

ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЈА И ПРИМЕНА ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ У РЕГУЛАТОРНИМ АСПЕКТИМА НУКЛЕАРНИХ ТЕХНОЛОГИЈА И НУКЛЕАРНЕ ЕНЕРГЕТИКЕ

Платон Совиљ¹, Сара Касаповић², Стефан Мирковић³, Весна Спасић-Јокић⁴

^{1,2,3,4,5} Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, Србија

¹platon@uns.ac.rs, ²kasapovic.sara@uns.ac.rs, ³mirkovicst@uns.ac.rs, ⁴svesna@uns.ac.rs

Кратак садржај: Нуклеарни сектор, а посебно нуклеарна енергетика, пролазе кроз период дигиталне трансформације у којем вештачка интелигенција (ВИ) игра кључну улогу. Регулаторни оквири морају еволуирати како би испратили технолошки напредак, истовремено осигуравајући највиши ниво нуклеарне безбедности. Овај рад анализира дигиталну трансформацију и примену ВИ у оптимизацији инспекцијских надзора, предвидљивом одржавању и процени сигурности нуклеарних постројења. Посебан фокус стављен је на изазове сертификације алгоритама и етичке аспекте аутономног одлучивања у критичној инфраструктури.

Кључне речи: дигитална трансформација, нуклеарни сектор, нуклеарна енергетика, нуклеарна безбедност, вештачка интелигенција, машинско учење.

DIGITAL TRANSFORMATION AND APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN REGULATORY ASPECTS OF NUCLEAR TECHNOLOGIES AND NUCLEAR ENERGY

Abstract: The nuclear sector, and in particular nuclear power, is undergoing a period of digital transformation in which artificial intelligence (AI) is playing a key role. Regulatory frameworks must evolve to keep pace with technological advances, while ensuring the highest level of nuclear safety. This paper analyzes digital transformation and the application of AI in the optimization of inspection oversight, predictive maintenance and safety assessment of nuclear facilities. Special focus is placed on the challenges of algorithmic certification and the ethical aspects of autonomous decision-making in critical infrastructure.

Key Words: digital transformation, nuclear sector, nuclear energy, nuclear safety, artificial intelligence, machine learning.

1. УВОД

Нуклеарни сектор пролази кроз фазу ренесансе, вођену потребом за декарбонизацијом, међутим, нуклеарна енергетика представља један од најстроже регулисаних сектора на свету. Регулаторни процеси су традиционално спори и ригидни, односно традиционални регулаторни приступи ослањају се на детерминистичке методе и ригидне стандарде који су деценијама осигуравали стабилност.

Дигитална трансформација омогућава прелазак са "реактивног" на "проактивни" надзор. Појава вештачке интелигенције (ВИ) и машинског учења (МУ) отвара нове могућности за повећање ефикасности, али и поставља озбиљне изазове пред регулаторна тела као што су ИАЕА и националне дирекције за нуклеарну сигурност. Циљ овог рада је да истражи како технологије попут ВИ и МУ могу трансформисати регулаторне процесе — од лиценцирања нових типова реактора (као што су SMR - мали модуларни реактори) до надзора оперативних постројења.

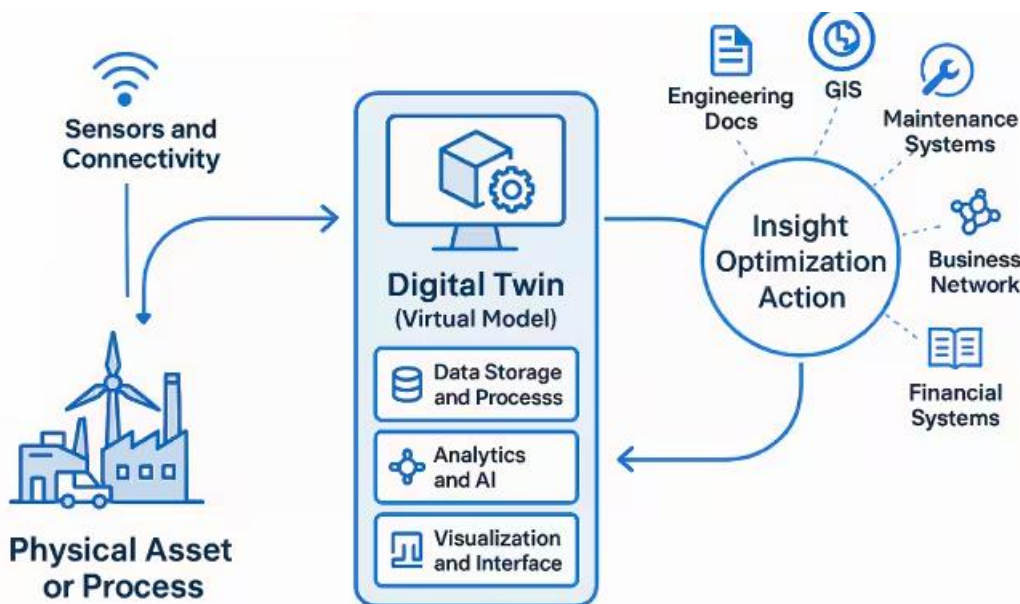
2. КЉУЧНЕ ТЕМЕ

Увођење концепата дигиталних близанаца (*Digital Twins*) (слика 1) омогућава регулаторима да симулирају сценарије акцидента са прецизношћу која раније није била могућа: у моделирању је омогућено коришћење реалних података из сензора за ажурирање дигиталног модела електране; при верификацији ВИ алгоритми могу брже идентификовати одступања од пројектованих параметара него што је то могуће ручним прегледом логова.

Примена ВИ у нуклеарном сектору може се поделити на неколико примарних домена који директно утичу на регулаторну праксу. Уместо периодичних прегледа, ВИ омогућава континуирани мониторинг компоненти. Алгоритми могу идентификовати аномалије у раду пумпи, вентила и цевовода пре него што дође до квара. Из регулаторне перспективе, ово захтева прелазак са "*prescriptive*" (прописаних) на "*performance-based*" (заснованих на учинку) регулативе.

Коришћењем вештачких неуронских мрежа, могуће је симулирати милионе сценарија акцидента у реалном времену. Ово омогућава регулаторима да брже процене вероватноћу оштећења језгра (*Core Damage Frequency* - CDF) са већом прецизношћу него традиционалним PSA методама (пробабилитичка анализа сигурности). Даље, нуклеарна постројења генеришу огромну количину техничке документације. Коришћењем

NLP (*Natural Language Processing*) технологија, регулатори могу брзо претраживати хиљаде страница извештаја о догађајима ради идентификовања системских недостатака или образаца који указују на деградацију безбедносне културе.



Слика 1. Елементи и функционисање дигиталних близанаца.

Највећа препрека широкој примени ВИ је тзв. "црна кутија" проблем (*black-box problem*). Регулатори захтевају потпуну транспарентност и објашњивост (*XAI - Explainable AI*) сваке одлуке која може утицати на безбедност. Стандардна софтверска верификација и валидација (*V&V*) нису довољни за алгоритме који уче током времена. Потребно је дефинисати нове стандарде за:

- Квалитет и репрезентативност података за тренинг.
- Отпорност на сајбер нападе (*Adversarial AI*).
- Континуиран мониторинг учинка модела након имплементације.

Интеграција ВИ у контролне системе повећава могућности за нападе на систем, тако да регулаторни оквир мора дефинисати строге границе између ВИ система за аналитику и система за физичко управљање реактором како би се спречило нежељено деловање у случају компромитовања алгоритама.

Будући правци развоја су разноврсни али се посебно издваја пут ка "паметној" регулативи јер увођење малих модулних реактора (SMR) захтеваће бржи процес лиценцирања. ВИ омогућава креирање "дигиталних близанаца" (Digital Twins) који служе као тестна платформа за регулаторна одобрења. При свему томе важно је напоменути да вештачка интелигенција не треба да замени људски надзор, већ да га појача (*Augmented Intelligence*) и да коначна одговорност за нуклеарну сигурност остаје на човеку и државним органима.

3. ПРЕДИКТИВНА АНАЛИТИКА, ДИНАМИЧКИ НАДЗОР И РЕГУЛАТОРНИ ИЗАЗОВИ

У традиционалном моделу, нуклеарни регулатори се ослањају на детерминистичке анализе сигурности. Међутим, дигитална трансформација омогућава прелазак на пробабилистичку процену ризика (PRA) у реалном времену помоћу вештачке интелигенције. Један од највећих изазова у продужењу радног века нуклеарних електрана је праћење стања реакторске посуде. Коришћењем вештачких неуронских мрежа (ANN), регулатори могу анализирати историјске податке о зрачењу и предвидети промене у микроструктури челика.

Математички модел за предвиђање транзиционе температуре дуктилности може се представити као збир функције флуенса неутрона, хемијског састава и радне температуре са једне стране и стохастичке грешке са друге стране, у коју ВИ оптимизује кроз итеративно учење, смањујући конзервативне маргине сигурности које су раније биле неопходне због мерне несигурности.

Примена дронова и робота опремљених камерама високе резолуције унутар контејнера омогућава прикупљање визуелних података без излагања људи зрачењу. Алгоритми за компјутерску визију и детекцију објеката обучени су да препознају микро-прскотине на бетону или корозију на цевоводима које људско око може превидети у стресним условима.

Увођење ВИ у нуклеарни сектор ствара парадокс: иако ВИ повећава прецизност, његова природа "црне кутије" (*black-box*) је у супротности са начелом транспарентности коју захтевају међународни стандарди (нпр. *IAEA Safety Standards*). Регулаторна тела морају бити у стању да реконструишу логику из сваке одлуке. Ако систем за вештачку интелигенцију препоручи хитно заустављање реактора (SCRAM), оператери и инспектори

морају знати који су улазни параметри довели до те тежине одлуке. Овде на сцену ступа *Explainable AI* (XAI). Може се предложити следећи оквир за сертификацију ВИ алата у нуклеарној енергетици:

- 1) Подаци (*Data Lineage*): Јасно порекло и квалитет података коришћених за тренинг;
- 2) Робусност (*Adversarial Robustness*): Отпорност модела на сајбер нападе и манипулацију улазним подацима;
- 3) Људски надзор (*Human-in-the-loop*): AI систем помаже, али коначну одлуку о сигурности увек доноси лиценцирани инжењер.

4. ЗАКЉУЧАК

Дигитална трансформација и примена вештачке интелигенције у регулаторним аспектима нуклеарних технологија и нуклеарне енергетике нуди потенцијал за драстично повећање ефикасности и сигурности. Међутим, неопходан је опрезан приступ који подразумева развој нових међународних стандарда и методологија за верификацију модела дигиталне трансформације и ВИ модела. Регулаторна тела морају улагати у кадрове који разумеју нуклеарну физику, нуклеарне технологије, нуклеарну енергетику и области архитектуре података како би успешно управљали овом транзицијом.

Такође, будућност лежи у развоју хибридних модела који комбинују детерминистичку физику са машинским учењем (*Physics-Informed Neural Networks* - PINNs), при чему је битно истаћи да вештачка интелигенција неће заменити човека-регулатора, већ ће му постати незаменљив алат у очувању нуклеарне сигурности у ери четврте индустријске револуције.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA), "*Artificial Intelligence for Natural Science and Technology*," IAEA-TECDOC, 2024.
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA), "*Artificial Intelligence for Nuclear Applications and Resilience*," 2024.
- [3] OECD Nuclear Energy Agency (NEA), "*Trustworthiness of AI in the Nuclear Sector*," 2025.
- [4] Smith, J. et al., "*Regulatory Challenges of Autonomous Systems in Power Plants*," *Nuclear Engineering and Design*, 2025.
- [5] Smith, J. et al., "*Digital Twins in Nuclear Safety Strategy*," *Journal of Energy Systems*, 2025.
- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), "*Strategic Plan for AI Implementation*," 2025.