

Дигитални близанци у предиктивном одржавању уз примјену вјештачке интелигенције

Digital twins in predictive maintenance using artificial intelligence

Сања Тица, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – ИНЖЕЊЕРСТВО ИНФОРМАЦИОНИХ СИСТЕМА

Кратак садржај – У овом раду дат је систематски преглед литературе на тему дигиталних близанаца у предиктивном одржавању уз примјену вјештачке интелигенције. На почетку су представљене теоријске основе које читаоца уводе у кључне појмове. Затим је корак по корак описана методологија претраге и селекције радова. Резултати анализе представљени су графички, путем разних дијаграма који пружају визуелни увид у стање и трендове у области. У завршном дијелу рада представљени су коначни резултати анализе садржаја селектованих радова из прве фазе, уз наглашавање начина на које ови радови доприносе одговарању на постављена истраживачка питања и развоју области дигиталних близанаца у контексту предиктивног одржавања.

Кључне ријечи: дигитални близанци, предиктивно одржавање, вјештачка интелигенција

Abstract – This paper represents a systematic literature review on the topic of digital twins in predictive maintenance using artificial intelligence. The paper begins with a presentation of the theoretical foundations, introducing the reader to the key concepts. Subsequently, the methodology for searching and selecting research papers is described step by step. The results of the analysis are also presented graphically, through various diagrams that provide a visual overview of the current state and trends in the field. In the final part of the paper, the results of the content analysis of the selected papers from the first phase are presented, emphasizing how these studies contribute to answering the defined research questions and to the development of the field of digital twins in the context of predictive maintenance.

Keywords: digital twins, predictive maintenance, artificial intelligence

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је била др Душанка Дакић, доцент.

1. УВОД

Рад је написан у форми систематског прегледа литературе на тему дигиталних близанаца (енгл. *Digital Twins - DT*) у предиктивном одржавању (енгл.

Predictive maintenance - PdM) уз примјену вјештачке интелигенције (енгл. *Artificial Intelligence - AI*)

Дигитални близанци представљају виртуелне репрезентације физичких ентитета (машина, процеса, система или уређаја) који у реалном времену синхронизују стање, понашање и податке свог физичког пандана, те на тај начин омогућавају предвиђање, оптимизацију и контролу тог физичког пандана, кроз међусобну размјену података [1].

Предиктивно одржавање је врста одржавања заснована на стању (енгл. *condition-based maintenance*), при чему се анализом историјских и тренутних индикатора предвиђа тренутак потенцијалног отказа система, како би се правовремено реаговало и избегли непланирани прекиди [2]. Главни циљ предиктивног одржавања јесте процјењивање тренутног стања имовине и ресурса, спровођење активности одржавања ако и када је потребно, са циљем очувања поузданости и смањења трошкова непланираних застоја [3].

У ери четврте индустријске револуције (енгл. *Industry 4.0*), фокус је на повећању продуктивности, оперативне ефикасности и квалитета доношења одлука, при чему постизање ових циљева у великом обиму и даље представља изазов [2]. Са друге стране, вјештачка интелигенција као концепт се сваки дан интензивно развија и надограђује, те је њена примјена у свим сферама човјековог живота све израженија. Како у свакодневном животу, вјештачка интелигенција је узела маха и у индустрији, почевши од производње, роботике, авијације, до развоја паметних и одрживих градова, па све до медицине и унапријеђења квалитета људског живота и здравља.

У другом поглављу биће представљено на који начин је текао поступак систематског прегледа литературе од претраге радова по одабраним кључним ријечима, преко њихове филтрације према дефинисаним критеријумима, па све до коначне селекције релевантних истраживања.

У трећем поглављу биће представљени резултати детаљне анализе садржаја претходно одабраних радова, почевши од идентификације коришћених технологија и метода, до извођења закључака и формулисања одговора на постављена истраживачка питања, на основу обједињене анализе свих радова. На крају овог рада биће дат свеобухватан закључак који сумира кључне налазе и указује на шире импликације спроведеног истраживања.

2. МЕТОДОЛОГИЈА СИСТЕМАТСКОГ ПРЕГЛЕДА ЛИТЕРАТУРЕ

Мотивација за спровођење систематског прегледа литературе на ову тему произилази из потребе да се на свеобухватан и методолошки утемељен начин сагледа тренутно стање у области, идентификују кључни изазови и недостаци, као и најзначајнији приступи и потенцијални правци будућег развоја.

2.1. Приступ истраживању

Главна смјерница за спровођење систематског прегледа литературе била је PRISMA методологија. Иако је PRISMA као методологија настала још 2009. године, званична верзија која се данас најчешће користи јесте надограђена верзија из 2020. године, тзв. PRISMA 2020, која уводи новине и побољшања у начину извјештавања и структурирању систематских прегледа. Садржи 27 ставки контролне листе (енгл. *checklist*) и ревидиране дијаграме тока (енгл. *flow diagrams*) за праћење процеса селекције радова [4].

Уколико се систематски преглед литературе спроводи коришћењем ове методологије, процес тече у четири следеће фазе:

1. Идентификација (енгл. *Identification*): навођење база (и других извора) коришћених за претрагу радова и кључних ријечи/стрингова који су коришћени за претрагу.

2) Прелиминарна селекција радова (енгл. *Screening*): селекција радова на основу неког критеријума (на примјер процјена на основу наслова рада, уклањање дупликата...).

3) Оцјена подобности (енгл. *Eligibility*): Детаљнија анализа радова, најчешће на основу апстрактта рада или cjелокупног садржаја.

4) Укључивање радова у коначан преглед (енгл. *Included*): радови који су добијени као резултат спровођења cjелокупног процеса селекције и који ће се користити у даљем наставку истраживања [4].

2.2. Дефинисање истраживачких питања

У наставку је приказана листа пет истраживачких питања, дефинисаних у складу са циљевима и фокусом истраживања, која су служила као основ за детаљнију селекцију радова у фази *Eligibility* према PRISMA методологији.

П1. На који начин интеграција дигиталних близанаца и вјештачке интелигенције унапређује предиктивно одржавање у индустријским системима?

П2. Које су најчешће архитектуре и приступи за имплементацију дигиталних близанаца у сврху предиктивног одржавања?

П3. Како различите методе машинског и дубоког учења доприносе тачности и поузданости предиктивних дигиталних близанаца?

П4. Које су главне препреке и изазови у имплементацији дигиталних близанаца заснованих на вјештачкој интелигенцији у стварним индустријским окружењима?

П5. На који начин дигитални близанци и системи засновани на вјештачкој интелигенцији омогућавају прелазак са традиционалног и превентивног на

предиктивно одржавање у савременим индустријским системима?

2.3. Стратегија претраге

За спровођење овог истраживања и проналажење адекватних радова коришћене су двије различите базе научних радова:

1. *Scopus*

2. *IEEE Xplore*

Scopus је индексна апстрактна база података, развијена од стране *Elsevier Co.* Интересантно је да је база сам назив добила по птици *Hammerkop* (*Scopus umbretta*), која природно има изражене навигационе способности, у чему лежи и симболика. Радови садржани у овој бази потичу од 21 различите институције, у сарадњи са око 300 библиотека и истраживача. Ова база омогућава приступ чланцима из научних, техничких и медицинских часописа, као и референцама које су укључене у те чланке, чиме се кориснику омогућава хронолошка претрага, уназад и унапријед кроз вријеме [5].

IEEE Xplore јесте дигитална библиотека која представља моћан ресурс за проналажење и приступ научном и техничком садржају, а који је објављен од стране IEEE организације и њених издавачких партнера. Постоје различити типови научних радова које је овде могуће пронаћи, међу којима су књиге и њихова поглавља, радови са конференција, курсеви, разни стандарди, као и часописи и журналы [6].

2.4. Кључне ријечи и стрингови претраге

Како би се прије свега пронашли најрелевантнији радови за дату тему, те како би се сузио избор претраге, коришћена је стратегија претраге путем стрингова и кључних ријечи, у оквиру тзв. напредне претраге (енгл. *Advanced Search*). Оваква претрага омогућена је у већини ових научних база, у којима је могућа комбинација кључних појмова помоћу логичких оператора као што су *OR*, *AND* или *NOT*, а могућа је и претрага по неком конкретном дијелу документа, као што је назив или апстракт, па је могуће успјешно прилагодити саму претрагу специфичним потребама истраживања.

Стринг по коме се вршила претрага садржао је комбинацију више различитих кључних ријечи, логички спојених путем више различитих оператора. Претрага је извршена користећи кључне појмове и комбинацију логичких оператора приказаних у наставку.

Стринг претраге: ("*digital twin**" *AND* "*predictive maintenance*" *AND* ("*artificial intelligence*" *OR* "*machine learning*" *OR* "*deep learning*")

Иницијални број радова добијених као резултат извршавања претходно приказаног упитног стринга био је 1211 (из обје научне базе заједно). Број дупликата, односно радова који су се појављивали у обје научне базе је био 645. Међутим и након уклањања дупликата, број радова за детаљну анализу био је и даље висок, стога су примјењени додатни филтери претраге. Тражени су радови писани на енглеском језику, издати у задњих 5 година, који су типа *Conference Paper* или *Journal Article* и који су отвореног типа (енгл. *Open Access*). На овај начин, број

радова који је разматран за даљу селекцију пао је на 190. Од ових радова, одређени број је елиминисан само на основу свог наслова, јер се већ из њега могло закључити да није релевантан за дату тему, као на примјер следећи радови:

- *Performance Modeling of Data Storage Systems Using Generative Models*

- *Detection of Spark Erosion on Insulated Rail Joints by Deep Learning*

На овај начин, елиминисано је 28 радова. Следећи корак селекције подразумјевао је анализу апстрактних радова, на основу ког је могуће закључити шта је главни предмет истраживања. У оквиру ове фазе елиминисано је још 42 рада, који су углавном обухватили дигиталне близанце и предиктивно одржавање, али нису се бавили интеграцијом компоненте вјештачке интелигенције, тако да је на крају коначан број радова погодних за детаљну анализу износио 22.

2.5. Опште карактеристике

Највећи број радова који су постали предмет детаљног истраживања пронађени су у оквиру *Scopus* научне базе радова, док је мањи број радова преузет *IEEE Xplore* научне базе радова. Оваква дистрибуција може се објаснити чињеницом да *Scopus* обухвата шири спектар интердисциплинарних публикација, укључујући области инжењерства, рачунарства, индустријских система, али и менаџмента и организационих наука.

Када је ријеч о географској расподјели аутора по земљама из којих долазе, доминира подручје Азије и то углавном Кина, а потом Уједињено Краљевство и Сједињене Америчке Државе. Преосталих европских држава је углавном по један представник, али оно што се може закључити је да су радови који су добијени као резултат селекције написани од стране аутора са свих страна свијета, доминантно европског и азијског континента, што доста говори о заступљености теме међу ауторима широм свијета, односно о глобалном карактеру истраживања и интересу међународне заједнице за тему дигиталних близанаца у предиктивном одржавању уз примјену вјештачке интелигенције.

Анализом односа између броја референци и броја цитата по раду, могуће је закључити да радови који садрже већи број референци генерално остварују и већи број цитата, што указује на повезаност између ширине обухваћене литературе и научног утицаја рада. На основу година објављивања одабраних радова, уочава се да раније објављени радови (из 2021. и 2022. године) имају значајно већи број цитата у односу на новије публикације из 2024. и 2025. године. Може се рећи да је овакав тренд очекиван, из разлога што старији радови природно имају више времена да буду препознати и цитирани у академској заједници.

Када су у питању кључне ријечи из одабраних радова, анализа показује да је најзаступљенији појам „*Digital Twins*“. Слједи га термин „*artificial intelligence*“ и „*predictive maintenance*“, што указује на снажну везу између дигиталних близанаца и примјене вјештачке интелигенције у контексту предиктивног одржавања. Учестала појава појмова „*machine learning*“ и „*deep*

learning“ додатно наглашава улогу напредних алгоритама у анализи података и моделовању понашања физичких система.

3. РЕЗУЛТАТИ СИСТЕМАТСКОГ ПРЕГЛЕДА ЛИТЕРАТУРЕ

У овом поглављу представљени су резултати спроведеног систематског прегледа литературе. Сваки од одабраних радова детаљно је анализиран, а из те анализе изведени су кључни налази релевантни за тему истраживања.

3.1. Преглед технологија и метода

Кључне технологије примјењиване у системима који су били предмет претходно спроведене анализе могу се груписати у неколико различитих категорија:

1.) Технике машинског и дубоког учења

Најзаступљеније методе у овој области које су помињане и описиване у већини претходно анализираних истраживања јесу неуронске мреже и то доминантно конволуционе неуронске мреже (енгл. *Convolutional Neural Networks – CNN*), рекурентне неуронске мреже (енгл. *Recurrent Neural Networks – RNN*), као и неке *ensemble* методе, као што су *RandomForest* и *XGBoost* алгоритми. Неуронске мреже са краткотрајном и дуготрајном меморијом (енгл. *Long Short-Term Memory – LSTM*) такође су заступљене у неколико различитих истраживања и то најчешће за детекцију и учење веза и образаца понашања у систему. За синтезу и аугментацију података користе се углавном генеративне адверзарне неуронске мреже (енгл. *Generative Adversarial Networks – GAN*) и аутоенкодери (енгл. *Autoencoders – AE*). Употреба алгоритма к-најближих сусједа (енгл. *K-Nearest Neighbors – KNN*) је такође широко распрострањена у спроведеним истраживањима, а најчешће је коришћен за анализу и предикцију перформанси од значаја у систему, као што су напрезање и помјерање у зупчаницима. Поред ових метода, у појединим радовима коришћене су и *Bayes*-ове мреже, методе потпорних вектора, стабла одлучивања...

2.) Физички и хибридни модели

Неки аутори [7] наглашавају потребу за физички-информисаним моделима (енгл. *Physics-informed models – PIML*) који комбинују законе механике и податке прикупљене са сензора, ради повећања интероперабилности и реалистичности симулација дигиталног близанца, а у циљу детекције кварова.

3.) Архитектуре система

Када је ријеч о предложеним архитектурама система, доминанте су *cloud-state* хибридне вишеслојне архитектуре, које комбинују пожељне карактеристике оба типа архитектура – брзину локалне обраде података (*edge-computing*) и скалабилност сервиса у облаку (енгл. *cloud services*).

4.) Сензорске и ИоТ технологије

Сви радови истичу значај примјене интернета ствари и интернета роботских ствари (енгл. *Internet of Robotic Things – IoRT*) сензора за прикупљање података о вибрацијама, притиску, температури, потрошњи енергије и другим параметрима (зависно од система у ком се сензори примјењују).

3.2. Предности интеграције ДТ и АИ

Увођење интегрисаног ДТ–АИ система доноси низ значајних предности и унапријеђења у раду. У наставку су истакнуте неке од најважнијих:

- континуирано праћење и могућност симулације физичког система,
- виртуелно тестирање и предвиђање кварова без застоја,
- аутоматско одржавање и успостављање двосмјерне комуникације између сензора и ДТ модела и
- повећање интероперабилности употребом физички-информисаних и *Vayes*-ових модела.

Овај приступ показао се посебно значајним и корисним у ситуацијама гдје су кварови ријетки или не постоји могућност адекватног мјерења (зупчаници, хидраулични системи...), јер ДТ подржава генерисање вјештачких података над којима се модели тренирају.

3.3. Технички и организациони изазови

Иако сваки од описаних приступа има своје предности, постоје и неки изазови и недостаци са којима су се аутори сусретали приликом спровођења истраживања. Највећи број аутора истиче следеће проблеме:

- проблеми у раду са подацима, у смислу недостатка великих и репрезентативних сетова података за обуку модела,
- безбједност и сигурност података,
- високи трошкови имплементације,
- сензорске инфраструктуре и обезбјеђења рачунарских ресурса за тренирање модела,
- ограничена интероперабилност између различитих ДТ платформи (предложена рјешења углавном су компатибилна само са једним одређеним системом) и
- недостатак стандардизације архитектура и комуникационих протокола.

Унапређења у сензорским технологијама и методама машинског учења указују да ће се ови системи у наредном периоду даље усавршавати и постајати практично примјењиви у све већем броју индустријских окружења.

4. ЗАКЉУЧАК

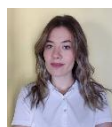
Већ на самом почетку истраживања, приликом претраге и филтрације релевантне литературе, било је могуће закључити да је тема која је у овом раду обрађивана изузетно популарна и заступљена као предмет истраживања многих аутора, а нарочито у периоду од задњих пет година. Имајући у виду да ни технологије дигиталног близанца ни методе вјештачке интелигенције још увијек нису постигле свој пуни технолошки потенцијал, оправдано је очекивање да ће интересовање за ову област у наредним годинама значајно расти. Улога ДТ у оваквим системима односи се на моделовање физичких система, синхронизацију података у реалном времену и могућност спровођења различитих индустријских сценарија. Са друге стране, АИ компонента омогућава напредну анализу података прикупљених у систему, најчешће путем сензора који су данас такође потпомогнути АИ технологијама (нпр.

ИоТ сензори) и као такви имају могућност напредног прикупљања података. Анализом одабраних радова могуће је потврдити да системи у којима се интегришу дигитални близанци заједно са методама и техникама вјештачке интелигенције представљају основу модерних система за предиктивно одржавања. Дигитални близанци као концепт су већ увелико заступљени у индустрији, а временом се опсег њихове примјене додатно шири, у комбинацији са новим технологијама и приступима. Хронологија анализираних радова указује и на јасан напредак од традиционалних аналитичких метода и реактивног одржавања ка самоуком, адаптивним и интелигентним индустријским системима. Посматрано у цјелини, дигитални близанци засновани на АИ технологијама представљају темељ будућих интелигентних индустријских система у оквиру парадигме Индустрије 4.0 и предстојеће Индустрије 5.0.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Traar G, Henjes J, Kritzinger, M, Karner and W. Sihn. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFA PapersOnLine, 51(11).
- [2] Achouch, M, Dimitrova, K, Ziane, S, Sattarpanah Karganroudi, R, Dhouib, H, Ibrahim, and M. Adda. On predictive maintenance in industry 4.0: Overview, models, and challenges. Applied Sciences, 12(16), 2022.
- [3] Logan Cummins et al. Explainable predictive maintenance: A survey of current methods, challenges and opportunities. IEEE Access, 12:57574–57602, 2024.
- [4] J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, et al. The prisma 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, 2021.
- [5] J. Burnham. Scopus database: A review. Biomedical Digital Libraries, 3, 2006.
- [6] IEEE Xplore. About content in ieee xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/Xplorehelp/overview-of-ieee-xplore/about-content>. [Online; accessed 16 October-2025].
- [7] S. Ma, K. A. Flanigan, and M. Bergés. State-of-the-art review and synthesis: A requirement-based roadmap for standardized predictive maintenance automation using dig- ital twin technologies. Advanced Engineering Informatics, 62, 2024.

Кратка биографија:



Сања Тица рођена је 02. Августа 2000. године у Требињу, Република Српска. Уписује основне академске студије 2019. године, на смјеру Инжењерство информационих система. Диплому инжењера информационих технологија стиче 2023. године, а потом исте године уписује мастер академске студије, на истом смјеру.

Контакт: sanjatica2000@gmail.com