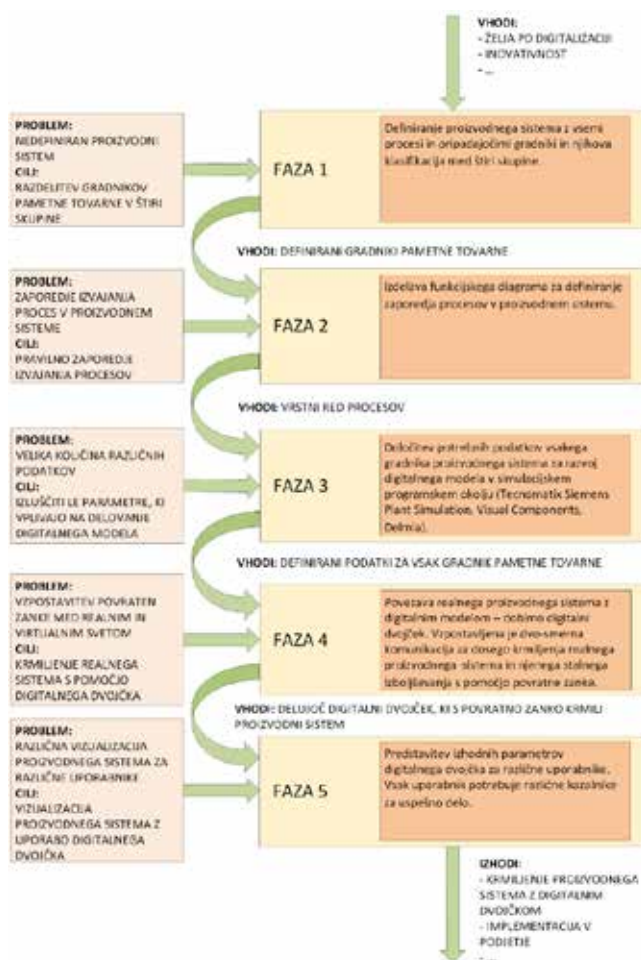


nje konkurenčnosti [2, 5]. Ena ključnih možnosti za izboljšanje konkurenčnosti je razvoj digitalnih modelov, ki omogočajo simulacijo »kaj-če« scenarijev [6, 7]. Predlagana metodologija [1] ponuja strukturiran pristop k snovanju digitalnega modela ne glede na način pridobivanja vhodnih podatkov bodisi samodejno bodisi ročno. Tako lahko podjetja načrtujejo digitalni model, digitalno senco ali digitalni dvojček.

Vzpostavitev digitalnega dvojčka v realnem času zahteva digitalizacijo fizičnega objekta z zajemom različnih podatkov in parametrov. Ti vključujejo inženirske parametre, ki opisujejo značilnosti proizvodnega sistema (npr. dimenzije, hitrost, moč motorja), ter obratovalne parametre, ki opredeljujejo značilnosti ustreznih proizvodnih procesov. Metodologija temelji na petstopenjskem pristopu, ki omogoča postopni razvoj digitalnega dvojčka. Prikazana metodologija (slika 1) jasno opisuje korake tega procesa, ki je primeren za podjetja ne glede na velikost ali industrijsko panogo.

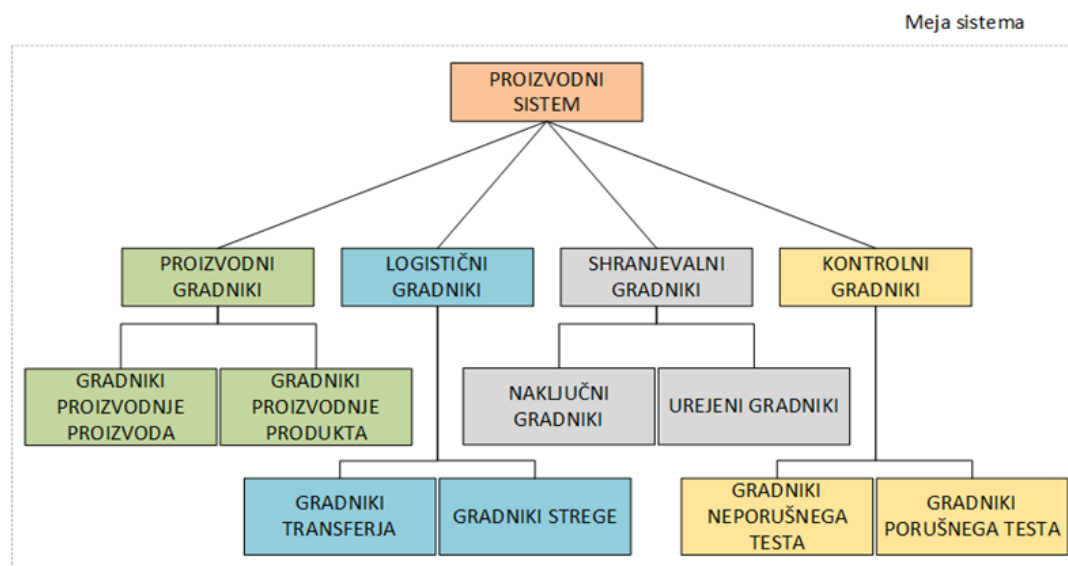
Ključna značilnost metodologije je njena prilagodljivost, saj omogoča prilagajanje specifičnim potrebam posameznih podjetij. V nasprotju z obstoječimi metodologijami, ki so pogosto prilagojene specifičnim industrijam ali tehnološkim zahtevam, ta pristop omogoča uporabo tako avtomatiziranih kot ročnih procesov zbiranja podatkov. Zaradi tega je dostopen tudi malim in srednje velikim podjetjem z omejenimi viri.

Poudarek metodologije je na povezovanju inženirskih in obratovalnih parametrov, kar zagotavlja celovito in natančno digitalno predstavitev fizičnega sistema v realnem času. Poleg tega omogoča izvedbo »kaj-če« scenarijev, ki podjetjem olajšajo prepoznavanje optimalnih rešitev in izboljšav v proizvodnih procesih. S tem se poveča učinkovitost, zmanjša tveganje napak in odprejo nove možnosti za uvajanje pametnih tehnologij v proizvodnjo.

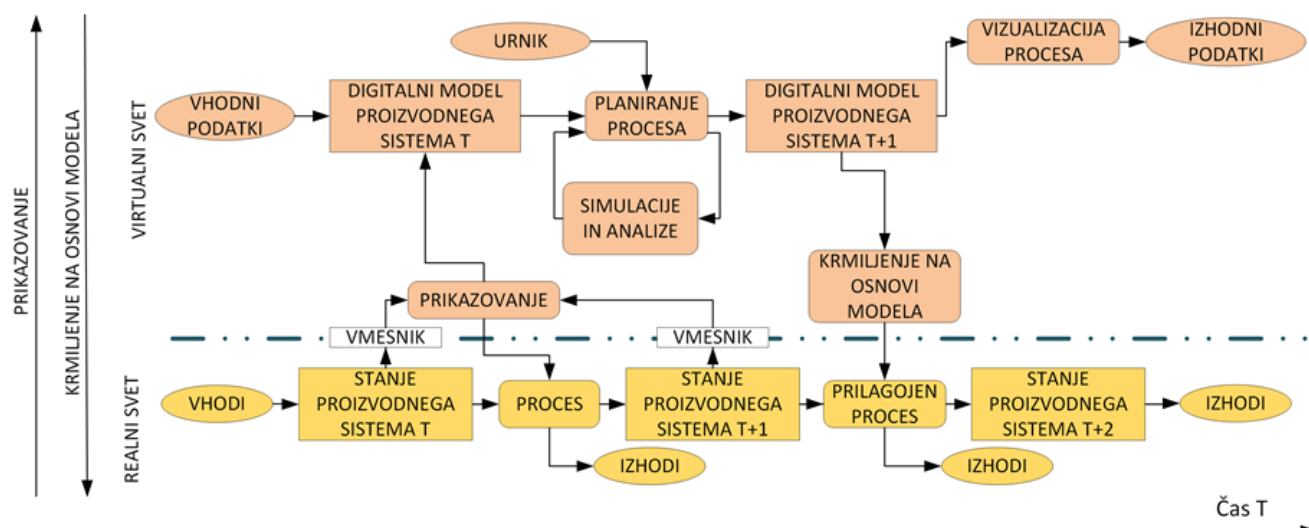


Slika 1 : Pet faz v metodologiji razvoja digitalnih dvojčkov [1]

Predlagana metodologija tako predstavlja univerzalen in sistematičen okvir, ki je primeren za vse vrste podjetij ter omogoča prehod v bolj prilagodljivo, digitalno podprto proizvodnjo.



Slika 2 : Razdelitev proizvodnega sistema na štiri podskupine [1]



Slika 5: Povezava med digitalnim modelom in realnim proizvodnim sistemom [1]

fizične lokacije, poti, skladišča, delovna mesta in stroje, kar omogoča realistično predstavitev prostorske razporeditve.

Uporabljeni simulacijski programi igrajo ključno vlogo pri načrtovanju simulacijskega modela. Nekateri programi nudijo vnaprej pripravljene vmesnike in gradnike, ki jih je mogoče hitro in enostavno prilagoditi specifičnim zahtevam sistema. Ti programi so še posebej uporabni za standardizirane procese, kjer so funkcionalnosti že optimizirane. V primerih, kjer standardni gradniki niso primerni, pa je potrebno dodatno programiranje ali prilagajanje modela, da se zajamejo vse posebnosti in nestandardni elementi proizvodnega procesa. Na koncu te faze se preveri funkcionalnost modela s testiranjem simulacije v različnih pogojih, da se zagotovi pravilnost delovanja in ustreznost vseh parametrov.

4. Faza: Interakcija s podatki v realnem času

Digitalni dvojček komunicira z realnim proizvodnim sistemom prek podatkov, zbranih s senzorji (slika 5). Ti podatki se analizirajo in simulirajo znotraj digitalnega modela ter ustvarjajo krmilna zaporedja, ki usmerjajo realni sistem. Povratna zanka omogoča neprekinjene prilagoditve, kar zagotavlja, da digitalni dvojček ostane popolna preslikava realnega sistema. Ta dinamični odnos vodi do stalnih izboljšav v učinkovitosti in delovanju.

5. Faza: Vizualizacija

Vizualizacija je zadnja faza v metodologiji razvoja digitalnih dvojčkov, ki različnim uporabnikom (operaterjem, razvijalcem, vzdrževalcem, kupcem, vodjem) omogoča dostop do relevantnih informacij iz digitalnega dvojčka. Vsak udeleženec vidi različne parametre glede na svoje potrebe – naj bo to kakovost in učinkovitost proizvodnje ali podrobne in-

formacije o proizvodni liniji in urnikih vzdrževanja. Vizualizacijska orodja, kot so Power BI, SIMATIC WinCC in Ignition SCADA, omogočajo vpogled v sistem v realnem času.

3 Zaključek

Digitalni dvojčki predstavljajo ključno tehnologijo v okviru industrije 4.0, saj omogočajo optimizacijo proizvodnih procesov, večjo prilagodljivost ter učinkovito odzivanje na spremembe v industrijskem okolju. Predlagana petstopenjska metodologija ponuja strukturiran in univerzalen pristop k razvoju ter implementaciji digitalnih dvojčkov, kar omogoča podjetjem vseh velikosti učinkovito preoblikovanje njihovih tradicionalnih proizvodnih sistemov v pametne tovarne.

S postopnim razvojem digitalnega dvojčka – od razvrstitve sistemov, zasnove funkcijskega diagrama, razvoja digitalnega modela, interakcije z realnočasovnimi podatki do vizualizacije – lahko podjetja pridobijo celovito razumevanje svojih procesov, kar vodi v izboljšanje konkurenčnosti, zmanjšanje stroškov ter trajnostno delovanje.

Integracija digitalnih dvojčkov ne le da odpira možnosti za napredno simulacijo in analizo, temveč tudi podpira bolj informirano odločanje na vseh ravneh proizvodnje. Vizualizacija v realnem času omogoča prilagoditev različnim uporabnikom, kar dodatno krepi učinkovitost in preglednost sistema. Predlagana metodologija tako ponuja robustno orodje za prilagajanje sodobnim izzivom industrije ter vzpostavlja temelje za prihodnje inovacije v pametnih tovarnah.

Predlagano metodologijo smo že uspešno uporabili pri razvoju digitalnih dvojčkov med drugimi tudi za

Adria Dom d. o. o. ter IMP Armature d. o. o., kjer smo izboljšali učinkovitost in prilagodljivost proizvodnih procesov. Prav tako je bila uporabljena v demonstracijskem centru pametna tovarna, ki omogoča prikaz koristi in prenos znanja o uporabi digitalnih dvojčkov za širšo industrijo. Ti primeri potrjujejo praktičnost in učinkovitost metodologije.

Viri

- [1] M. Resman, J. Protner, M. Šimic in N. Heraković: A Five-Step Approach to Planning Data-Driven Digital Twins for Discrete Manufacturing Systems. *Applied Sciences* 11 (8) (2021), str. 3639.
- [2] J. L. Diaz, C. Ocampo-Martinez. Energy efficiency in discrete-manufacturing systems: Insight, trends, and control strategies. *Journal of manufacturing systems* 52 (2019), str 131-145.
- [3] F. Tao, Q. Qi, A. Liu, A. Kusiak: Data-driven smart manufacturing. *Journal of manufacturing systems*, 48 (2018), str 157-169.
- [4] J. Protner, M. Pipan, H. Zupan, M. Resman, M. Šimic in N. Heraković: Edge Computing and Digital Twin Based Smart Manufacturing. *IF-AC-PapersOnLine* 54(1) (2021) str. 831-836.
- [5] Komoto, H., Masui, K. Model-based design and simulation of smart factory from usage and functional aspect: *CIRP Ann Manuf Technol* 67(1) (2017), str 133-136.
- [6] M. Debevec, M. Šimic, V. Jovanović, N Heraković: Virtual factory as a useful tool for improving production processes. *Journal of manufacturing systems*. 57 (2020), str. 379-389.
- [7] M. Debevec, M. Šimic, N. Heraković: Virtual factory as an advanced approach for production process optimization. *International journal of simulation modelling*. 13(1) (2014), str. 66-78.

Methodology for development of digital twins in smart factories

Abstract:

Digital twins are emerging as a cornerstone technology in the framework of Industry 4.0, providing a transformative means to optimize manufacturing processes, enhance flexibility, and respond effectively to the dynamic changes in industrial environments. These virtual replicas of physical systems enable organizations to transition from traditional manufacturing paradigms to smart factories, leveraging data-driven insights and real-time operational capabilities.

The proposed five-step methodology offers a structured and universal approach to the development and implementation of digital twins, suitable for businesses of all sizes. This methodology facilitates the systematic transformation of production systems and ensures their alignment with the demands of modern, intelligent manufacturing. The steps include:

1. System Classification: Identifying and categorizing the elements within the manufacturing system that will form the foundation of the digital twin.
2. Functional Diagram Design: Developing a conceptual framework that outlines the functionality and interactions within the system.
3. Digital Model Development: Creating a detailed digital representation of the system, capturing its structure, behavior, and operational dynamics.
4. Integration of Real-Time Data: Enabling dynamic interaction between the digital twin and live operational data to ensure accuracy and relevance.
5. Visualization and Interaction: Providing real-time visualization tools tailored to the needs of various stakeholders, enhancing usability, transparency, and decision-making efficiency.

By following these stages, companies can achieve a comprehensive understanding of their processes, leading to significant improvements in competitiveness, cost reduction, and sustainability. The integration of digital twins facilitates advanced simulation and analysis, supporting informed decision-making at all levels of production. Furthermore, real-time visualization capabilities allow the system to adapt to diverse user requirements, thereby boosting operational efficiency and system transparency.

This methodology not only addresses the contemporary challenges of the industrial sector but also lays a robust foundation for future innovation within smart factories. As a tool for digital transformation, it underscores the pivotal role of digital twins in advancing manufacturing systems, ensuring their alignment with the evolving landscape of Industry 4.0.

Keywords:

methodology, agile factories, smart factories, green transformation, energy efficiency, social responsibility

Acknowledgments

The work was financially supported in the framework of the Slovenian Research and Innovation Agency - ARIS, Research Programme P2-0248 - Innovative manufacturing systems and processes, research project J2-4470 - Research on the reliability and efficiency of edge computing in a smart factory using 5G technologies. The work was funded by the European Union, project 101087348 - Strengthening the capacity for excellence of Slovenian and Croatian innovation ecosystems to support the digital and green transitions of maritime regions and project 101058693 - Sustainable Transition to the Agile and Green Enterprise (STAGE Project).

Zahvala za sofinanciranje

Delo je bilo finančno podprto v okviru Javne agencije za raziskovalno in inovacijsko dejavnost RS - ARIS, Raziskovalni program P2-0248 - Inovativni proizvodni sistemi in procesi, raziskovalni projekt J2-4470 - Raziskave zanesljivosti in učinkovitosti robnega računalništva v pametni tovarni z uporabo 5G-tehnologije. Delo je financirala Evropska unija, projekt 101087348 - Krepitev zmogljivosti za odličnost slovenskih in hrvaških inovacijskih ekosistemov za podporo digitalnemu in zelenemu prehodu pomorskih regij ter projekt 101058693 - Trajnostni prehod v agilno in zeleno podjetje (STAGE Project).

 Celjski sejem

Mednarodni industrijski sejem

8.-11. APRIL 2025

