

## Distribuirani proizvodni sistemi z digitalnimi dvojčki

Niko Herakovič\* – Hugo Zupan – Miha Pipan – Jernej Protner – Marko Šimic  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Slovenija

Prispevek predstavlja nov pristop integracije izboljšane strukture proizvodnih vozlišč, ki so vključeni kot inteligentni distribuirani podsistemi v proizvodnih procesih sestavljeni iz kombinacije naprednih tehnologij digitalnih dvojčkov, holonov in digitalnih agentov. Enega od pomembnejših raziskovalnih rezultatov predstavlja nova arhitektura proizvodnih vozlišč za ponazoritev celotnega distribuiranega proizvodnega omrežja.

Današnja proizvodnja mora zagotavljati hitro in učinkovito prilagajanje trenutnim zahtevam naročnikom, to je veliki variantnosti izdelkov. Trenutne informacijske tehnologije, kot so internet stvari, podatkovne baze in umetna inteligenca zagotavljajo dobro povezljivost in komunikacijo med distribuiranimi kibernetko-fizičnimi sistemi (KFS) za izvajanje kontrole in krmiljenja procesov in so sposobni reševati probleme in sprejemati odločitve. Na podlagi obstoječe literature in raziskav je razvidno, da glavni problem predstavlja prenos velike količine podatkov iz glavne podatkovne baze do podsistemov in nazaj, za učinkovito spremljanje in krmiljenje proizvodnje.

Metodologija raziskovanja je zato osredotočena na učinkovito povezljivost distribuiranih sistemov, digitalne dvojčke sposobne upravljanja logističnih procesov in materialnega toka ter na kontrolo in sprejemanje odločitev na globalnem in lokalnem nivoju. Podrobneje je predstavljena struktura sodobnih distribuiranih sistemov, katerim dodamo digitalne dvojčke in inteligentne digitalne agente. Takšni sistemi so sposobni povezovanja z drugimi sistemi/agenti, zaznavanja okolice, učenja, odločanja, nadziranja in vodenja. Predstavljena je nova arhitekturna mreža distribuiranih sistemov, ki določa prenos le pomembnih informacij med posameznimi podsistemi in njihovimi lokalnimi podatkovnimi bazami, kar močno izboljša zanesljivost in hitrost pretoka informacij.

Eksperimentalni sistem je sestavljen iz transportne linije, dveh robotskih celic, skladišča, šestih delovnih mest in enega pametnega ročnega delovnega mesta. Distribuirano kontrolno strukturo sestavlja devet vozlišč. Osem vozlišč vključuje digitalne agente, holone in lokalne digitalne dvojčke (sedem delovnih mest in skladišče), deveto vozlišče (imenovano vozlišče 0) pa sestoji iz digitalnih agentov, holona in globalnega digitalnega dvojčka. Vozlišča so medsebojno povezana, kadar je to potrebno, razen v primeru vozlišča 0, ki je povezano z vsemi ostalimi vozlišči. Testiranje realnega sistema in digitalnega dvojčka je potekalo v dveh fazah. Prva faza predstavlja simulacijo izvedbe proizvodnega plana za dva produkta (P1 in P2) v digitalnem dvojčku, kjer smo beležili simulacijske čase vhoda in izhoda transportne palete na posameznem proizvodnem vozlišču. Druga faza predstavlja zagon fizičnega sistema z distribuiranimi enotami in beleženje časov prihoda in odhoda palete z izdelkom na proizvodnem vozlišču. Čase pridobljene z digitalnim dvojčkom smo primerjali z izmerjenimi časi realnega distribuiranega sistema. Rezultati časovne analize so pokazali, da povprečen odstopok med rezultati simulacije in realnega sistema znaša 3,90 sekunde za izdelek P1 in 6,71 sekunde za izdelek P2. Skupni proizvodni čas znaša 8 minut in 54 sekund za izdelek P1 in 8 minut in 12 sekund za izdelek P2. Izračunan korelacijski koeficient za izdelek P1 znaša 0,9979 in 0,8748 za izdelek P2, iz česar lahko sklepamo na 98 % točen popis realnega distribuiranega sistema z digitalnim dvojčkom.

**Ključne besede:** pametne tovarne, distribuirani sistemi, vozlišča, holoni, izmenjava podatkov, digitalni dvojčki, digitalni agenti