

# Program

## Digitalna transformacija robotiziranih tovarnih prihodnosti

### DIGITOP

#### **Rezultat 9.3:**

Implementiran izboljšan digitalni dvojček

|                             |                                                        |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Projekt/RRP</b>          | DIGITOP/ RRP9, Aktivnost 9.3                           |
| <b>Vrsta dokumenta</b>      | Poročilo                                               |
| <b>Verzija dokumenta</b>    | 1.0                                                    |
| <b>Sodelujoči partnerji</b> | RUD, IJS-E1, ULFE-LR                                   |
| <b>Avtorji</b>              | Dr. Janez Povh, Vinko Longar, Rok Struna, Jasna Rihter |
| <b>Datum priprave</b>       | 2.3.2026                                               |

## Kazalo

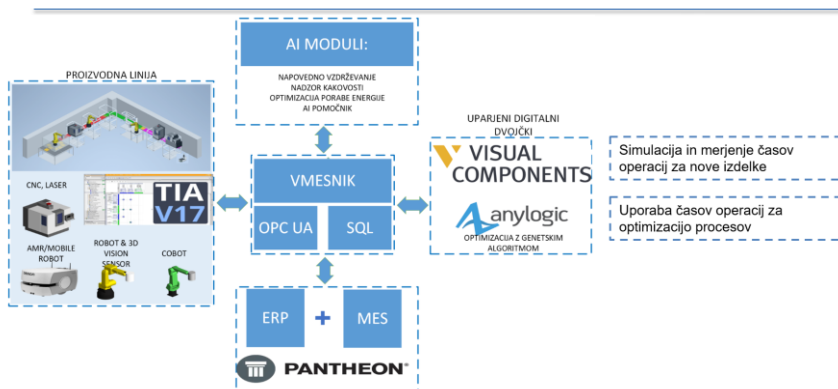
|          |                                                                            |          |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>UVOD .....</b>                                                          | <b>3</b> |
| <b>2</b> | <b>IZHODIŠČA IN PRENOS REŠITVE IZ LABORATORIJSKEGA OKOLJA LABTOP .....</b> | <b>4</b> |
| 2.1      | PRENOS ARHITEKTURE REZULTATA 5.5 V INDUSTRIJSKO OKOLJE.....                | 4        |
| 2.2      | PODATKOVNA INFRASTRUKTURA.....                                             | 4        |
| <b>3</b> | <b>IMPLEMENTACIJA IZBOLJŠANEGA DIGITALNEGA DVOJČKA V PODJETJU .....</b>    | <b>5</b> |
| 3.1      | PODATKOVNA SINHRONIZACIJA.....                                             | 5        |
| 3.2      | SIMULACIJSKO-MODELNI SLOJ .....                                            | 6        |
| 3.3      | OPTIMIZACIJSKI MODELI.....                                                 | 6        |
| 3.4      | INTEGRACIJA AI MODULOV .....                                               | 7        |
|          | <i>Napovedno vzdrževanje .....</i>                                         | <i>7</i> |
|          | <i>Optimizacija porabe energije .....</i>                                  | <i>7</i> |
| <b>4</b> | <b>TESTIRANJE IN VALIDACIJA SISTEMA .....</b>                              | <b>8</b> |
|          | <b>BIBLIOGRAFIJA .....</b>                                                 | <b>8</b> |

## 1 Uvod

Aktivnost 9.3 projekta DIGITOP predstavlja industrijsko implementacijo in validacijo rezultata 5.5 »Končana integracija digitalnih dvojčkov in AI modulov«, ki je bil razvit v okviru RRP5 v laboratorijskem okolju LabTOP [1]. V okviru rezultata 5.5 je bil vzpostavljen izboljššan digitalni dvojček z integriranimi moduli napovednega vzdrževanja, nadzora kakovosti, optimizacije porabe energije ter optimizacije planiranja proizvodnje. Medtem ko je bil v RRP5 poudarek na funkcionalni integraciji AI modulov in optimizacijskih algoritmov v simulacijsko okolje ter vzpostavitvi integracijskega vmesnika z MES/ERP sistemi, je aktivnost 9.3 usmerjena v prenos tega integriranega sistema v realno industrijsko okolje podjetja, njegovo prilagoditev specifičnemu proizvodnemu procesu ter validacijo delovanja na realnih podatkih. Izboljššan digitalni dvojček v okviru aktivnosti 9.3 predstavlja podatkovno podprt odločitveni sistem, ki združuje:

- sinhronizacijo proizvodnih podatkov,
- napovedne AI modele,
- večkriterijsko optimizacijsko jedro,
- povratno integracijo optimiziranih odločitev v MES sistem.

Cilj aktivnosti je bil vzpostaviti industrijsko validiran digitalni dvojček, ki omogoča podporo odločanju pri planiranju proizvodnje ter predstavlja osnovo za integracijo napovednih in energetskih modelov v enoten večkriterijski optimizacijski okvir.



Slika 1: Diagram komunikacije sistemov

## 2 Izhodišča in prenos rešitve iz laboratorijskega okolja labtop

### 2.1 Prenos arhitekture rezultata 5.5 v industrijsko okolje

V okviru 5.5 je bila vzpostavljena arhitektura izboljšanega digitalnega dvojčka, ki vključuje [2]:

- simulacijsko-modelni sloj,
- optimizacijsko jedro,
- AI module,
- integracijski vmesnik za komunikacijo z MES/ERP sistemi.

V aktivnosti 9.3 je bila ta arhitektura prenesena v realno proizvodno okolje podjetja Biostile. Ključni izziv ni bil razvoj novega modela, temveč prilagoditev obstoječega integriranega sistema specifični organizaciji proizvodnje, strukturi delovnih nalogov, ročnim operacijam ter obstoječi informacijski infrastrukturi.

### 2.2 Podatkovna infrastruktura

Za zagotovitev stabilnega delovanja digitalnega dvojčka je bila vzpostavljena naslednja arhitektura:

- MES+ERP sistem Pantheon,
- SQL podatkovna baza za centralizacijo podatkov,
- OPC UA komunikacijski sloj,
- simulacijsko-optimizacijski sloj implementiran v okolju AnyLogic.

AnyLogic v tej arhitekturi predstavlja izvajalni simulacijsko-analitični sloj, medtem ko optimizacijsko in napovedno jedro sistema izhaja iz razvoja v okviru rezultata 5.5. Delovni nalogi se avtomatsko zapisujejo iz sistema Pantheon v podatkovno bazo, digitalni dvojček pa na podlagi teh podatkov izvaja simulacijo in optimizacijo ter vrača optimiziran vrstni red izvajanja operacij nazaj v informacijski sistem.

### 3 Implementacija izboljšanega digitalnega dvojčka v podjetju

#### 3.1 Podatkovna sinhronizacija

Nadgradnja glede na laboratorijsko okolje je bila vzpostavitev neposredne sinhronizacije med realnim proizvodnim sistemom in digitalnim dvojčkom.

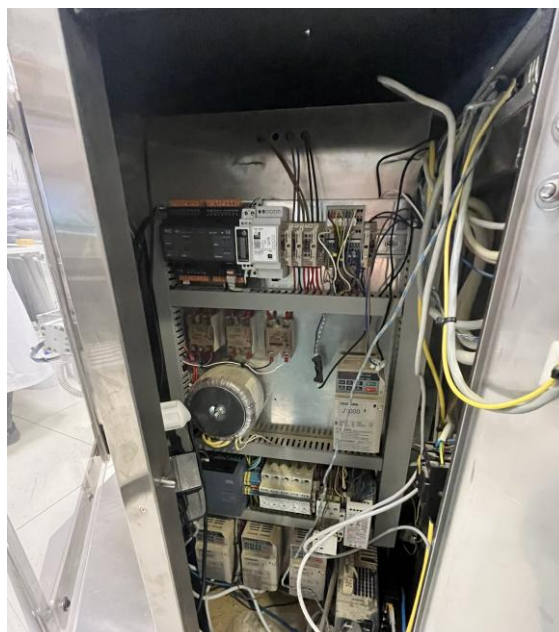
V podjetju sta bila nameščena dva energijska merilnika:

1. Merilnik s 15-sekundnim intervalom zajema podatkov za določanje statusa stroja (delovanje, mirovanje, izklop).
2. Merilnik z 200 ms intervalom zajema podatkov za podrobno spremljanje trenutne moči.

Podatki se preko OPC UA komunikacije zapisujejo v SQL bazo in so pomembni za:

- analizo obratovalnih vzorcev,
- razvoj napovednih modelov,
- energetske optimizacije proizvodnje.

Digitalni dvojček tako ni parametriziran ročno, temveč uporablja realne podatke o delovnih nalogih, časih operacij in statusih strojev



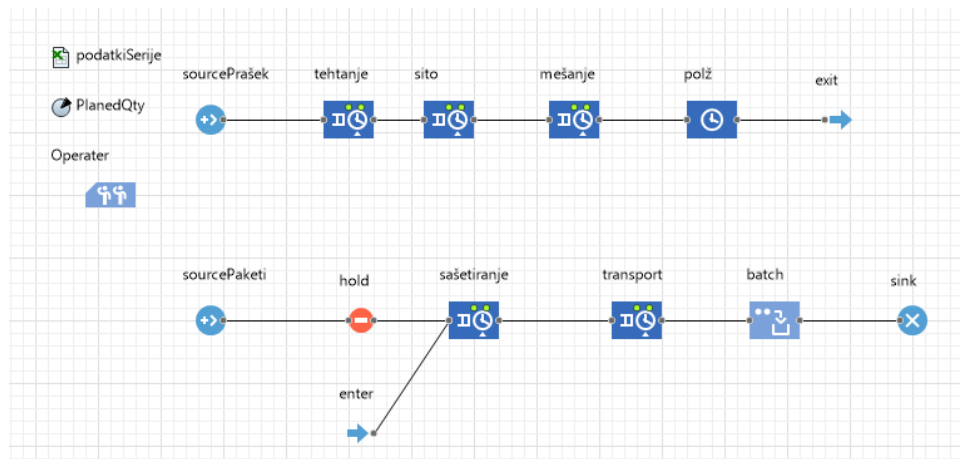
Slika 2: Implementiran merilec in OPCUA strežnik

### 3.2 Simulacijsko-modelni sloj

V okolju AnyLogic je bil implementiran procesni model proizvodne linije podjetja Biostile, ki vključuje:

- logiko zaporedja operacij (flow shop struktura),
- obravnavo več sočasnih delovnih nalogov,
- omejitve razpoložljivosti resursov,
- organizacijo dela v izmenah,
- čase priprave in čiščenja.

Model omogoča simulacijo različnih scenarijev planiranja ter predstavlja izvajalno okolje optimizacijskega algoritma. Eksperimentalna uporaba modela na realnih podatkih je pokazala 10-odstotno izboljšanje časa priprave in planiranja delovnih nalogov v primerjavi s predhodnim načinom planiranja. Analiza simulacijskih rezultatov je pokazala, da se ozko grlo proizvodnega procesa nahaja v operaciji kapsuliranje, kjer prihaja do največjih čakalnih časov in akumulacije delovnih nalogov. Optimizacijski model je z ustreznim razporejanjem delovnih nalogov ter zmanjševanjem nepotrebnih prekinitev zmanjšal vpliv tega ozkega grla na celoten makespan proizvodnje.



Slika 3: Anylogic shema podjetja Biostile

### 3.3 Optimizacijski modeli

Uporabljen je genetski algoritem, primeren za reševanje kompleksnega večkriterijskega flow shop problema z omejitvami [3]. Optimizacija upošteva:

- makespan proizvodnje,

- prioritete delovnih nalogov,
- čase priprave in čiščenja,
- organizacijo dela v izmenah.

Ciljna funkcija je zasnovana večkriterijsko, z možnostjo prilagajanja uteži posameznih kriterijev, kar omogoča usmerjanje optimizacije v časovno, stroškovno ali energetske učinkovito proizvodnjo. Posebnost implementacije v podjetju Biostile je, da večina operacij temelji na ročnem delu, zato optimizacija ne rešuje zgolj razporejanja strojev, temveč predvsem učinkovito organizacijo dela ob upoštevanju človeških resursov.

### **3.4 Integracija AI modulov**

#### *Napovedno vzdrževanje*

Model napovednega vzdrževanja, razvit v okviru rezultata 5.4, je bil v aktivnosti 9.3 nadgrajen z vključitvijo realnih alarmnih kod strojev ter časovne korelacije dogodkov.

Vzpostavljen je sistem zbiranja:

- podatkov iz prediktivnih senzorjev,
- alarmnih kod strojev,
- časovnih žigov dogodkov.

S tem je ustvarjena podatkovna osnova za validacijo modela ter njegova prihodnja vključitev v optimizacijsko logiko kot omejitveni faktor.

#### *Optimizacija porabe energije*

V demonstracijskem okolju je bil razvit model napovedi porabe energije, vendar zaradi omejene količine podatkov njegova uporabnost ni bila optimalna. V podjetju Biostile je sedaj vzpostavljena ustrezna infrastruktura za sistematično zbiranje energijskih podatkov. Trenutno poteka uskladitev z raziskovalno skupino IJS E9 glede:

- uporabe obstoječega modela,
- ali razvoja novega modela na osnovi linearnega programiranja, prilagojenega specifičnemu proizvodnemu procesu podjetja Biostile.

## 4 Testiranje in validacija sistema

Validacija implementiranega digitalnega dvojčka v podjetju Biostile poteka fazno in je usmerjena v preverjanje funkcionalnosti posameznih modulov sistema ter njihove integracije v enoten optimizacijski okvir. Izračun 10-odstotnega izboljšanja je temeljil na primerjavi časa, potrebnega za pripravo in razporeditev delovnih nalogov pred uvedbo digitalnega dvojčka, ter časa po uporabi optimiziranega razporeda. Del testnega obdobja je bil časovno zamaknjen zaradi infrastrukturnih izzivov na strani podjetja, predvsem pri vzpostavitvi OPC UA komunikacijskega strežnika. Za zagotovitev stabilne komunikacije in centralizacije podatkov je bila implementirana dodatna rešitev z uporabo krmilnika Siemens S7-1200, ki omogoča povezavo med stroji, energijskimi merilniki, prediktivnimi senzorji in OPC UA strežnikom. V naslednji fazi projekta je predvidena integracija napovednega vzdrževanja, ki bo temeljila na korelaciji med podatki prediktivnih senzorjev in alarmnimi kodami strojev, ter razvoj modela napovedi porabe energije, ki bo omogočal oceno stroška izdelka glede na tip izdelka, količino in energijski režim omrežja. Sistem je trenutno v fazi nadgradnje in razširjene validacije, s ciljem popolne integracije vseh analitičnih modulov v enoten večkriterijski optimizacijski model do zaključka projekta. Doslej doseženi rezultati potrjujejo tehnično izvedljivost in uporabnost koncepta digitalnega dvojčka. Implementacija je pokazala, da je mogoče tudi v pretežno ročnem flow shop proizvodnem okolju z ustrezno podatkovno infrastrukturo in optimizacijskim modelom doseči merljive izboljšave planiranja ter vzpostaviti platformo za podatkovno podprto odločanje v proizvodnji.

## Bibliografija

- [1] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, in A. Y. C. Nee, „Digital Twin in Industry: State-of-the-Art“, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, let. 15, št. 4, str. 2405–2415, apr. 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [2] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, in W. Sihn, „Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification“, *IFAC-PapersOnLine*, let. 51, št. 11, str. 1016–1022, jan. 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [3] N. Brahimi, S. Dauzere-Peres, N. M. Najid, in A. Nordli, „Single item lot sizing problems“, *European Journal of Operational Research*, let. 168, št. 1, str. 1–16, jan. 2006, doi: 10.1016/j.ejor.2004.01.054.