

В. О. Лесько  
М. С. Юхимчук  
Стрембіцький П. П  
Ю. А. Горчук  
О. В. Климчук

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ЛОКАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА БАЗІ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ (SMR)

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

*Малі модульні реактори (ММР) є перспективним рішенням для децентралізованої, стійкої енергетики, особливо в умовах України післявоєнної відбудови. В роботі розглядаються сучасні підходи до автоматизації локальних систем на базі ММР, з акцентом на цифрові двійники (digital twin), штучний інтелект (AI), предиктивне обслуговування та ієрархічні системи керування. Показано, що високий рівень автоматизації дозволяє досягти «walk-away safety», мінімального штату та інтеграції з мікромережами. Досліджено виклики кібербезпеки та регуляторні бар'єри.*

**Ключові слова:** малі модульні реактори (ММР), цифровий двійник, штучний інтелект, walk-away safety, ієрархічні системи керування, відновлювані джерела енергії, BESS, I&C системи, DERMS, anomaly detection, децентралізована енергетика, предиктивне обслуговування, кібербезпека, мікромережі

### Abstract

*Small Modular Reactors (SMRs) represent a promising solution for decentralized, resilient energy supply, particularly in the context of Ukraine's post-war reconstruction. This paper examines current approaches to the automation of SMR-based local energy systems, with an emphasis on digital twins, artificial intelligence (AI), predictive maintenance, and hierarchical control systems. It is demonstrated that a high level of automation enables the achievement of "walk-away safety," minimal staffing requirements, and seamless integration with microgrids. Cybersecurity challenges and regulatory barriers are also examined.*

**Keywords:** small modular reactors (SMR), digital twin, artificial intelligence, walk-away safety, hierarchical control systems, renewable energy sources, BESS, I&C systems, DERMS, anomaly detection, decentralized energy, predictive maintenance, cybersecurity, microgrids

### Вступ

Розвиток ММР (потужність 50–300 МВт) відкриває нові можливості для локальних енергосистем, що поєднують базове навантаження від ядерної генерації з відновлюваними джерелами (ВДЕ), системами накопичення (BESS) та управлінням попитом. У 2026 р. ключовими є проекти Westinghouse AP300, Holtec SMR-300, GE Hitachi BWRX-300 та Rolls-Royce SMR з інтенсивним впровадженням цифрових технологій. Автоматизація переходить від традиційних вимірювально-керовальних систем (I&C) до інтелектуальних платформ IV покоління, що забезпечують автономність, прогнозування та дистанційне керування.

### Виклад основного матеріалу

В Україні децентралізація енергетики та заміна вугільних потужностей вимагають стійких джерел біля споживача. Енергоатом активно розвиває співпрацю: меморандуми з Westinghouse (AP300, 2023–2025) та Holtec (SMR-300, виробництво компонентів в Україні, пілоти 2027–2030). Глобально: ORNL розробив ризик-інформований цифровий двійник для BWRX-300 (2026), Yokogawa забезпечує DPCS для Rolls-Royce SMR fleet (2026). EU SMR Strategy та IAEA підкреслюють потребу в AI та digital twin для зниження ризиків і витрат. Сучасні ММР досягають рівня автономності 8–9.5 (за шкалою 1–10), що значно перевищує Gen III+.

Таблиця 1. Порівняння ключових SMR-платформ за рівнем автоматизації (2026 р.)

| Платформа       | Розробник              | Потужність, МВт | Тип | Рівень автономності (1–10) | Ключові елементи автоматизації                             | Статус (2026)                   |
|-----------------|------------------------|-----------------|-----|----------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| AP300           | Westinghouse           | ~300            | PWR | 8.5–9.0                    | Digital I&C IV, remote supervisory, AI predictive          | Roadmap Energoatom, cert. ~2027 |
| SMR-300         | Holtec                 | 300             | PWR | 8.8–9.2                    | Autonomous ops, factory I&C, passive safety + DT           | Виробництво компонентів в UA    |
| BWRX-300        | GE Hitachi             | 300             | BWR | 8.0–9.0                    | Risk-informed DT (ORNL), natural circulation, ML anomaly   | DT впроваджено 2026             |
| Rolls-Royce SMR | Rolls-Royce + Yokogawa | ~470            | PWR | 9.0–9.5                    | Yokogawa DPCS, fleet management, high availability 99.999% | Fleet control systems 2026      |
| VOYGR           | NuScale                | 77 × модулі     | PWR | 9.2–9.5                    | Full digital twin, E2 Centers, AI anomaly detection        | Сертифікація, інтерес UA        |

Основні задачі автоматизації локальних енергетичних систем на базі ММР зосереджені на забезпеченні пасивної безпеки та принципу «walk-away safety», що дозволяє автоматичне зупинення реактора без участі оператора завдяки вбудованим фізичним захистам, інтеграції ММР як надійного базового джерела в гібридні мікромережі разом з ВДЕ та системами BESS для гнучкого балансування навантаження в острівному чи локальному режимах, впровадженні цифрових двійників в реальному часі моделювання, прогнозування відмов, ризик-орієнтованого аналізу та оптимізації режимів, розвитку штучного інтелекту та машинного навчання для предиктивного обслуговування, виявлення аномалій (anomaly detection), agentic AI для автономного регулювання та load-following без постійного втручання персоналу, гарантії кібербезпеки в умовах високої цифризації через архітектуру zero-trust, стандарти IEC 62443, сегментацію мереж та AI-моніторинг загроз, а також суттєве зниження операційних витрат (OPEX) за рахунок мінімального штату (до 1 оператора на майданчик або повного дистанційного/автономного керування), що досягається завдяки комбінації пасивних систем, AI-прогнозування та централізованого управління кількома модулями.

Ієрархічна архітектура автоматизації локальних енергетичних систем на базі ММР організована на трьох рівнях: локальному (реакторний рівень, I&C), мікромережевому (DERMS/ADMS для управління розподіленими енергетичними ресурсами та системами розподілу) та централізований (fleet digital twin+AI для координації кількох модулів і оптимізації на регіональному рівні). Ключовими технологіями, що забезпечують ефективне вирішення поставлених задач, є цифрові двійники, зокрема risk-informed digital twin, розроблений ORNL для BWRX-300, який забезпечує моделювання в реальному часі, прогнозування відмов і зниження простоїв на 20-40%; AI для предиктивного обслуговування з моніторингом пасивних систем безпеки та їх синхронізацією з цифровим двійником; високонадійні системи обробки даних і керування (DPCS) від Yokogawa, застосовані в проєкті Rolls-Royce SMR, що гарантують доступність на рівні 99,999 %; а також інтеграція відкритих протоколів IEEE 2030.5 та OpenADR для автоматизованого управління попитом (demand response, DR), балансування потужності в гібридних мікромережах і гнучкої взаємодії ММР з ВДЕ та системами накопичення енергії.

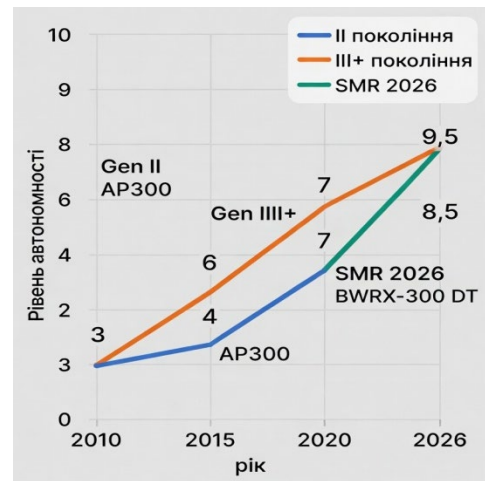
Таблиця 2. Вплив ключових технологій на показники ММР-систем

| Технологія                | Застосування                               | Переваги (2026 дані)                      | Зниження витрат/ризиків  |
|---------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| Digital Twin              | Real-time моделювання, HIL, прогноз відмов | Зменшення простоїв 20–40% (ORNL BWRX-300) | OPEX – 25 - 35%          |
| AI/ML + Predictive Maint  | Anomaly detection, autonomous regulation   | Load-following без оператора              | Maintenance costs - 30%  |
| Agentic AI / DPCS         | Fleet management, high availability        | 99.999% uptime (Yokogawa Rolls-Royce)     | Штат – 80 - 90%          |
| Кібербезпека (zero-trust) | Сегментація, AI-threat detection           | Захист від воєнних кіберзагроз            | Ризик інцидентів -50-70% |



**Рисунок 1 - Залежність ОРЕХ від рівня штату**

Крива експоненціального падіння витрат при переході до remote/autonomous ops (зниження на 30–50% за даними ORNL та Yokogawa 2026).



**Рисунок 2 - Тренд рівня автономності ММР (2010-2026)**

### Висновки

Автоматизація на базі цифрових двійників, AI та передових I&C перетворює ММР на інтелектуальні елементи децентралізованих систем, забезпечуючи безпеку, економічність та стійкість. В Україні проекти AP300/SMR-300 з Energoatom відкривають шлях до пілотів 2027–2030 рр. Очікуване зниження ОРЕХ на 25-40% та інтеграція з ENTSO-E роблять ММР стратегічним інструментом енергетичної незалежності. Подальший розвиток вимагає адаптації регуляторної бази, національних ДТ-платформ та посилення кібербезпеки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. IAEA (2024–2025). Small Modular Reactors: Advances in SMR Developments 2024 (оновлення ARIS database). IAEA Publication IAEA/PAT/008
2. Rolls-Royce SMR & Yokogawa Electric Corporation (2026). Strategic agreement for Data Processing and Control Systems (DPCS) in Rolls-Royce SMR fleet.
3. Oak Ridge National Laboratory (ORNL) research (2026). Risk-informed digital twin for GE Vernova Hitachi BWRX-300 SMR. Nuclear Science and Engineering / Taylor & Francis (опубліковано лютий 2026).
4. СТРЕМБИЦЬКИЙ, П., ЮХИМЧУК, М., ЛЕСЬКО, В., & ПЕРЕПЕЛИЦЯ, С. (2025). ЦЕНТРАЛІЗОВАНИЙ МОНИТОРИНГ ІНФРАСТРУКТУРИ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ THANOS: ПЕРСПЕКТИВИ ТА ВИКЛИКИ. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 347(1), 417-422.  
<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-57>
5. Гармонічна лінеаризація сау, що керується кінцевим автоматом під час дії параметричних збурень [Електронний ресурс] / М. С. Юхимчук-Войтко // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. - 2009. - № 3. - Режим доступу : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/150>.
6. Перепелиця С., Юхимчук М., Лесько В. (2025). Моделювання кіберфізичних систем управління в умовах негативних зовнішніх факторів. measuring and computing devices in technological processes, (1), 7–12.  
<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-1>
7. Yukhimchuk M. S., Moskvina S. M. Evaluation of the impact of uncontrolled parametric perturbations on stability of automatic systems with logical control units. Proceedings of SPIE. 2015. Volume 9816, Optical Fibers and Their Applications; 98161X (2015) <https://doi.org/10.1117/12.2229136>
8. Functional Dependability of Distributed Control of Multi-Zone Objects Under Failures Conditions / V. Dubovoi, M. Yukhimchuk, V. Kovtun, K. Grochla. IEEE Access. 2024. Vol. 12. pp. 95736–95749. DOI:10.1109/ACCESS.2024.3421380.
9. Quality Performance Criterion Model for Distributed Automated Control Systems Based on Markov Processes for Smart Grid. Wojcik, W.; Ormanbekova, A.; Jamanbayev, M.; Yukhymchuk, M.; Lesko, V. Appl. Sci. 2025, 15, 12917. <https://doi.org/10.3390/app152412917>

**Юхимчук Марія Сергіївна** – д-р техн. наук, професор кафедри комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [umcmasha@gmail.com](mailto:umcmasha@gmail.com)

**Лесько Владислав Олександрович** – канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [leskovlad@ukr.net](mailto:leskovlad@ukr.net)

**Горчук Юрій Анатолійович** – аспірант, кафедра комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Стрембицький Павло Павлович** – аспірант, кафедра комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Климчук Олександр Валерійович** – аспірант, кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Yukhimchuk Mariia Serhiivna** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Control Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: umcmasha@gmail.com

**Lesko Vladyslav Oleksandrovyh** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: leskovlad@ukr.net

**Horchuk Yurii Anatoliiovych** – PhD Student, Department of Computer Control Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

**Strembitskyi Pavlo Pavlovych** – PhD Student, Department of Computer Control Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

**Klymchuk Oleksandr Valeriiovych** – PhD Student, Department of Electrical Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia