

Program

Digitalna transformacija robotiziranih tovarnih prihodnosti

DIGITOP

Rezultat 5.5:

Končana integracija digitalnih dvojčkov in AI modulov

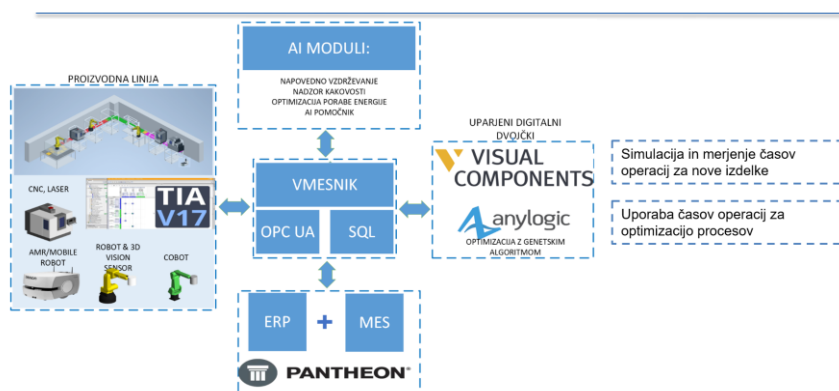
Projekt/RRP	DIGITOP/ RRP5, Aktivnost 5.5
Vrsta dokumenta	Poročilo
Verzija dokumenta	1.0
Sodelujoči partnerji	RUD, IJS-E1, ULFE-LR
Avtorji	Dr. Krištof Debeljak, Dr. Janez Povh, Vinko Longar, Rok Struna
Datum priprave	16.2.2026

Kazalo

1	UVOD	3
2	VMESNIK	4
3	ANYLOGIC	4
4	AI MODULI	6
4.1	NAPOVEDNO VZDRŽEVANJE	6
4.2	NADZOR KAKOVOSTI	6
4.3	OPTIMIZACIJA PORABA ENERGIJE	7
4.4	OPTIMIZACIJA PLANIRANJA PROIZVODNJE	8
	BIBLIOGRAFIJA	9

1 Uvod

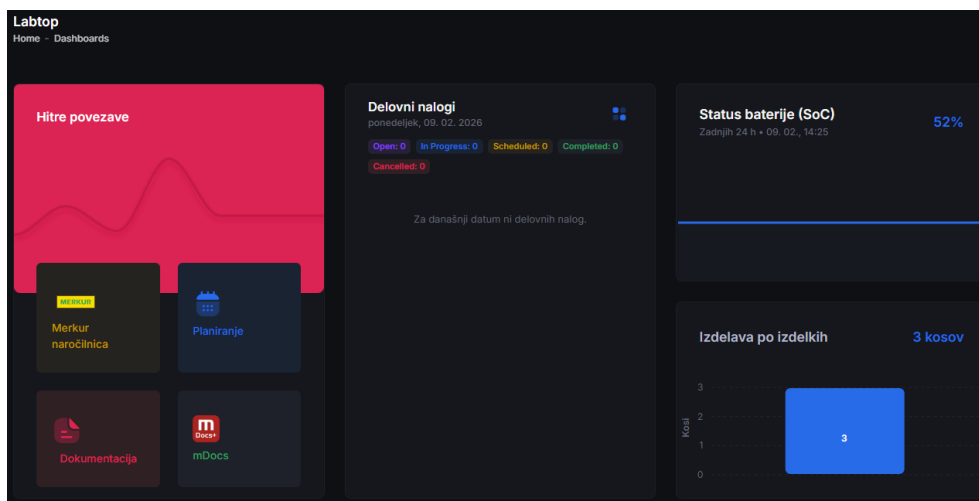
V okviru aktivnosti 5.5 – Združevanje osnovnega digitalnega dvojčka, modulov robotike in umetne inteligence v izboljšan digitalni dvojček, smo razvili celovito rešitev, ki temelji na dveh nivojih digitalnega dvojčka proizvodnega sistema ter njihovi integraciji z UI in optimizacijskimi moduli ter MES/ERP okoljem. V prvi fazi je bil vzpostavljen osnovni digitalni dvojček, razvit v okolju Visual Components, ki omogoča podroben prikaz proizvodne linije, razporeditev strojev, tok materiala ter osnovno analizo delovanja proizvodnega sistema. Ta digitalni dvojček predstavlja izhodiščno simulacijsko in analitično plast, namenjeno razumevanju proizvodnega procesa ter validaciji osnovnih proizvodnih scenarijev. Na tej osnovi smo v okviru aktivnosti 5.5 izvedli nadgradnjo v izboljšan digitalni dvojček, implementiran v okolju AnyLogic, ki poleg diskretne simulacije proizvodnih procesov omogoča tudi integracijo UI, optimizacijskih algoritmov in naprednih odločitvenih logik. Izboljšan digitalni dvojček je umeščen v okolje LabTOP in omogoča dvosmerno komunikacijo z integriranim MES in ERP sistemom, s čimer postane aktivni del informacijskega ekosistema proizvodnje. Izboljšan digitalni dvojček zagotavlja informacije za učinkovitejše in bolj prilagodljivo delovanje proizvodnje, kot so priprava optimalnih proizvodnih naročil, podpora pri pravočasnem vzdrževanju, energetska učinkovito planiranje. Poseben poudarek je bil namenjen integraciji različnih optimizacijskih pristopov, ki proizvodnjo obravnavajo na več nivojih. V rešitvi so združeni moduli za optimizacijo planiranja proizvodnje, optimizacijo porabe energije, napovedno vzdrževanje in nadzor kakovosti. Digitalni dvojček tako ne služi zgolj kot simulacijsko orodje, temveč kot aktivni odločitveni sistem, ki na podlagi realnih in napovednih podatkov predlaga optimalne scenarije delovanja. Pomembno vlogo pri integraciji vseh komponent ima razviti uporabniški in integracijski vmesnik, ki omogoča povezovanje osnovnega in izboljšanega digitalnega dvojčka, AI modulov, optimizacijskih algoritmov ter zunanjih informacijskih sistemov. Vmesnik omogoča obravnavo različnih variacij izdelkov, avtomatsko generiranje delovnih nalogov ter komunikacijo z MES sistemom, pri čemer zagotavlja, da se proizvodnja izvaja v skladu z optimalnimi časovnimi, energetskimi in stroškovnimi kriteriji. Okolje AnyLogic se v okviru izboljšanega digitalnega dvojčka uporablja za simulacijo, testiranje in prilagajanje proizvodnih scenarijev.



Slika 1: Diagram komunikacije sistemov

2 Vmesnik

Za zagotovitev učinkovite in zanesljive komunikacije med digitalnim dvojčkom, optimizacijskimi algoritmi in MES sistemom smo razvili namenski uporabniški in integracijski vmesnik, ki predstavlja osrednjo točko upravljanja proizvodnih in energetskih podatkov. Vmesnik omogoča obravnavo različnih variacij izdelkov, in sicer do približno 100 različnih variant, kar omogoča natančnejše modeliranje proizvodnje. Posledično lahko za vsako variacijo izdelka določimo različne čase obdelave in pripadajoče proizvodnje programe, kar bistveno izboljša kakovost vhodnih podatkov za optimizacijske in napovedne modele. Vsaka posamezna operacija je tako časovno in energijsko ovrednotena glede na konkretno variacijo izdelka, kar omogoča zajem širšega nabora proizvodnih situacij ter analizo različnih obratovalnih scenarijev. Vmesnik je neposredno povezan tudi z zunanjim sistemom spletne trgovine, kar omogoča samodejno generiranje delovnih nalogov na podlagi naročil, oddanih preko spletne platforme. S tem je zagotovljena neposredna povezava med naročili kupcev in proizvodnim procesom, brez potrebe po ročnem vnosu podatkov. Kot že omenjeno v predhodnih poglavjih, vmesnik komunicira z vsemi razvitimi AI in optimizacijskimi moduli, vključno z algoritmi za planiranje proizvodnje in optimizacijo porabe energije. Na podlagi rezultatov teh modulov se delovni nalog v proizvodnjo razpiše šele takrat, ko je glede na izbrane kriterije (čas, energija, stroški) ocenjen kot optimalen. Na ta način vmesnik deluje kot odločitvena plast, ki zagotavlja, da proizvodnja deluje v skladu z optimalnimi scenariji, izračunanimi na podlagi aktualnih podatkov in omejitev sistema. Razviti vmesnik tako predstavlja ključen povezovalni element med informacijskimi sistemi, digitalnim dvojčkom in optimizacijskimi algoritmi ter omogoča celovito, podatkovno podprto upravljanje proizvodnje, prilagojeno tako proizvodnim kot energetskim ciljem.



Slika 2: Glavni dashboard vmesnika

3 AnyLogic

Pri razvoju digitalnega dvojčka v Visual components smo uspešno razvili funkcionalnosti, ki nam omogočajo simulacijo izdelava proizvodnih naročil, validacijo optimalnih postavitev robotov in perifernih naprav ter izdelavo off-line robotskih programov [1]. Zaznali pa smo nezmožnosti oz. pomanjkljivosti programske opreme

Visual components pri integraciji algoritmov za optimizacijo vrstnega reda naročil ter AI algoritmov za nadzor kakovosti, optimizacije porabe energije in napovednega vzdrževanja.

Razvili in validirali smo digitalni dvojček demonstracijske proizvodne linije LabTOP ter ga povezali z optimizacijskim programom na osnovi genetskega algoritma. Cilj je bil preučiti, ali lahko digitalni dvojček v kombinaciji z metahevrstično metodo izboljša učinkovitost razporejanja proizvodnih opravil, pri čemer smo kot glavni kazalnik spremljali skupni čas izdelave (makespan), dodatno pa tudi porabo energije.

Najprej je bil izdelan podroben simulacijski model proizvodne linije v programskem okolju AnyLogic[2]. Model je zajemal vse ključne proizvodne postaje, pravila obdelave palet in tok materiala. Za vsako postajo so bili zbrani in integrirani podatki iz sistema ERP in baze SQL ter izmerjeni manjkajoči podatki, kot so časi obdelave in poraba energije. Validacija modela je pokazala dobro ujemanje z realnim sistemom. Povprečna absolutna napaka je znašala $MAE = 4,6$ s, povprečna relativna napaka pa $MAPE = 4,7$ %. Pri energiji je bila relativna povprečna napaka $MAPE = 11,2$ % in absolutna napaka $MAE = 23,7$ Wh. Kljub višji relativni napaki je rezultat še vedno znotraj sprejemljivih meja za namene optimizacijskih eksperimentov.

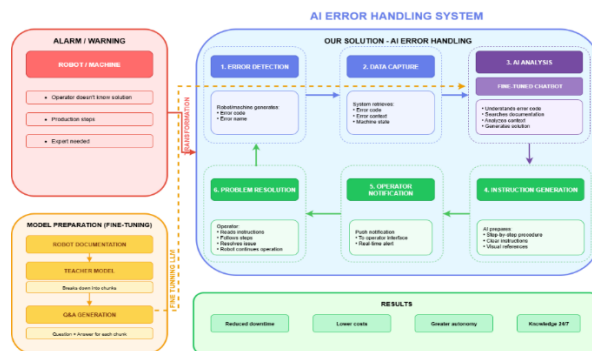
V optimizacijskem delu smo v okviru eksperimenta izvedli pet poskusov iskanja optimalnega razporeda za obdelavo sedmih palet. Rezultati so pokazali, da genetski algoritem omogoča bistveno skrajšanje makespana v primerjavi z izhodiščnim scenarijem, pri katerem je bil uporabljen vrstni red LIFO. Najboljša dosežena rešitev je znašala 1984,7 s, kar pomeni približno 10,8-% izboljšavo glede na izhodiščni scenarij (2227 s). Poleg tega smo opazili tudi izboljšave v energijski učinkovitosti. Poraba na skladiščni in montažni postaji se je zmanjšala za približno 11 % oziroma 20 %, pri CNC postaji pa je ostala enaka, a se je struktura porabe (delež med čakanjem in delovanjem) izboljšala.

V nadaljevanju smo digitalni dvojček Anylogic povezali še z zunanjim programom HeuristicLab za implementacijo kompleksnejših metavhevrstičnih algoritmov. S tem smo odpravili pomanjkljivosti vgrajenega genetskega algoritma v Anylogic-u pri iskanju globalnega optimuma, hkrati pa smo odprli možnost več kriterijske optimizacije proizvodnih naročil.

4 AI moduli

4.1 Napovedno vzdrževanje

V okviru napovednega vzdrževanja smo razvite modele integrirali v nadgrajeni digitalni dvojček v okolju AnyLogic, pri čemer je bila integracija izvedena preko standardiziranega formata ONNX. Podatki so bili zajeti z iCOMOX senzorji na kompresorju in vretenu CNC-stroja v laboratoriju LabTOP. Ker v obdobju meritev ni prišlo do dejanskih izpadov ali okvar strojev, zbrani podatki niso omogočali validacije klasičnega napovednega modela okvar, kljub temu da so bili modeli tehnično uspešno integrirani v AnyLogic[3]. Zaradi navedenih omejitev smo uporabili alternativni pristop, ki temelji na AI asistentu za podporo pri reševanju težav v proizvodnji. Ta pristop omogoča podporo operaterjem pri interpretaciji anomalij in alarmov ter podaja kontekstualna priporočila za ukrepanje, s čimer se zmanjšuje vpliv ne planiranih izpadov tudi v odsotnosti označenih podatkov o okvarah.



Slika 3: Diagram delovanja AI asistenta za odpravo napak

4.2 Nadzor kakovosti

V okviru nadzora kakovosti smo se naslonili na eksperimentalno študijo, ki je bila izvedena v laboratoriju LabTOP v sodelovanju s partnerji z IJS (oddelek E9. Na podlagi eksperimenta, ki je obravnaval dimenzijska odstopanja pravokotnih žepov na lesenem podstavku za slušalke, izdelanem iz brezove vezane plošče, je bil razvit napovedni model kakovosti, ki povezuje procesne parametre (hitrost pomika, globina reza, vrtilna hitrost vretena) z dimenzijskimi odstopanji izdelka. Zaradi omejenega števila realnih meritev so bili podatki sintetično razširjeni z uporabo programskega paketa SMOGN, kar je omogočilo učenje in primerjavo različnih modelov strojnega učenja. Kot najbolj ustrezen se je izkazal MLP regresor, pri katerem je bila izvedena tudi optimizacija hiperparametrov. Končni model nadzora kakovosti je bil s strani IJS izvožen v standardiziran format ONNX. V okolju AnyLogic je ONNX model integriran v nadgrajeni digitalni dvojček proizvodnega sistema. Digitalni dvojček na podlagi vhodnih procesnih parametrov pridobi napoved kakovosti izdelka, ki se nato upošteva pri odločanju o izvedbi delovnega naloga. Model omogoča oceno, ali je glede na izbrane parametre pričakovano dimenzijsko odstopanje znotraj dopustnih toleranc. Integracija modela v digitalni dvojček omogoča, da se rezultati nadzora kakovosti povežejo s prioriteto delovnih nalogov. Na ta način je mogoče prilagoditi izbiro proizvodnih parametrov glede na pomembnost naročila, zahtevano kakovost ali druge optimizacijske kriterije.

4.3 Optimizacija poraba energije

Reševanje problema optimizacije porabe energije smo razdelili na tri ločena, vendar medsebojno povezana področja, ki obravnavajo energijo na različnih nivojih proizvodnega sistema. Prvo področje se osredotoča na optimizacijo porabe energije celotnega objekta oziroma proizvodnega prostora z uporabo sistema za upravljanje z energijo (EMS) in baterijskega hranilnika. Drugo področje naslavlja optimizacijo porabe energije na nivoju proizvodne linije, z uporabo kontaktorjev ter pametnega vklopljanja in izklopljanja posameznih strojev. Tretje področje pa se nanaša na optimizacijo proizvodnje glede na energijsko porabo posameznega izdelka, ki so jo razvijali partnerji z Inštituta Jožef Stefan.

Področje 1: Optimizacija na nivoju celotnega objekta

V okviru prvega področja smo razvili celovit pristop, ki temelji na napovedovanju celotne porabe energije proizvodnje oziroma objekta za en dan vnaprej. Hkrati napovedujemo tudi proizvodnjo električne energije iz sončne elektrarne. Na podlagi teh vhodnih podatkov smo zasnovali optimizacijski model MILP (Mixed-Integer Linear Programming), katerega namen je optimizacija delovanja baterijskega hranilnika.

Model določa:

- kdaj se baterijski sistem polni in kdaj prazni,
- s kakšno močjo se baterija polni,
- s kakšno močjo se baterija prazni.

Pri optimizaciji se upošteva tudi dinamična cena električne energije na trgu, kar omogoča dodatno ekonomsko optimizacijo in prilagajanje delovanja baterijskega sistema glede na cenovne signale. Na ta način se doseže tako zmanjšanje stroškov energije kot tudi razbremenitev elektroenergetskega omrežja v konicah.

- *Področje 2: Optimizacija proizvodne linije*

Drugo področje optimizacije porabe energije, ki se nanaša na upravljanje delovanja posameznih strojev v proizvodni liniji, je predmet zaščite intelektualne lastnine, zato podrobnejši tehnični opis rešitve v tem poročilu ni mogoč.

- *Področje 3: Optimizacija proizvodnje glede na energijsko porabo izdelkov*

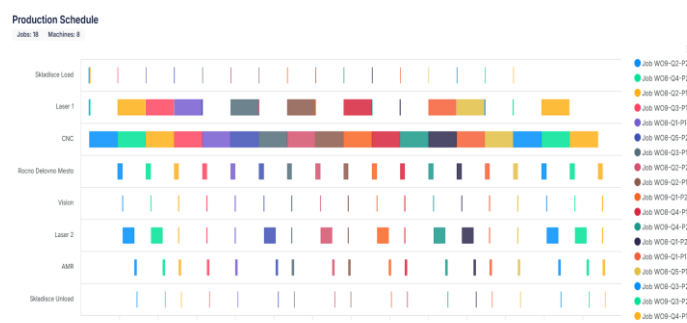
V okviru tretjega področja smo partnerjem z IJS posredovali energetske podatke iz proizvodne linije, kjer se je poraba energije posameznega stroja merila v časovnem intervalu treh sekund med obratovanjem proizvodnje. Namen tega sklopa je bil razvoj modela, ki bi omogočal boljše razumevanje in napovedovanje energijske porabe proizvodnje na nivoju izdelkov, ter s tem podlago za energetsko bolj učinkovito planiranje proizvodnje. Na podlagi analize dostavljenih podatkov je bilo ugotovljeno, da podatki niso primerni za razvoj klasičnih

napovednih modelov z uporabo strojnega učenja, saj je bilo za posamezne operacije na voljo premalo ponovitev, kar onemogoča zanesljivo učenje modelov, še posebej nevronske mreže. Kljub temu je bil razvit model, implementiran v obliki Python skripte, ki omogoča nadaljnjo uporabo v integriranem okolju. Model bo v projektni rešitvi uporabljen v obliki Python skripte, z možnostjo razširitve v REST API, kar omogoča enostavno integracijo v ostale programske module sistema.

Vsi razviti moduli za optimizacijo porabe energije bodo integrirani v skupni uporabniški vmesnik. Sistem bo povezan z MES sistemom, medtem ko bo AnyLogic uporabljen kot okolje za simulacijo in prilagajanje optimizacije planiranja proizvodnje glede na energijska priporočila. S tem je omogočeno celovito povezovanje energetskih in proizvodnih vidikov ter njihova uporaba pri podpori odločanju v realnem proizvodnem okolju.

4.4 Optimizacija planiranja proizvodnje

V programskem jeziku C# smo razvili genetski algoritem, pri katerem je stroškovna (cost) funkcija prilagojena konkretnemu proizvodnemu procesu. Pri tem smo ugotovili, da je za pravilno definicijo matematičnega modela, predvsem formule za izračun skupnega časa proizvodnje, nujno temeljito poznavanje proizvodnega sistema in njegovega delovanja. Na podlagi digitalnega dvojčka proizvodnje smo najprej identificirali ustrezen tip proizvodnega sistema, ki je bil v našem primeru »flow shop« [4]. Vhodne podatke za optimizacijo smo pridobili z analizo posameznih strojev, s katero smo določili čas trajanja posamezne operacije na posameznem stroju za vsak izdelek. Pridobljene časovne vrednosti smo shranili v podatkovno bazo in jih uporabili kot referenčne podatke v genetskem algoritmu. Kot testni primer smo obravnavali 15 enakih izdelkov, razporejenih v več delovnih nalogov. Na podlagi optimizacije smo pridobili Ganttov diagram, pri čemer so bili rezultati skladni s pričakovanji in potrjujejo pravilno delovanje razvitega algoritma. V primerjavi z diskretnim digitalnim dvojčkom, razvitim v orodju AnyLogic, je naša rešitev časovno in stroškovno učinkovitejša, saj ne zahteva uporabe drage licenčne programske opreme. Glavna omejitev razvitega pristopa je, da je potrebno vsako proizvodnjo natančno analizirati in stroškovno funkcijo prilagoditi njenim specifikacijam. Pri orodjih, kot je AnyLogic, je proces za uporabnika enostavnejši, saj zadošča grafični model proizvodnje, medtem ko optimizacija preko integriranega algoritma poteka samodejno, vendar uporabnik nima neposrednega vpogleda v uporabljen optimizacijsko logiko niti zagotovila, da je rešitev globalno optimalna glede na izbrane kriterije.



Slika 4: Primer razvrstitve delovnih nalogov

Bibliografija

- [1] „Understanding digital twins in manufacturing“, Visual Components. Pridobljeno: 19. februar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.visualcomponents.com/blog/understanding-digital-twins-in-manufacturing/>
- [2] L. Damiani, M. Demartini, P. Giribone, M. Maggiani, in R. Revetria, „Simulation and Digital Twin Based Design of a Production Line: A Case Study“, *Hong Kong*, 2018.
- [3] „Predictive maintenance of machines in LABtop production environment“, v *Slovenian Conference on Artificial Intelligence*, Jozef Stefan Institute, 2005.
- [4] M. Mansouri, Y. Bahmani, in H. Smadi, „Optimization of the Flow-Shop Scheduling Problem under Time Constraints with PSO Algorithm“, *Engineering Proceedings*, let. 56, št. 1, str. 220, 2023, doi: 10.3390/ASEC2023-15410.