



Бабић, Б., Вишић, Ј., Ђермановић, А.<sup>1)</sup>

## ДИГИТАЛНИ БЛИЗАНЦИ У ПАМЕТНОЈ ПРОИЗВОДЊИ И ИНДУСТРИЈИ 4.0<sup>2)</sup>

### Резиме

Дигитални близанац представља дигиталну реплика физичких података, процеса, система и дигиталну симулација стварности, која може бити коришћена у различите сврхе. Концепт дигиталног близанца пружа ефикасан начин за сајбер-физичку интеграцију производње и оптимизацију пословних процеса и оперативних процедура производње чиме се постиже нови виши ниво продуктивности. Дигитални близанци могу да користе податке са сензора инсталираних на физичким објектима за представљање њиховог стања у стварном времену, радног стања или положаја. У раду су приказана два примера развоја дигиталног близанца, први заснован на статичкој поставци модела и други заснован на динамичкој поставци.

Кључне речи: Дигитални близанац, Индустрија 4.0, Компјутерска симулација, Паметна производња.

### 1. УВОД

Многе земље су објавиле своје националне напредне стратегије развоја производње као што је Индустрија 4.0 које су засноване на широј примени информационих технологија нове генерације (*New IT*) у производњи. Један од заједничких циљева примене ових стратегија је за постизање паметне производње, која захтева интероперабилност, интеграцију и фузију физичког света и сајбер света производње [1].

Дигитални близанац пружа ефикасан начин за сајбер-физичку интеграцију производње. Са друге стране, паметни производни сервиси могли би да оптимизују целокупне пословне процесе и оперативни поступак производње, да би се постигао нови, виши ниво продуктивности. Комбинација паметних производних услуга и дигиталних близанца ће радикално променити пројектовање производа, производњу, експлоатацију и друге процесе. Концепт дигиталног близанца ће омогућити ефектније планирање производње и прецизно управљање производњом у циљу постизања паметне производње, кроз двосмерну повезаност између виртуелног и физичког света производње [2].

Количина података прикупљених праћењем паметне фабрике је огромна, али ако ти подаци нису обједињени и организовани на начин који може подржати процес доношења одлука, онда од њих нема користи. Један од метода који се показао као непроцењив за инжењерске и корисничке тимове који желе да искористе прикупљене податке је дигитални близанац.

### 2. ДИГИТАЛНИ БЛИЗАНЦИ У ИНДУСТРИЈИ

Као што су индустријске револуције представљале значајне прекретница у историји човечанства, дигитални близанац и индустријски IoT (*Internet of Things* – Интернет ствари) представљају значајне промене у производњи.

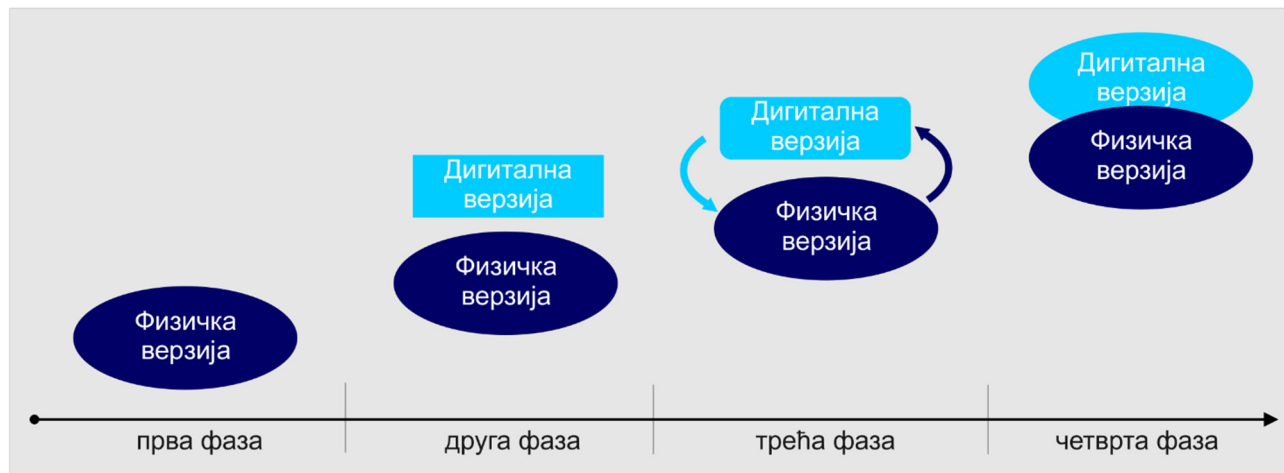
На слици 1 приказане су четири фазе еволуције дигиталног близанца [3]:

- Прва фаза - Читав производни процес постоји само у физичкој верзији.

<sup>1)</sup> Проф. др Бојан Бабић, ([bbabic@mas.bg.ac.rs](mailto:bbabic@mas.bg.ac.rs)), Јанко Вишић, студент ([jvisic1996@gmail.com](mailto:jvisic1996@gmail.com)), Александар Ђермановић, студент ([adjetmanovic96@gmail.com](mailto:adjetmanovic96@gmail.com)) Универзитет у Београду, Машински факултет

<sup>2)</sup> У оквиру рада се саопштавају резултати истраживања спроведених уз подршку Фонда за науку Републике Србије, #6523109, ВИ - MISSION 4.0 и Министарства за науку за просвету, науку и технолошки развој, Пројекат Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства – Дубоко машинско учење интелигентних технолошких система у производном машинству.

- Друга фаза - Додата је дигитална верзија која физичкој верзији обезбеђује додатне информације.
- Трећа фаза - Започиње интеракција између физичке и дигиталне верзије.
- Четврта фаза - Постоји даља интеракција и конвергенција између физичке и дигиталне верзије.



Слика 1. Четири фазе еволуције дигиталног близанца [3]

Дигитални близанци омогућавају нам:

- Вредновање производних одлуке на основу аналитике
- Пуштање у рад машина из удаљених сервисних центара, чиме се смањују трошкови услуге
- Повезивање одвојених система / процеса за побољшано праћење и надгледање
- Решавање проблема са опремом на удаљеним локацијама како би се смањило време решавања отказа
- Стицање контроле над сложеним процесима и системима

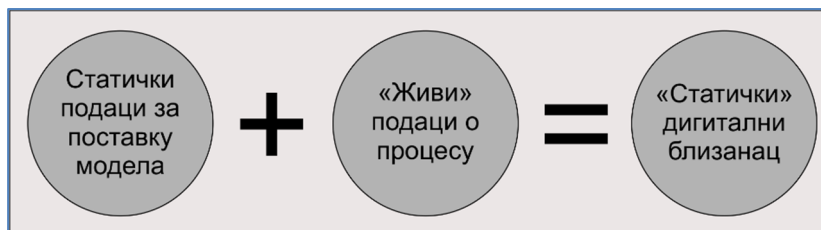
Утицај технологије дигиталних близанаца може се сврстати у три главне области:

- Развој нових производа – анализа понашања постојећих производа при примени у реалном окружењу може да представља добру основу за развој нових производа. Перформансе при експлоатацији огледају се у близанцу и користе се у развој производа и процес производње
- Производња – дигитални близанци подижу ефикасност предвиђањем отказа у производњи, тако да се они могу благовремено отклонити и на тај начин се минимизира утицај отказа на циљеве производње. Такође се могу симулирати побољшања кроз подешавање параметара дуж производне линије у близанцу без ризика да дође до поремећаја производње. Успешне симулације се тада могу применити на систем стварног живота. Поред тога, пројектантски тимови могу анализирати дигиталне близанце производа како би упоредили стварно понашање производа са пројектованим.
- Експлоатација производа – Пројектантски тимови могу да анализирају дигиталне близанце производа како би упоредили понашање производа при експлоатацији са пројектованим. Такође, дигитални близанци омогућавају даљинско пуштање у рад и дијагностику производа који су већ на терену - смањујући трошкове услуге и побољшавајући задовољство купаца.

### 3. РАЗВОЈ ДИГИТАЛНИХ БЛИЗАНАЦА У ПРОГРАМСКОМ ОКРУЖЕЊУ ANYLOGIC

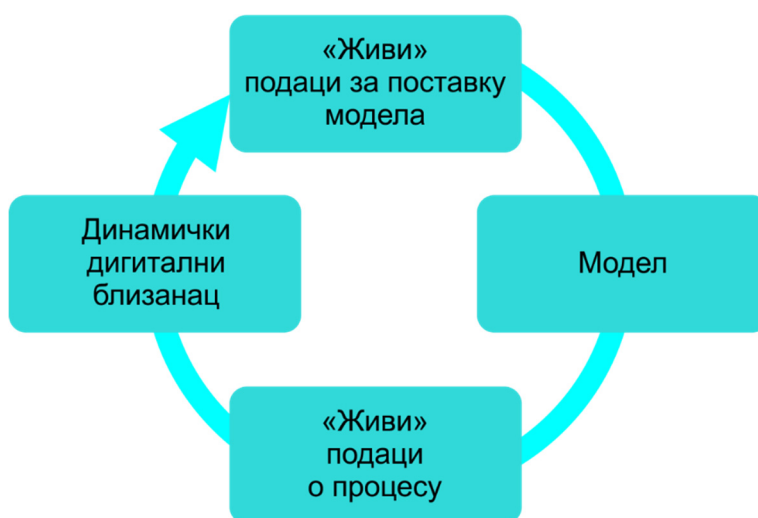
*AnyLogic* [4] је софтверски пакет за симулацију који подржава све различите методе моделирања. У оквиру овог софтверског пакета, пројектант може изабрати методу и ниво апстракције који најбоље описује проблематику стварног система при чему ће на тај начин обухватити сложеност производње, људских ресурса и њихове интеракције, пословних процеса итд.

Уобичајен приступ је развој статичких модела који представља „снимак“ реалности. Постоји статичка информација о распореду опреме унутар система, начина њихове интеракције и моделирање се врши кроз слагање блокова симулационог софтвера („*Drag and Drop*“). Затим се додају „живи“ подаци тј. променљиви подаци, нпр. број делова који улази у систем, времена обраде, поузданост машина, итд. На овај начин се добија „статички“ дигитални близанац (слика 2).



Слика 2. „Снимак“ реалности - „статички“ дигитални близанац

Друга варијанта је када су подаци за поставку модела променљиве („живи подаци“). Дакле, подаци о броју машина, њиховој позицији, њиховим интеракцијама, итд. су променљиви и користе се за аутоматско креирање модела. Модел се само-конфигурише на основу података. Затим се у модел уносе „живи“ подаци о процесу (број делова, редослед обраде, времена обраде, итд.) и на тај начин се долази до динамичког дигиталног близанца (слика 3). У наставку рада се дају примери развоја и статичког и динамичког дигиталног близанца.

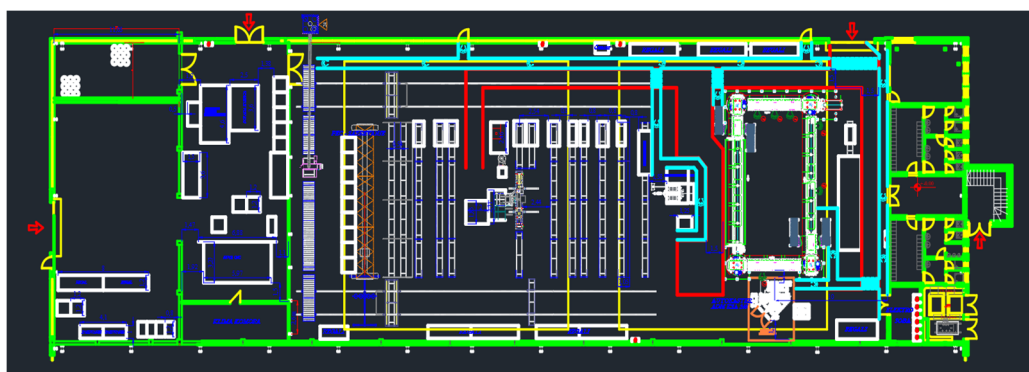


Слика 3. „Динамички“ дигитални близанац

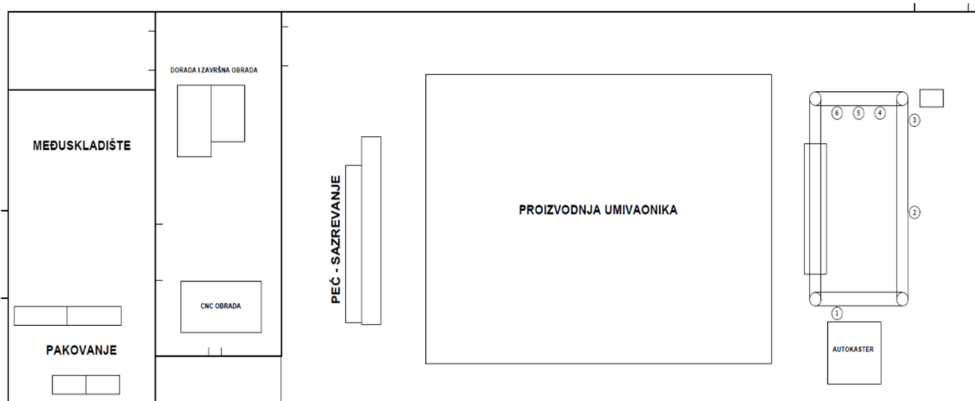
## 2.1 Симулација рада погона ливених полимера у компанији „Металац Инко“

Пример развоја „статичког“ дигиталног близанца је компјутерска симулација производње и тока материјала у оквиру погона ливених полимера компаније „Металац Инко“. На основу вишедневног мониторинга процеса и праћења производње унутар производних капацитета за израду кварцних судопера у погону у Горњем Милановцу прикупљени су статички подаци за поставку модела и подаци о процесу [5].

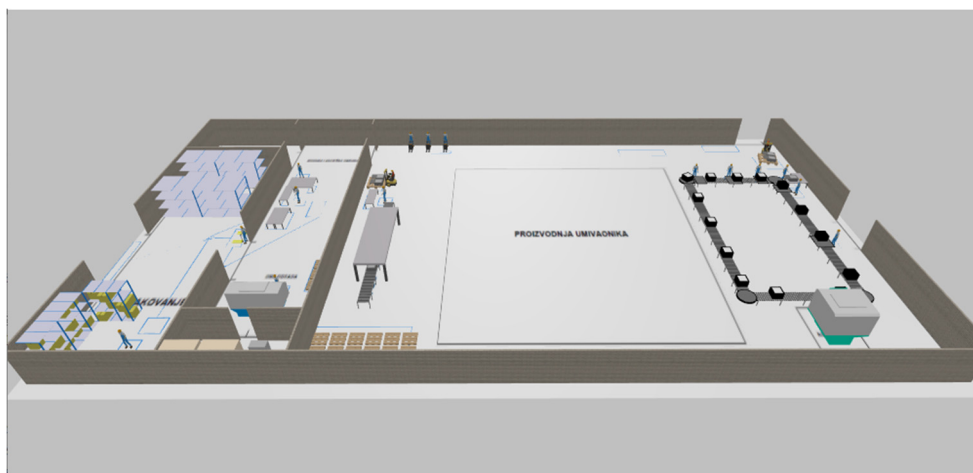
На слици 4 је приказан полазни 2D цртеж погона на основу којег је направљена одговарајућа подлога за креирање 3D приказа у AnyLogic симулационом окружењу. (Слике 5 и 6).



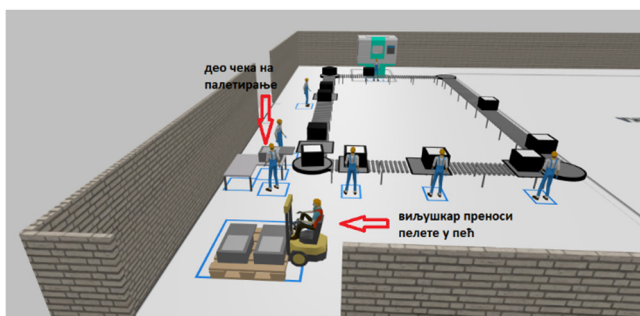
Слика 4. Детаљни AutoCad цртеж погона ливених полимера



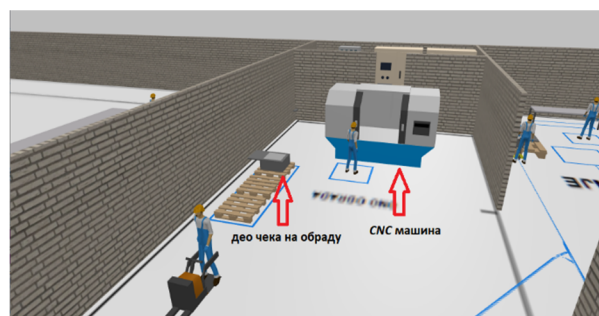
Слика 5. Подлога за графички едитор AnyLogic - а



Слика 6. 3D приказ погона у AnyLogic – у



а)



б)



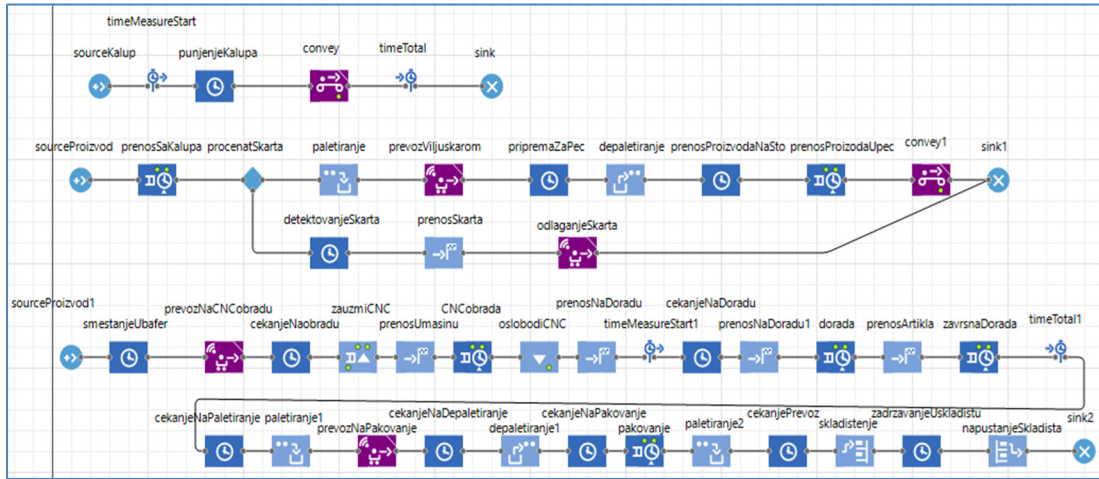
в)



г)

Слика 7. Примери технолошких операција у производњи судопера: а) палетирање, б) CNC обрада, в) ручна дорада, г) палетирање готових производа и припрема за транспорт.

Производне операције било је неопходно превести и моделирати на прави начин у оквиру софтвера *Anylogic*. Већ је наглашено да је симулација осмишљена и детерминисана као статички модел при чему је логика процеса изграђена на помоћу блокова из *Anylogic* библиотеке за моделирање процеса и библиотеке за моделирање система за руковање материјалом. На слици 7 су приказани неке од операција у технолошком процесу производње судопера. Логичка шема симулационог модела сачињена од *Anylogic* блокова из наведених библиотека је приказана на слици 8.



Слика 8. Логичка шема симулационог модела

Променљиви подаци – параметри технолошког процеса се варирају током симулације помоћу „клизача“ приказаних на слици 9. Слика 10 приказује анимирани 3D приказ током симулације.



Слика 9. Клизачи за промену параметара процеса

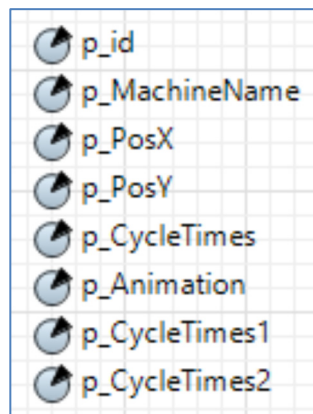


Слика 10. Анимирани 3D приказ током симулације

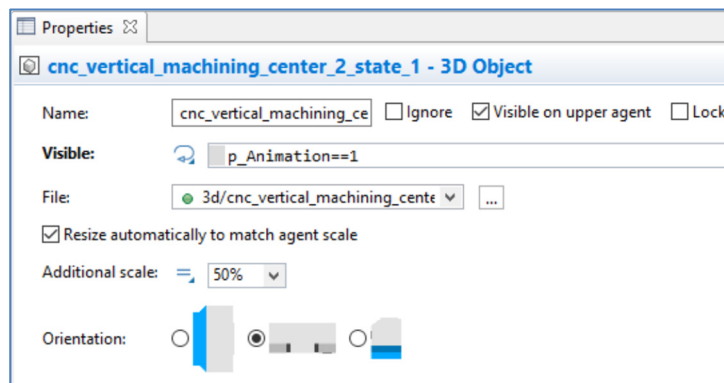
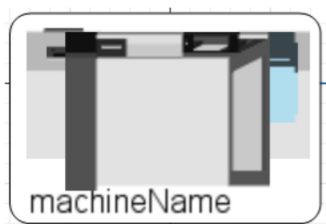
## 2.1 Развој динамичког дигиталног близанца

Као и при креирању статичког дигиталног близанца и при развоју динамичког модела полази се од диспозиционог плана и креирања његове дигиталне реплике. Следећи корак је креирање агената и њиховог понашања, тачније логике модела. Креће се од креирања машина алатки, затим конвејера и на крају транспортера и то све динамички. Још једном, разлика између статичких и динамичких симулационих модела је у томе што се код динамичких модела не користе неке уграђене опције софтвера, већ се сваки агент креира програмски, како би се задржала потпуна контрола над њим, док се код статичких модела агенти једноставно превлаче на радни простор (“*Drag and Drop*”) и у њиховим постојећим интерфејсима подешавају карактеристике. Поред динамичког креирања агената, такође се и неки параметри, попут времена трајања обраде, позивају из екстерне базе података [6].

На пример при динамичком креирању машина алатки у првом кораку се дефинише база података (*db\_machines*), у овом случају унутар софтвера. Сврха ове базе података јесте да се помоћу ње дефинишу неки основни параметри везани за машине у погону. Следећи корак јесте креирање агента Машина (*Machine*) и празне популације машина (*pop\_machines*), која ће се при иницијализацији модела попунити машинама из базе података. Да би креирани агент Машина био повезан са базом, најпре је унутар агента потребно креирати параметре, чији типови одговарају типовима података из табеле, слика 11. Да би новонастали агент био видљив током симулације, потребно му је додати и анимацију. У оквиру софтвера *AnyLogic* налази се и картица са тродимензионалним објектима, где се између осталог налазе и машине алатке, слика 12 [6].

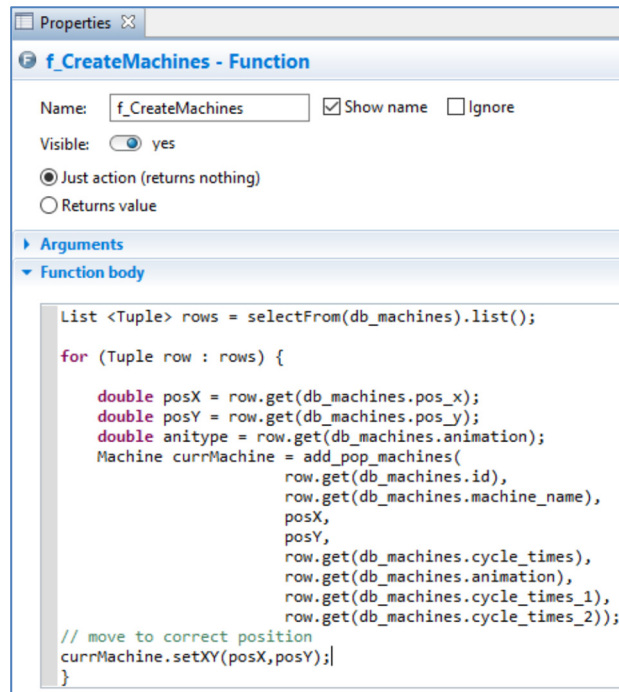


Слика 11. Параметри агента машина



Слика 12. Динамичко подешавање видљивости анимација агента Машина

Да би популација машина била видљива током анимације, потребно је креирати функцију која ће претраживати базу података и из ње преузимати информације. На слици 13 приказана је функција са кодом који извршава следећу радњу: претражује базу података од првог до последњег реда, где за сваки ред креира две променљиве које узимају вредност из колона које означавају позицију машина у простору. Потом сваку од вредности из свих колона додаје популацији машина и на крају тренутној машини додељује позицију на основу креираних променљивих.



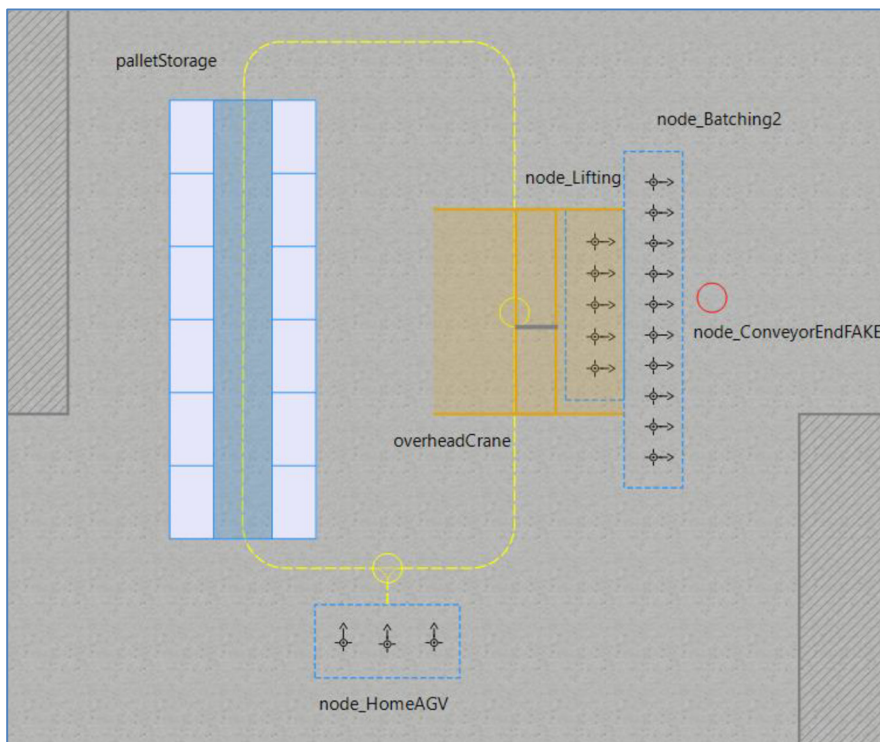
Слика 13. Функција за креирање машина

Наредни корак представља креирање агента производа (*Product*) и агента који представља производе сложене на палету (*Batch*), као и њихових популација (*pop\_products* и *pop\_batches*). Следи креирање окружења око машина (програмско креирање просторних елемената у моделу). У моделу је потребно креирати „места“ која ће симулирати реалне позиције око машине, попут зоне за долазак делова, зоне за привремено складиштење готових делова, као и места на којем ће се вршити симулација обраде. При типичном креирању симулационих модела у овом софтверу, све позиције и путање се креирају једноставним цртањем. На тај начин, сваки од елемената аутоматски припада мрежи просторних елемената која је по својој природи статичка и у њу се не могу додавати динамички елементи. Из потребе задржавања што веће контроле над моделом и мрежа елемената је креирана програмски. Затим се динамички креира транспортни систем (конвејери и аутоматски вођена колица).

У моделу постоје и неке статичке компоненте модела кажемо да су статичке, креиране коришћењем постојећих блокова. Свака компонента коју је могуће користити у оквиру симулације има уграђени кориснички интерфејс са интуитивним упитима, које пројектант попуњава у складу са својим захтевима. Предност оваквих симулација је у томе што захтевају знатно мање времена за развијање, а такође не захтевају опширно познавања пре свега Јава софтверског језика, на којем је софтвер базиран. Мана оваквих симулационих модела јесте низак ниво флексибилности, пре свега када се говори о потребама брзих и једноставних измена у моделу, што је једна од одлика правих дигиталних близанаца. У овом моделу статички су одрађени елементи чије би креирање динамичким путем представљало редувантан посао, који је притом прилично компликован. За њихово креирање потребно је користити неке од функција за које је експлицитно наведено да не би требале да се позивају од стране корисника. На слици 14 приказан је део погона и његове статичке компоненте. У овом делу погона одвија се део процеса везан за поновно палетирање производа који силазе са транспортне траке и њиховог транспорта у регално складиште.

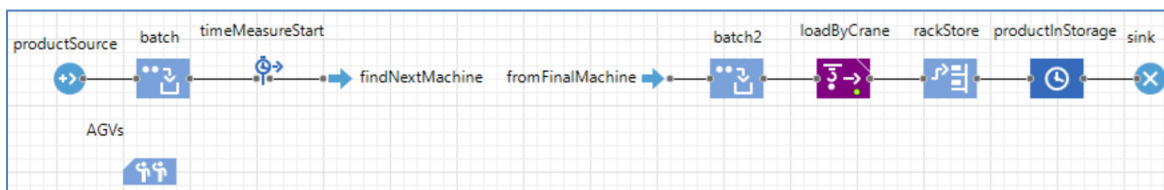
Основу сваког модела заснованог на дискретним догађајима чини процесни дијаграм. Реалан производни процес представља се низом међусобно повезаних логичких блокова који симулирају

најбитније догађаје. Карактеристика дискретних догађаја јесте sukcesивно извршавање, односно промена стања система. Завршетак једне акције представља окидач за покретање друге. У овом поглављу биће представљен и детаљно описан процесни дијаграм модела само-конфигуришуће фабрике. Он се по својој конструкцији не разликује превише од дијаграма статички креираних модела; најбитнија разлика јесте повезивање више различитих процесних дијаграма који се налазе у различитим агентима.



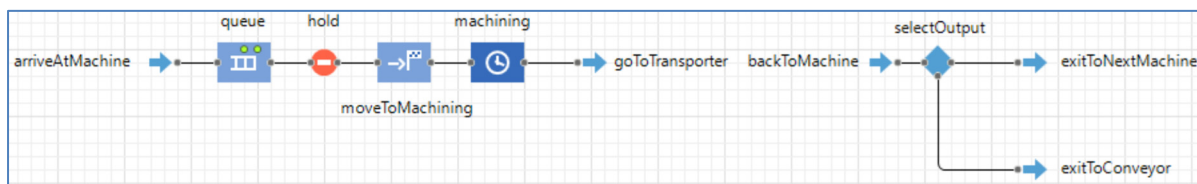
Слика 14. Статички елементи симулационог модела

На слици 15 представљен је процесни дијаграм који се налази у главном агенту. Овај дијаграм представља почетак и крај производног процеса и може се поделити на два дела, први део, до блока *fromFinalMachine*, симулира динамички део модела, док други део, од претходно поменутог па до последњег блока симулира статички формиран део модела.



Слика 15. Процесни дијаграм у главном агенту

У оквиру агента *Machine* налази се процесни дијаграм, слика 16, који је заједнички за све машине из популације. То је могуће из разлога што се процес обраде на свакој машини може описати истим логичким блоковима: *queue*, *hold*, *moveToMachining* и *machining*.



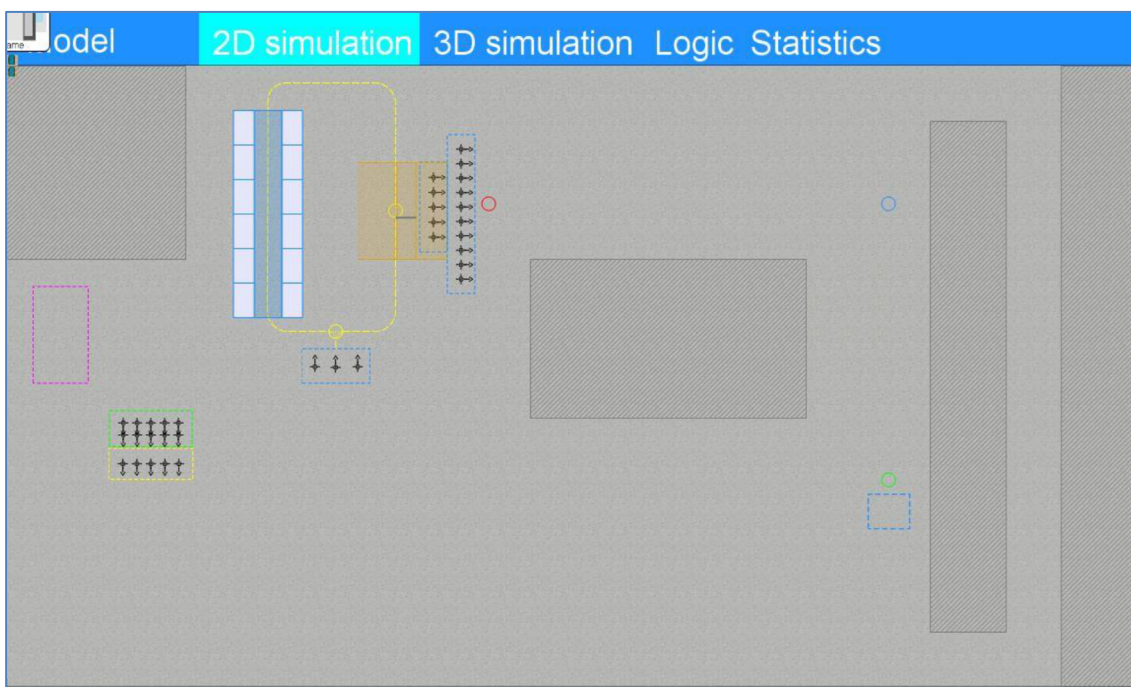
Слика 16. Процесни дијаграм унутар агента *Machine*



Конечна форма, односно поставка модела подељена је у четири одвојене зоне и то:

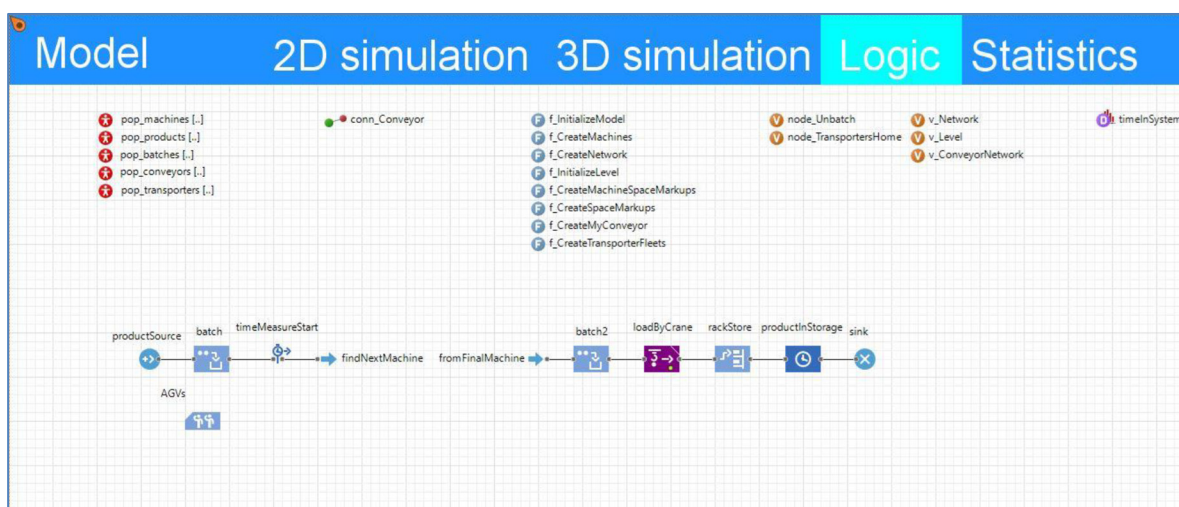
- 2D симулација,
- 3D симулација,
- Логика модела,
- Статистика.

На слици 17 приказана је 2D поставка модела, на којој се налазе анимације свих статички и динамички креираних агената и просторних елемената. Динамички агенти до покретања нису видљиви, што је једна од одлика на тај начин креираних елемената. У горењем делу погледа, може се видети трака са називима четири зоне модела.



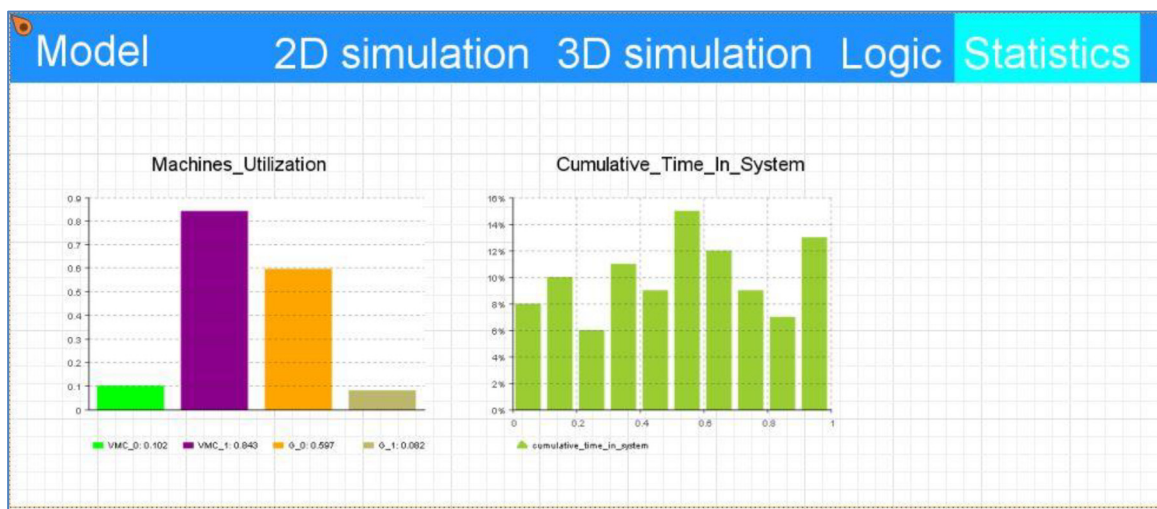
Слика 17. Дводимензионална зона поставке симулационог модела

3D зона симулације није видљива пре покретања саме симулације. У оквиру модела постоји више међусобно повезаних процесних дијаграма који заједно представљају једну целину. У зони модела који се назива Логика, слика 18, приказан је само процесни дијаграм који се налази у главном агенту из разлога што он уједно представља и почетни екран на којем је цела поставка модела формирана.



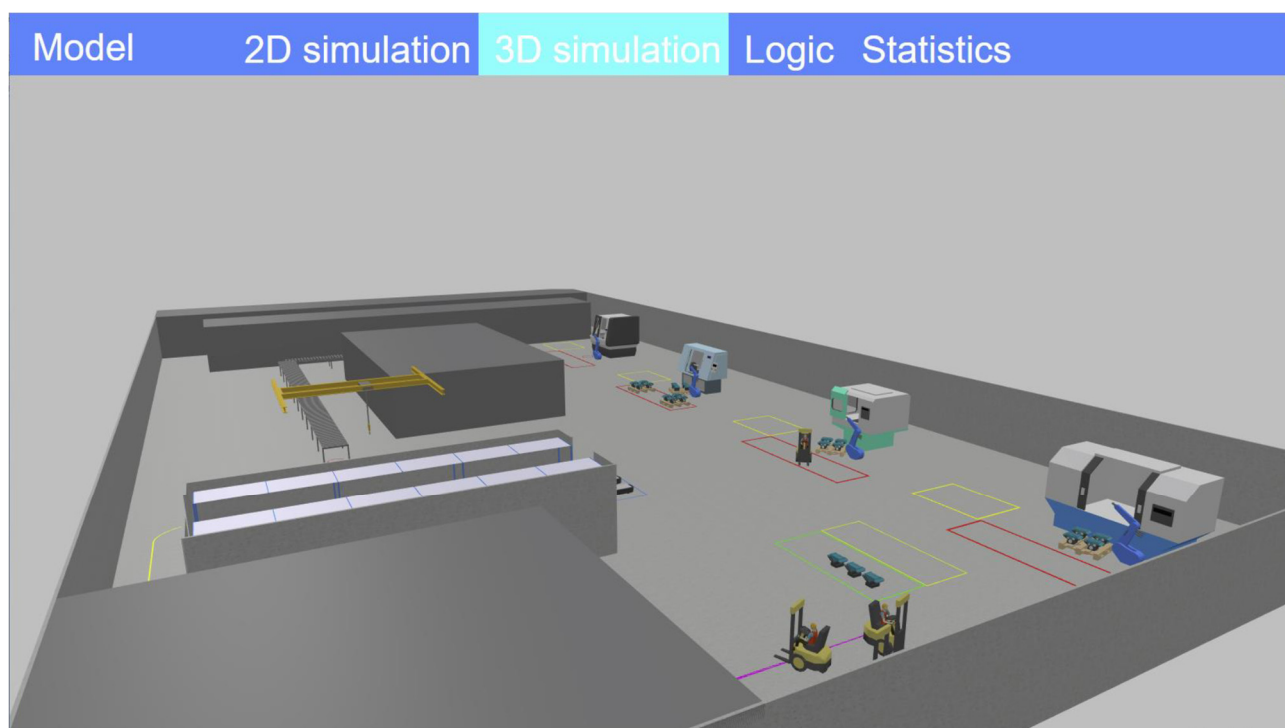
Слика 17. Зона симулационог модела са почетним процесним дијаграмом, функцијама, променљивим и популацијама агената

У четвртој зони модела, слика 18, налазе се дијаграми, односно статистика или излазне информације.



Слика 18. Резултати симулације

Коначно на слици 19 је дат 3D приказ током симулације за задати сет улазних параметре који дефинишу и конфигурацију модела и параметре процеса.



Слика 19. 3D анимирани приказ

## 9. ЗАКЉУЧАК

Израз „дигитални близанац“ настао је као део велике маркетиншке кампање у оквиру концепта Индустија 4.0, како би се убрзала дигитализација у производњи и логистици. Рачунарски симулациони модели производних и логистичких модела користе се од 50-их година прошлог века. Рачунарски модел је сам по себи дигитални близанац [7].

Ипак чињеница је да дигитални близанац може бити симулациони модел, али симулациони модел не мора нужно бити дигитални близанац [7]. Концепт дигиталног близанаца омогућава произвођачима

да креирају моделе својих технолошких система и процеса користећи податке у реалном времену прикупљене од паметних. Дигитални близанац и физички систем повезани су преко IoT или паметних сензора и актуатора. Синхронизација између дигиталног близанца и његовог физичког близанца, било на мрежи или ван њега, осигурава да су технолошки системи стално оптимизирани док дигитални близанац прима информације о перформансама у реалном времену од физичког система.

У раду су приказане две примера развоја дигиталног близанца, статички и динамички. Динамички модел је комплексан за развој, али омогућава флексибилност у примени. Са друге стране развој динамичког модела за комплексан реалан систем, као што је технолошки систем ливених полимера, за који је развијен модел, може бити врло сложен задатак.

Правци даљих истраживања су усмерени у два правца. Први се односи на развој комплексних динамичких модела уз примену вештачке интелигенције. Други правац је коришћење отворене архитектуре коришћеног симулационог софтвера за прихват улаза са паметних сензора уместо, за сада примењених, коришћења улазних података из базе података. .

## 10. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tao, F., Qi, Q. *New IT Driven Service-Oriented Smart Manufacturing: Framework and Characteristics*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017; Doi:10.1109/TSMC.2017.2723764.
- [2] Qi Q., Tao, F., Zuo, Y., Zhao, D., *Digital Twin Service towards Smart Manufacturing*, Procedia CIRP, Vol. 72, pp. 237-242, 2018.
- [3] Kitain, L., Digital Twin — The New age of Manufacturing, <https://medium.com/datadriveninvestor/digital-twin-the-new-age-of-manufacturing-d964eeba3313>, November, 2018.
- [4] <https://www.anylogic.com/>
- [5] Вишић, Ј., Симулација рада погона ливених полимера у компанији „Металац Инко“, мастер рад, Машински факултет, 2020.
- [6] Ђермановић, Ј., Развој динамичког дигиталног близанца, мастер рад, Машински факултет, 2020.
- [7] Shao, G., Jain, S., Christoph Laroque, Lee, L. H., Lendermann, P., Rose, O., *Digital Twin For Smart Manufacturing: The Simulation Aspect*, Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference, 2019.

Babić, B., Višić, J., Đermanović, A.

### DIGITAL TWINS IN THE SMART MANUFACTURING AND INDUSTRY 4.0

**Abstract:** *The digital twin is a digital replica of physical data, processes, systems and a digital simulation of reality, which can be used for various purposes. The concept of digital twin provides an efficient way for cyber-physical integration of production and optimization of business processes and operational manufacturing procedures thus achieving a new higher level of productivity. Digital twins can use data from sensors installed on physical objects to represent their condition in real time, operating condition or position. The paper presents two examples of digital twin development, the first based on the static setting of the model and the second based on the dynamic setting.*

**Key words:** *Digital Twin, Industry 4.0, Computer Simulation, Smart Manufacturing.*