivost operacij za posamezen izdelek, je za razvoj modela smiselno uporabiti podatkovno gnani pristop. Primeri takšnih ponovljivih procesov z velikim številom ponovitev so predvsem kosovna industrija in šaržni procesi s konstantnimi proizvodnimi recepti.

V tem prispevku je predlagan pristop za razvoj energetskega digitalnega dvojčka, kot je shematično predstavljen na *sliki 2*. V prvem koraku je potrebno z uporabo podatkovne analitike identificirati prototipne profile porabe posameznih operacij. Po drugi strani pa je potrebno opisati tudi sosledje in trajanje operacij, potrebnih za izvedbo vseh proizvodnih nalog. V ta namen je predlagana uporaba diskretno-dogodkovnega modeliranja procesnih operacij. Z uporabo Monte Carlo simulacijske tehnike generiramo več realizacij proizvodnega procesa, pri čemer se naključno vzorčijo trajanja operacij na podlagi identificiranih porazdelitev v diskretno-dogodkovnem modelu ter variacije prototipnih profilov porabe. Za vsako realizacijo izračunamo časovni profil skupne porabe energije. S tem se približamo celotnemu spektru možnih izidov proizvodnega procesa in s tem povezanih energetskih potreb, kar omogoča oceno pričakovane vrednosti porabe, njene variance in verjetnosti različnih izidov.

Končna napoved porabe energije temelji na združitvi modela delovnega toka proizvodnje in modelov porabe posameznih operacij. Za vsako realizacijo proizvodnega procesa, generirano z diskretno-dogodkovnim modelom, posameznim izvedbam operacij pripišemo ustrezne prototipne profile porabe. Skupni časovni profil porabe energije nato dobimo s časovnim seštevanjem teh profilov, pri čemer se upošteva njihovo morebitno prekrivanje zaradi sočasnega izvajanja operacij.

Za razvoj takšnega modela je potrebno zagotoviti primere preteklega delovanja procesa, pri čemer so potrebne sledeče meritve: (i) meritve moči za vsak posamezen proizvodni korak (stroj ali proizvodna celica), (ii) stanje procesa (stanje zaustavitve, proces v mirovanju ali obdelovalni proces) in (iii) sledljivost tipa obdelovanih izdelkov ali drugih parametrov, ki

ključno vplivajo na nivo ter profil energijske porabe (npr. uporabljen CNC-program).

#### 3.1 Identifikacija prototipov porabe posameznih proizvodnih operacij

Za razvoj modela porabe posamezne operacije je potrebno zbrati reprezentativne meritve časovnega profila porabe energije. Kot je prikazano na *sliki 3*, se iz časovno urejenih meritev porabe za posamezno operacijo identificira poraba, vezana na dejansko proizvodno aktivnost. S tem se izloči obratovanje v ustaljenem stanju, za katero lahko pogosto predpostavimo, da obratuje s konstantno močjo.

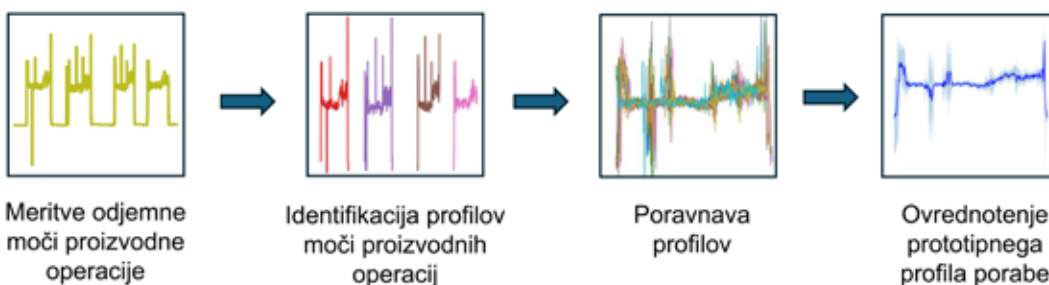
V naslednjem koraku na podlagi upoštevanja časovnih indikatorjev začetka in konca obratovalnih operacij celoten profil razdelimo na več ponovljivih sekvenc profilov porabe za izdelavo izdelkov. Zaradi pričakovanih deviacij v izvedbi proizvodnih operacij neposredna primerjava med tako urejenimi signali ni ustrezna. Zato v zadnjem koraku z uporabo iterativnega algoritma ERAL [18] (angl. *Error in Alignment*) poravnamo posamezne profile porabe glede na karakteristične deviacije v porabi. ERAL-metoda preverja različne zamike signalov, s čimer se ocenjuje usklajenost signalov glede na poravnavo. S tem zagotovimo popolno ujemanje signalov, kar izboljšuje sledeče korake modeliranja procesne ponovljivosti.

Na podlagi poravnanih profilov porabe nato statistično opišemo pričakovano deviacijo profila porabe. Za vsako časovno točko profila ocenimo parametre normalne porazdelitve (pričakovano vrednost in varianco) na podlagi poravnanih meritev. S tem definiramo časovno odvisen stohastični opis porabe posamezne operacije.

#### 3.2 Model delovnega toka proizvodnje

Delovni tok proizvodnje definira sosledje in medsebojno odvisnost proizvodnih operacij, skozi katere potuje izdelek. Za njegov opis smo uporabili diskretno-dogodkovno modeliranje na osnovi stohastičnih Petrijevih mrež (angl. *Stochastic Petri nets*, SPN) [19], ki predstavljajo uveljavljen formalizem za modeliranje in analizo diskretno-dogodkovnih sistemov.

SPN so matematični in grafični formalizem, ki se uporablja za analizo sistemov, za katere so značilne sočasnost, sinhronizacija in naključnost. Uporaba Petrijevih mrež za modeliranje proizvodnih sistemov je dobro uveljavljena v literaturi, zlasti za analizo diskretno-dogodkovnih procesov, izkoriščenosti vi-



3

Koraki za definiranje prototipa porabe za posamezno proizvodno operacijo

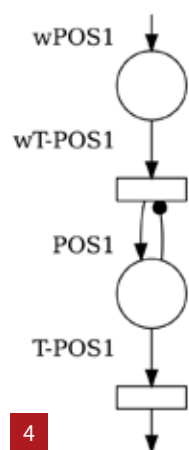
rov ter sinhronizacije operacij [20]. SPN razširjajo klasične Petrijeve mreže z vključitvijo časovne dimenzije, kjer so prehodi opremljeni z naključnimi časi proženja. SPN lahko formalno opišemo kot:

$$SPN=(P, T, I, O, M_0, \lambda) \quad (1)$$

kjer  $P$  predstavlja množico mest,  $T$  množico prehodov,  $I$  in  $O$  vhodno in izhodno incidenčno funkcijo,  $M_0$  začetno označitev mreže ter  $\lambda$  parametre porazdelitev časov proženja prehodov. Mesta predstavljajo stanja sistema oziroma razpoložljivost virov, žetoni označujejo prisotnost entitet (izdelkov), prehodi pa modelirajo dogodke, kot so začetek ali zaključek proizvodne operacije.

Izbira SPN je primerna za modeliranje kosovne proizvodnje, saj omogoča predstavitev omejenih proizvodnih virov, sočasnega izvajanja operacij ter njihove sinhronizacije. Uporaba verjetnostnih porazdelitev časov prehodov omogoča tudi opis variabilnosti trajanja operacij, ki neposredno vpliva na časovno porazdelitev porabe energije.

Za opis kosovne proizvodnje smo celoten proizvodni proces razdelili na posamezne proizvodne operacije oz. delovne postaje. Primer osnovnega modela za predstavitev ene proizvodne celice je predstavljen na *sliki 4*. Predstavljeni formalizem prikazuje delovno celico s čakalno vrsto (stanje wPOS1) ter stanjem proizvodnega obratovanja (stanje POS1). Model po potrebi vključuje tudi inhibitorne povezave, ki omogočajo dodatno omejevanje proženja prehodov. Inhibitor stanja preprečuje sočasno obdelavo več izdelkov, s čimer se formalizira zasedenost proizvodnega vira (obdelava samo enega izdelka naenkrat). Glede na lastnosti dejanskega proizvodnega procesa in načina izvedbe operacij se osnovni model proizvodne celice lahko ustrezno prilagodi.



4 Primer modela ene proizvodne celice s čakalno vrsto in virom za obdelavo enega izdelka naenkrat

Na podlagi zgodovinskih primerov obratovalnih podatkov se statistično ovrednotijo časi prehodov (wT-POS1 – čas priprave na izdelavo, T-POS1 – čas izdelave), ki so uporabljeni kot parametri stohastičnih prehodov v modelu. Tako definiran model omogoča generiranje realizacij proizvodnega procesa, ki jih lahko uporabimo v Monte Carlo simulacijah za oceno porazdelitve skupne porabe energije in njene variabilnosti. Na podlagi večkratnih simulacij tako pridobimo porazdelitev možnih energijskih odzivov sistema, iz katere lahko ovrednotimo pričakovano porabo, variabilnost ter konične obremenitve.

#### 4 Primer razvoja energetskega digitalnega dvojčka proizvodne linije LabTop

Predlagani pristop za razvoj energetskega digitalnega dvojčka je bil testiran na demonstracijski proizvodni liniji. Koraki razvoja in validacije digitalnega dvojčka so predstavljeni v naslednjih podpoglavjih.

#### 4.1 Demonstracijska proizvodna linija LabTop

LabTOP proizvodna linija (*slika 5*) predstavlja fleksibilno in avtomatizirano okolje za izdelavo osnovnih izdelkov v več variacijah, kar omogoča preučevanje različnih proizvodnih scenarijev. Linija je zasnovana kot sistem, ki podpira integracijo različnih industrijskih komponent ter prilagodljivo konfiguracijo procesov. Vgrajeni sistemi za zajem podatkov omogočajo spremljanje širokega nabora signalov in meritev, vključno z energetskimi, procesnimi in operativnimi parametri. Razvojno okolje omogoča testiranje in validacijo algoritmov ter digitalnih rešitev, saj zagotavlja realistično, a hkrati nadzorovano platformo za eksperimentiranje z različnimi pristopi upravljanja in optimizacije proizvodnje.

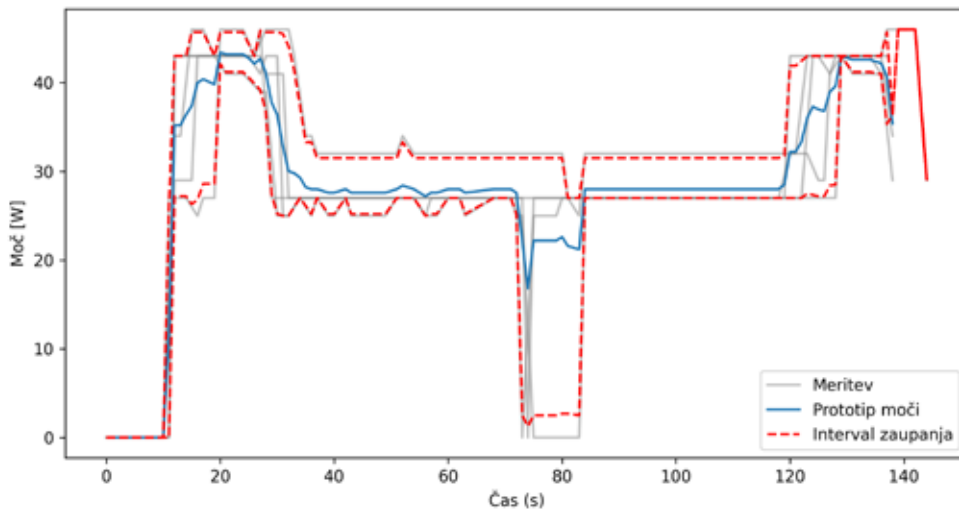
V okviru demonstracije pristopa so bile opravljene meritve med izdelavo produkta namizne ure, sestavljene iz dveh polizdelkov, z možnostjo različnih variacij obdelave. Proizvodni proces je bil zasnovan kot zaporedje avtomatiziranih operacij, ki vključujejo skladiščenje (POS0 SKLADISCE), lasersko graviranje (POS1 LASER), CNC-obdelavo (POS2 ROBOT CNC, POS3 CNC), ročno sestavo (POS4 ROCNO), vizualno kontrolo (POS5 STROJNI VID) ter etiketiranje (POS6 ETIKETIRANJE). Polizdelki so bili najprej avtomatsko naloženi na transportne palete, nato pa so prehajali skozi posamezne obdelovalne celice, kjer so se izvajali prilagojeni programi glede na varianto izdelka. Po mehanski in laserski obdelavi sta bila oba polizdelka na ročnem delovnem mestu sestavljena v končni izdelek. Sledili sta še kontrola kakovosti z uporabo sistema strojnega vida ter zaključna obdelava. Transport palet med celicami je potekal avtomatizirano, pri čemer je bila zagotovljena tudi krožna logistika praznih in polnih palet.



5 Proizvodna linija LabTop

#### 4.2 Identifikacija prototipov porabe proizvodnih operacij

Za namene demonstracije pristopa je bilo izvedeno eksperimentalno delovanje proizvodne linije, kjer so bili izdelani različni primerki končnega izdelka. Med delovanjem proizvodne linije je nadzorni sistem beležil ključne dogodke linije in ele-



6

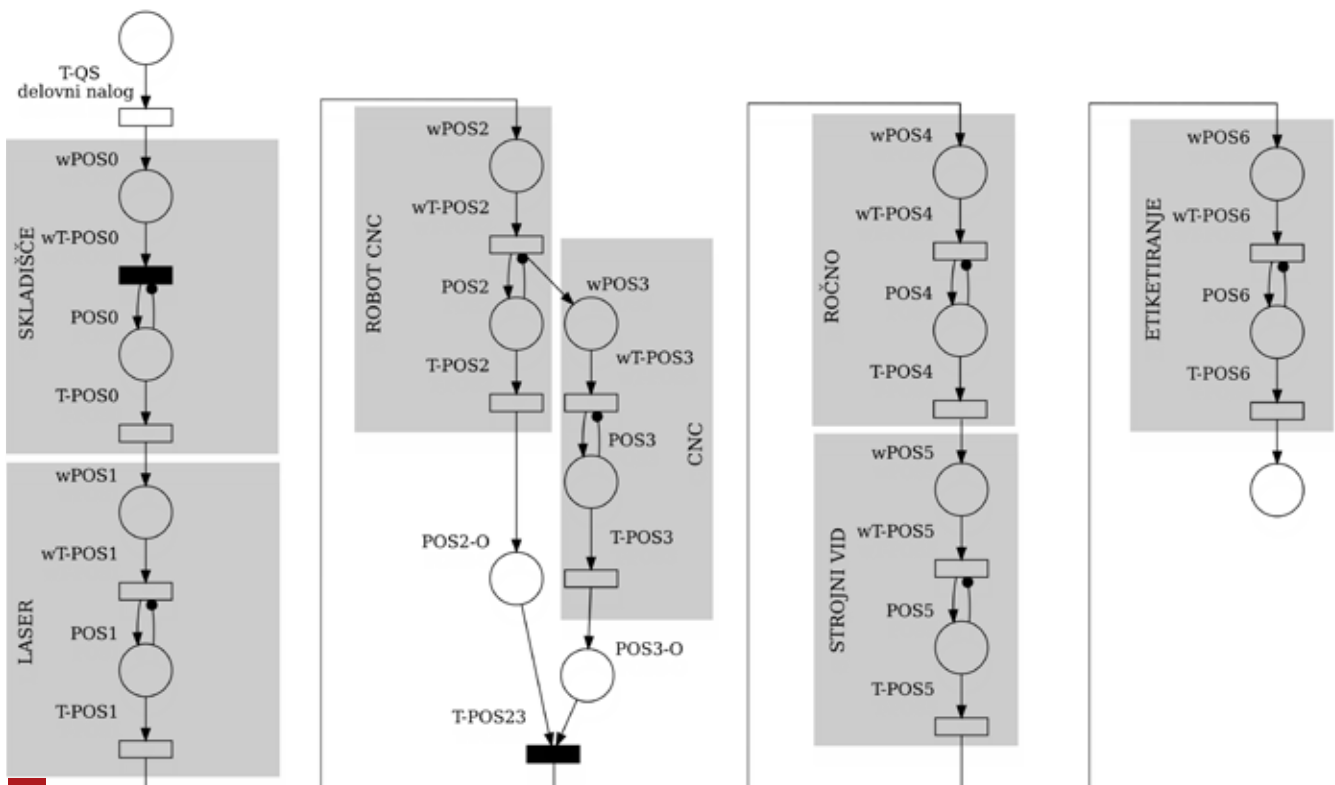
Ovrednoten prototip in varianca porabe za proizvodno operacijo POS1 LASER

ktrični tok po posameznih proizvodnih postajah. Pri tem se je električna poraba merila preko protokola OPC-UA z vzorčnim časom 1 s.

Na podlagi indikatorjev proizvodnih operacij in sprotnih meritev moči na posameznih delovnih postajah smo z uporabo postopka, opisanega v poglavju 3.1, identificirali prototipne profile porabe moči proizvodnje in njihovo variabilnost. Primer identificiranega profila porabe za proizvodno operacijo POS1 LASER je prikazan na *sliki 6*. Na zgornjem delu slike je prikazan statistični popis prototipa moči. Vidimo, da je operacija dobro ponovljiva in da so iz meritev zaznana zgolj manjša odstopanja v porabi. Podoben postopek smo izvedli še za preostale proizvodne postaje.

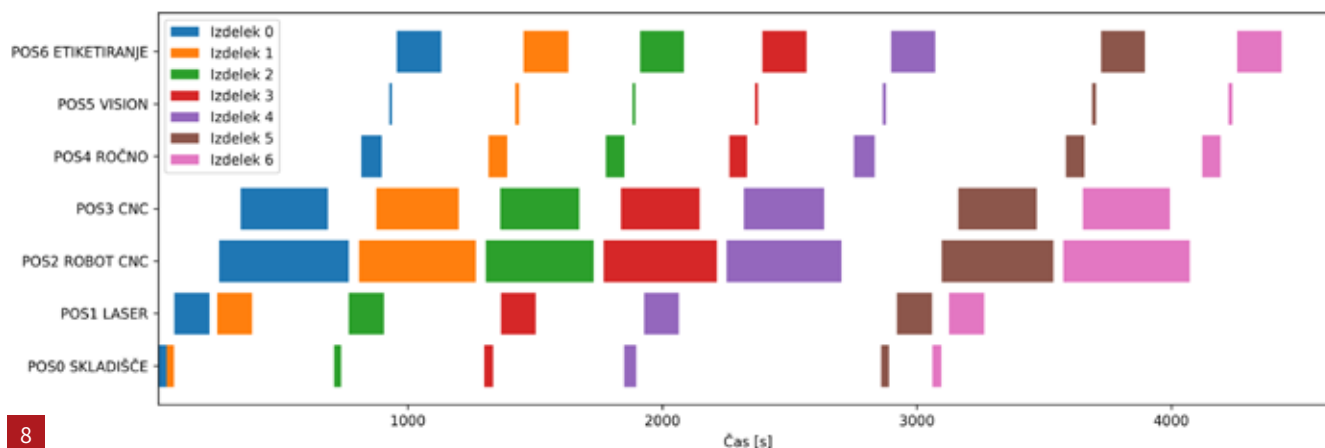
### 4.3 Diskretno-dogodkovni model proizvodnje

V naslednjem koraku definiramo diskretno-dogodkovni model proizvodnje v obliki stohastičnih Petrijevih mrež z uporabo orodja PySPN [21]. Proizvodni proces predstavimo kot sosledje vseh proizvodnih operacij, pri čemer upoštevamo dejanske lastnosti proizvodnje. V obravnavani proizvodni liniji imamo tako čakalne vrste pred vsako izmed proizvodnih celic (tekoči trak) in omejitev obdelave enega izdelka naenkrat. Operacije si sledijo v sosledju izdelave, razen operacij POS2 ROBOT CNC in POS3 CNC, ki tečeta vzporedno, saj robot poslužuje CNC-stroj. Tako opisan proizvodni proces je formalno predstavljen na *sliki 7*.



7

Diskretno-dogodkovni model LabTop proizvodnih operacij



8

Gantogram izvedbe proizvodnih operacij za enega izmed simuliranih potekov proizvodnje sedmih izdelkov

Na podlagi zgodovinskih podatkov pa je potrebno ovrednotiti tudi stohastično naravo procesa. Na podlagi analize dejanskih izmerjenih časov izvajanja operacij smo ovrednotili statistične lastnosti trajanja posameznih operacij in časov od sprostitve proizvodnega vira do začetka obdelave (mrtvi časi). Pri tem predpostavimo normalno porazdelitev časov prehodov, kar predstavlja aproksimacijo dejanske variabilnosti procesa. S tem korakom smo pridobili celoten model v obliki stohastičnih Petrijevih mrež, ki omogoča simulacijo sosledja stanj sistema in oceno pričakovanih časov zadrževanja v posameznih stanjih.

#### 4.4 Validacija razvitega energetskega digitalnega dvojčka

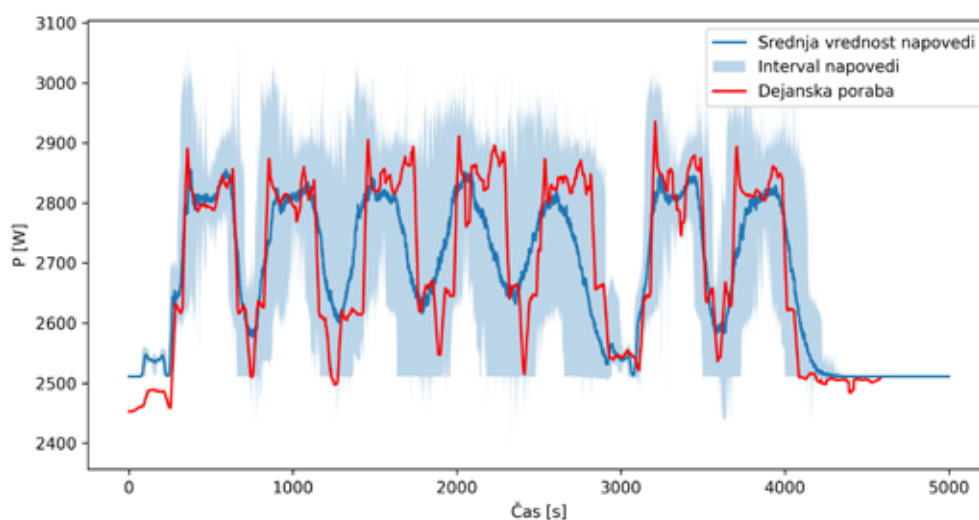
Razvit model, ki združuje diskretno dogodkovno naravo procesa in ponovljivost energetskih potreb proizvodnih operacij, lahko uporabimo za simuliranje dejanskih potreb porabe energije za poljuben proizvodni plan. *Slika 8* predstavlja eno izmed možnih izvedb proizvodnega plana za proizvodnjo sedmih različnih izdelkov.

Vsak simulacijski rezultat poleg proizvodnega urnika proizvodnih stanj generira tudi pričakovano porabo po proizvodnih

operacijah ter celotni skupni profil porabe procesa. Seveda pa zaradi stohastične narave procesa in tudi modela vsaka simulacija predstavlja zgolj eno možno realizacijo proizvodne operacije. Z uporabo Monte Carlo simulacije procesa lahko z večjim številom ponovitev ovrednotimo variabilnost porabe v določenem časovnem trenutku. *Slika 9* prikazuje združen rezultat stotih simulacij za izvedbo enakega proizvodnega plana izdelave sedmih izdelkov. Poleg srednje pričakovane vrednosti energijske porabe je prikazan tudi interval napovedi, ki podaja informacijo o pričakovani variabilnosti porabe. Z rdečo barvo pa je označena dejanska poraba, izmerjena na proizvodnem procesu za enak proizvodni plan. Rezultati kažejo, da se simulirana napoved dobro ujema z variabilnostjo, zajeto z razvitim napovednim modelom, kar potrjuje ustreznost predlaganega pristopa za modeliranje in napovedovanje energetskih potreb proizvodnega procesa.

## 5 Zaključek

Predstavljeni pristop predstavlja enostaven in učinkovit način formalizacije energetskih lastnosti proizvodnega procesa v obliki podatkovno gnanega energetskega digitalnega dvojčka, ki združuje model poteka proizvodnje in statistični opis porabe posameznih operacij. Uporabljeni pristop izkorišča pono-



9

Primerjava simulacijske napovedi (100 simulacijskih tekov) z dejansko porabo procesa

vljivost proizvodnega procesa in možnost učenja na podlagi zgodovinskih obratovalnih podatkov. Pristop je neodvisen od opazovanega energenta in ga je mogoče brez večjih prilagoditev preslikati tudi na druge procese ter energente (npr. odjem komprimiranega zraka).

Na primeru proizvodnega procesa LabTop je bil prikazan razvoj energetskega digitalnega dvojčka proizvodne linije. Razviti model omogoča časovno odvisno napoved gibanja porabe za poljuben proizvodni nalog, kjer se upoštevajo identificirana variabilnost proizvodnih časov, variacija moči porabe ter omejenost razpoložljivosti proizvodnih virov.

Samo obvladovanje napovedi porabe električne energije diskretnih proizvodnih procesov pa seveda ne omogoča neposrednega zmanjševanja in optimizacije porabljene energije. Natančne napovedi imajo pomembno vlogo predvsem pri pametnem razvrščanju za namene zmanjševanja stroškov, vezanih na energijo, sploh takrat, kadar so energetske viri omejeni in vezani na dinamične cene. Praktična uporaba tako razvitih energetskih digitalnih dvojčkov omogoča razvoj novih pristopov za aktivno upravljanje z energijo preko aktivne prilagoditve proizvodnih urnikov, kot je to prikazano na sliki 1. S tem je mogoče obravnavati probleme omejene razpoložljivosti virov energije, dinamično ceno energentov ter problematiko zmanjševanja tokovnih konic pri vzporednem delovanju več proizvodnih linij. Z iterativno optimizacijo in simulacijo različnih scenarijev je tako mogoče ovrednotiti in poiskati najbolj primeren proizvodni urnik glede na naročila ter energetske omejitve ali izboljšati interno upravljanje z energijo (npr. predhodno shranjevanje energije) [12–16].

Demonstrirani primer je sicer enostaven in služi predvsem za prikaz pristopa, a že na tej ravni omogoča vpogled v potencial tovrstnih modelov. Praktična vrednost bi se še bolj izrazito pokazala, če bi se ukvarjali z naslednjimi primeri: (i) s proizvodnjo z različnimi produkti na isti liniji, (ii) z več vzporednimi proizvodnimi linijami ali (iii) pri procesih z bolj izrazitimi energetskimi porabniki. V takšnih razmerah raziskave poročajo o možnih stroškovnih prihrankih od 2 do 20 % [14–16], kar kaže na znaten ekonomski potencial opisanega pristopa.

Drug način uporabe energetskih modelov proizvodnje pa predstavlja področje naprednega spremljanja proizvodnih operacij. Z vzporednim napovedovanjem pričakovane energetske porabe in primerjavo z dejansko izmerjeno porabo je mogoče v realnem času zaznavati odstopanja v času izvajanja posameznih operacij ali pa spremembe v njihovem energetskem odtisu.

**Odpri raziskovalni podatki:** Raziskovalni podatki, ki podpirajo ugotovitve tega članka, so odprto dostopni v repozitoriju Zenodo: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19401806> [22]

## Viri

- [1] B. van Mathiesen, R. M. Johannsen, K. Kermeli, W. Crijns-Graus, H. Lund, I. Ridjan Skov, The green transition of industry – An introduction to IndustryPLAN, *Smart Energy*, Volume 11, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100111>.
- [2] K. Luchkov, G. Chipriyanova, M. Chipriyanov, Industry 5.0 and Green Transition-Challenges and Opportunities for Business and Society. In: El Khatib, M., Alzoubi, H.M., Angelova, Y. (uredniki) *Sustainable Innovation for Engineering Management (SIEM)*, *Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, 2024, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-89889-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-89889-1_1).
- [3] G. May, I. Barletta, B. Stahl, M. Taisch, Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency. *Applied Energy*, 149, 46–61, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.065>.
- [4] Y. Hu, Y. Man, Energy consumption and carbon emissions forecasting for industrial processes: Status, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113405>.
- [5] O. Ogorodnyk, E. Sølvsberg, R. Eleftheriadis, Digital Twin and Demand Response – Sustainable Tools for Quality and Energy Consumption Optimization in Manufacturing, *Procedia CIRP*, Volume 138, 2026, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.01.152>.
- [6] K. Biel, C. H. Glock, Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning, *Computers & Industrial Engineering*, 2016, Volume 101, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.021>.
- [7] A. Billey, T. Wuest, Energy digital Twins in smart manufacturing Systems: A literature review, *Manufacturing Letters*, 2023, Volume 35, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.047>.
- [8] M. Glavan, D. Gradišar, S. Invitto, I. Humar, Đ. Juričić, C. Pianese, D. Vrančić, Cost optimisation of supermarket refrigeration system with hybrid model, *Applied thermal engineering*, 2016, vol. 103, 10.1016/j.appltherm.2016.03.177.
- [9] M. Rutnik, B. Pregelj, D. J. Jovan, G. Dolanc, Modelling, optimization and control of hydrogen-based power supply system for residential buildings. *Energy conversion and management*, 2026, vol. 355, 10.1016/j.enconman.2026.121244.
- [10] D. Gradišar, M. Glavan, G. Kmet, Napovedovanje energetske porabe proizvodnih procesov s pomočjo podatkovne analitike. V: MUŠKINJA, Nenad (ur.), ROTOVNIK, Milan (ur.), BRATINA, Božidar (ur.). Zbornik štirinajste konference Avtomatizacija v industriji in gospodarstvu: 3. april 2025 Maribor, Slovenija. Ljubljana: Društvo avtomatikov Slovenije, str. 14–21, 2025, [https://aig.si/25/zbornik/clanki/Gradisar\\_Dejan.pdf](https://aig.si/25/zbornik/clanki/Gradisar_Dejan.pdf).
- [11] M. Brillinger, M. Wuwer, M. Hadi, F. Haas, Energy prediction for CNC machining with machine learning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.07.014>.
- [12] Sun, M., Cai, Z., Yang, C. et al. Digital twin for energy-efficient integrated process planning and scheduling. *Int J Adv Manuf Technol* 127, 3819–3837 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11755-w>
- [13] Shao, Z., Li, W., Tan, Y., & Otto, K. (2024). A systematic energy-aware scheduling framework for manufacturing factories integrated with renewables. *International Journal of Production Research*, 62, 7644 – 7659. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2323067>.
- [14] Yu-Chung Tsao, Vo-Van Thanh, Feng-Jang Hwang, Energy-efficient single-machine scheduling problem with

- controllable job processing times under differential electricity pricing, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 161, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104902>.
- [15] X. Gong, T. De Pessemier, W. Joseph and L. Martens, "A power data driven energy-cost-aware production scheduling method for sustainable manufacturing at the unit process level," 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin, Germany, 2016, pp. 1–8, doi: 10.1109/ETFA.2016.7733716.
- [16] Dominik Leherbauer, Julia Schulz, Alexander Egyed, Peter Hehenberger, Demand-side management in less energy-intensive industries: A systematic mapping study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 212, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115315>.
- [17] DIGITOP, Digitalna transformacija robotiziranih tovarnih prihodnosti, 2026, <https://digitop.info/>.
- [18] Ž. Stržinar, I. Škrjanc, B. Pregelj, Evolving interval-based time series clustering for streaming industrial data, *Evolving systems*, vol. 16, article no. 82, str. 1–17, 2025, 10.1007/s12530-025-09713-w.
- [19] B. Falko, P. S. Kritzing, *Stochastic Petri Nets – An Introduction to the Theory*, 2. izdaja, Braunschweig, Germany: Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 2002.
- [20] D. Gradišar, G. Mušič. Production-process modelling based on production-management data: a Petri-net approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20(8), 794–810, 2007. <https://doi.org/10.1080/09511920601103064>
- [21] J. Friederich, A. Khodadadi, S. Lazarova Molnar, PySPN: a Python library for stochastic Petri net modeling, simulation, and event log generation. *SIMULATION*, 102(1): 59–73, 2026, <https://doi.org/10.1177/00375497251343625>.
- [22] M. Glavan, D. Gradišar, R. Struna, V. Longar, "Energy consumption dataset from LabTOP production line". Zenodo, Apr. 03, 2026. doi: 10.5281/zenodo.19401806.

## Development of Energy-Consumption Digital Twins for a Discrete Production Lines

### Abstract:

The paper addresses the development of energy digital twins for discrete manufacturing processes with the aim of improving energy consumption management. Due to increasing price volatility of energy sources and the demands of the green transition, accurate energy consumption forecasting is becoming crucial for maintaining companies' competitiveness. A data-driven approach is presented that combines discrete-event modelling of the production process with a statistical description of repeatable energy consumption profiles of individual operations. First, consumption prototypes for individual operations are identified based on measurements, and then the production flow is modelled using stochastic Petri nets. By applying Monte Carlo simulations, it is possible to predict total energy consumption and evaluate its variability. The approach was demonstrated on the LabTop demonstration production line, where the results show a good match between predicted and actual energy consumption. The developed model enables time-dependent forecasting of consumption for different production plans and supports the optimization of production scheduling. Energy digital twins thus represent an important tool for reducing peak loads, improving energy efficiency, detecting anomalies, and supporting sustainable and adaptive management of industrial processes.

### Keywords:

energy digital twin, production processes, discrete manufacturing, energy consumption forecasting, discrete-event modelling, stochastic Petri nets, Monte Carlo simulation, energy management, production optimization, industrial energy systems

### Zahvala

Delo je bilo izvedeno v sklopu nacionalnega raziskovalnega programa Sistemi in vodenje (P2-0001), ki ga financira ARIS, ter projekta DIGITOP (TN-06-0106), ki ga sofinancirata Republika Slovenija, Ministrstvo za visoko šolstvo znanost in inovacije, Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije ter Evropska unija – NextGenerationEU.

POSVET

# AVTOMATIZACIJA STREGE IN MONTAŽE 2026 - ASM '26

03. decembra 2026  
na Gospodarski zbornici Slovenije v Ljubljani



aktualne novice o posvetu so na voljo na [www.posvet-asm.si](http://www.posvet-asm.si)