

## РОЗРОБКА ДОРОЖНЬОЇ КАРТИ РОЗВИТКУ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

**Abstract.** The results of the modeling of a roadmap for the long term development of the nuclear energy system of Ukraine are presented. Schedule of new nuclear power capacities after 2030 was developed for all areas of nuclear fuel cycle. The conclusions about perspective directions for international cooperation of Ukraine are presented.

### Актуальність

У 2015 році міжнародною спільнотою підписано Паризьку кліматичну угоду [1] щодо регулювання заходів зі зменшення викидів діоксиду вуглецю з 2020 року. Метою документу являється утримання зростання середньої світової температури на рівні значно нижче  $+2^{\circ}\text{C}$  від доіндустріальних рівнів та збільшення здатності людства адаптуватися до негативних впливів зміни клімату, у тому числі, підтримка розвитку генерації з низькими викидами парникових газів. Відповідно до звіту МАГАТЕ «Зміна клімату та ядерна енергетика» за 2016 рік [2], країни зі значним використанням гідроенергетики (наприклад, Норвегія, де доля ГЕС у виробництві електроенергії складає 97%), ядерної енергетики (76% для Франції), або у разі комбінації даних двох типів генерації (наприклад, Швеція, де доля ГЕС та АЕС у виробництві електроенергії складає 38% та 59% відповідно) викиди  $\text{CO}_2$  значно нижчі ніж для інших країн економічної співдружності OECD ( $100 \text{ г } \text{CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{г}$  у порівнянні з  $418 \text{ CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{г}$  для країн OECD).

Україна займає 27 позицію у переліку країн з максимальним рівнем викидів  $\text{CO}_2$  (228,7 млн. тон у 2015 році), що може бути наслідком значної долі теплової генерації ТЕС на викопному паливі. Наявність АЕС у енергетичній системі України забезпечує зниження викидів  $\text{CO}_2$  на рівні 170 млн. тон щороку, що еквівалентно 1,5 – 2,9 млрд. долл. США у квотах ціни на викиди. Таким чином, АЕС являються фактором енергетичної та екологічної безпеки та елементом забезпечення зобов'язань України у рамках Паризької кліматичної угоди 2015 року.

Розпорядженням КМУ від 18.08.2017 № 605-р схвалено нову Енергетичну стратегію України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [3], яка визначає необхідність забезпечення виробництва електроенергії від АЕС на рівні 94 млрд.  $\text{kВт}\cdot\text{г}$ , що передбачає експлуатацію енергоблоку №3 ВП Хмельницька АЕС та будівництво нових енергоблоків замість 2,8 ГВт, що виводяться з експлуатації у період с 2030 по 2035 роки. На підставі припущень нової Енергетичної

стратегії у якості оптимістичного сценарію можливо розглядати заміщення новими енергоблоками АЕС потужності, що буде знято з експлуатації до 2040 року.

Розвиток ядерної енергетики потребує глибокої міжнародної співпраці у галузі ЯПЦ з метою забезпечення її економічної привабливості, а також умов безпечної та екологічної експлуатації АЕС. Таким чином, для забезпечення сталого розвитку ядерної енергетики існує необхідність детального визначення попиту на послуги ЯПЦ на довгостроковий період, що може бути виконано на основі детальної дорожньої карти.

### **Постановка задачі**

Системна оцінка потреб ядерної енергетики у послугах ЯПЦ до 2035 року та подальшу перспективу потребує розробки динамічної моделі ядерно-енергетичної системи (ЯЕС) України з визначенням взаємних зв'язків між сценаріями будівництва нових АЕС та розвитком відповідної послуги ЯПЦ. Необхідно забезпечити

- створення бази техніко-економічних даних енергоблоків АЕС та наявної інфраструктури ЯПЦ;
- врахування у моделі технологій ЯПЦ (у тому числі, потреби в урані, виготовленні свіжого ядерного палива з урахуванням можливості отримання палива різних постачальників, переробці відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), тощо);
- візуалізацію результатів розрахунків у графічному вигляді по роках на довільний період розгляду.

З метою врахування наявної ядерної інфраструктури України, розробка моделі ядерної енергетики на довгостроковий період проведено для оптимістичного сценарію з заміщенням 10,8 ГВт загальної потужності АЕС на рівні, що буде знято з експлуатації у період 2030 – 2040 років.

### **Вирішення задачі**

Розробку динамічної моделі ЯЕС України виконано у рамках проекту MAGATE ROADMAPS [4] з використанням шаблону, підготовленого на основі пакету Excel Microsoft – ROADMAPS-ExcelTool (ET). Модель ROADMAPS-ET являється гнучким, універсальним, максимально наближеним до потреб користувача продуктом з аналізу розвитку ЯЕС на національному, регіональному та глобальному рівні. ROADMAPS-ET не представляє собою комп'ютерну програму, але являється аналітичним інструментарієм у підтримці прийняття рішення на основі структурованої та уніфікованої бази даних з забезпечення стійкості ЯЕС. ROADMAPS-ET розроблено з урахуванням пропозицій Вірменії, Білорусії, Румунії, України та США. Модель передбачається використовувати у стратегічних плануваннях розвитку ЯЕС під егідою MAGATE та у національних дослідженнях з ЯПЦ. Специфічними особливостями ROADMAPS-ET являються:

- урахування практичного досвіду досліджень розвитку ЯЕС на

національному рівні країн-учасників МАГАТЕ з відображенням результатів планування на основі якісних (експертне припущення) та кількісних даних;

- узгодженість з наявними техніко-економічними базами даних МАГАТЕ та інших баз даних других провідних установ з технологій ЯПЦ (наприклад, PRIS, NFCIS, WNA, WISE-URANIUM);
- можливість відображення поточного стану та подальшої тенденції розвитку ЯЕС для досягнення стійкості ядерної енергетики до 2035 року або у подальшій перспективі;
- можливість модифікації моделі під потреби кінцевого споживача.

Інструмент ROADMAPS-ET включає в себе кілька структурних елементів, поєднаних загальною логікою для характеристики поточного стану та планів розвитку ЯЕС у довгостроковій перспективі, а також надавати необхідні дані та аналітичну підтримку експертів та осіб, що приймають рішення, з питань, пов'язаних із переходом на стабільну ядерну енергетику та пов'язані ЯПЦ:

- «Country profile» (профіль країни) – характеризує поточний економічний та енергетичний стан країни;
- «Keydevelopmentsandevents» (основні події та розвиток) – забезпечує побудову графіків, що відображають основні події, що передбачаються до впровадження в різні терміни для забезпечення переходу до стійкої ЯЕС;
- «Metrics» (метрики) – таблиця характеристик ЯЕС;
- «NFC material flows» (матеріальні потоки ЯПЦ) – відображає існуючий та запланований парк АЕС, вимоги до послуг з початкового та кінцевого країв ЯПЦ, наявність та плани щодо розгортання інфраструктури ЯПЦ, пропозиції для можливостей об'єктів ЯПЦ у зв'язку з розвитком даного типу АЕС у визначені терміни;
- «Aggregations» (агрегація) – побудова загальної дорожньої карти розвитку ЯЕС.

ROADMAPS-ET включає двадцять окремих табличних форм, які розділені на наступні основні секції: загальна інформація (профіль країни, метрики, ключові напрямки розвитку), ЯПЦ (парк енергоблоків АЕС, генерація електроенергії, видобування урану, конверсія, збагачення, виробництво свіжого ядерного палива, зберігання ВЯП, переробка ВЯП, геологічне захоронення ВЯП, моніторинг статусу), база даних з реакторів. Виходячи зі специфіки досліджень, забезпечена можливість формування додаткових табличних форм (наприклад, накопичення радіоактивних відходів, накопичення плутонію, тощо).

На основі інструментарію МАГАТЕ розроблено модель ROADMAPS-ET ядерної енергетичної системи України виходячи з оптимістичного сценарію будівництва нових енергоблоків АЕС замість тих, що буде знято з експлуатації у період до 2040 року.

Розробку моделі оптимістичного сценарію розвитку ЯЕС України

виконано з урахуванням [5] та наступних припущень:

- Розглядається відкритий ЯПЦ на основі енергоблоків ВВЕР-1000 та легко-водних енергоблоків покоління III+ встановленої потужності 1200 МВт;
- Реалізація продовження строку експлуатації наявного парку енергоблоків АЕС на 20 років;
- Будівництво заміщуючих нових енергоблоків АЕС сумарною встановленою потужністю 10,8 ГВт у період 2030 – 2040 років;
- Передбачається вивезення ВЯП енергоблоків ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 до іншої країни до початку експлуатації Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива (ЦСВЯП) у зоні відчуження ЧАЕС. Строк експлуатації ЦСВЯП – 100 років;
- Експлуатація сховища ВЯП на Запорізьській АЕС. Строк експлуатації – 50 років.

На рис. 1 представлено прогноз з загальної потужності АЕС, класифікації України відповідно до прийнятого оптимістичного сценарію розвитку ЯЕС та технологічного розвитку ЯПЦ на довгостроковий період.

Nuclear Energy Growth				
	c.y.	c.y. – 2030	2030 – 2050	2050 – 2100
Decreasing				<input checked="" type="checkbox"/>
Stabilization	<input checked="" type="checkbox"/>			
Small growth (below 0.1 GWe/year)				
Medium growth (0.1 - 0.5 GWe/year)		<input checked="" type="checkbox"/>		
Significant growth (>0.5 GWe/year)			<input checked="" type="checkbox"/>	

Nuclear Energy Size				
	c.y.	c.y. – 2030	2030 – 2050	2050 – 2100
No nuclear				
Small (0-10 GWe)				
Medium (10-50 GWe)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Large(>50 GWe)				

Country Group Classification				
General Classification				
	c.y.	c.y. – 2030	2030 – 2050	2050 – 2100
Holder				
User	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Newcomer				

GAINS Classification				
	c.y.	c.y. – 2030	2030 – 2050	2050 – 2100
NG1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
NG2				
NG3				

(а)

National Technology Options				
	c.y.	c.y. – 2030	2030 – 2050	2050 – 2100
Once-through nuclear fuel cycle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Recycle of SNF with only physical processing	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Limited recycling of spent fuel				
Complete recycle of spent fuel				
MA or MA & FP transmutation				
Final geologic disposal of all wastes				<input checked="" type="checkbox"/>

Access to Technology Options Abroad				
	c.y.	c.y. – 2030	2030 – 2050	2050 – 2100
Once-through nuclear fuel cycle	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Recycle of SNF with only physical processing	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Limited recycling of spent fuel				
Complete recycle of spent fuel				
MA or MA & FP transmutation				
Final geologic disposal of all wastes				<input checked="" type="checkbox"/>

(б)

Рис. 1. Класифікація України відповідно до сценарію розвитку ЯЕС (а) та технологічного розвитку ЯПЦ на довгостроковий період (б)

На період до 2030 року та подальшу перспективу для оптимістичного сценарію не передбачається суттєва зміна загальної встановленої потужності АЕС, яка у прийнятих припущеннях може знаходитись у діапазоні 10 – 50 ГВт. При цьому, прогнозований рівень будівництва нових енергоблоків у період 2030 – 2050 років може скласти до 0,5 ГВт/рік. Приймаючи до уваги

наявний досвід експлуатації АЕС та розвинену інфраструктуру ЯПЦ, за класифікацією МАГАТЕ [6] Україна відноситься до країн-користувачів ядерних технологій групи NG2 (NG1 – країни-власники технологій ЯПЦ, NG3 – країни, що не мають власної ЯЕС та передбачають можливість її розвитку у подальшому).

На рис. 2 наведено графік прогнозованої оцінки загальної встановленої потужності АЕС України на період до 2100 року з використанням моделі ROADMAPS-ET.

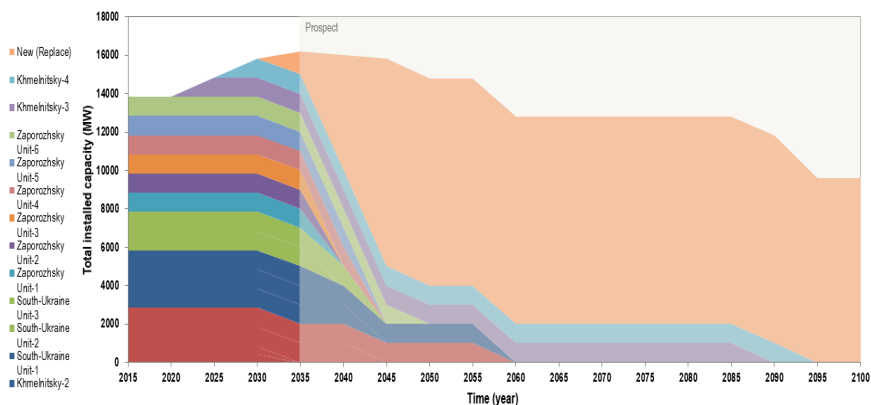


Рис. 2. Прогноз загальної встановленої потужності АЕС України на період до 2100 року

Враховуючи продовження терміну експлуатації енергоблоків АЕС на 20 років, у 2030 та 2031 роках буде завершено проектний термін експлуатації енергоблоків №1 та № 2 ВВЕР-440 Рівненської АЕС, а до 2035 року буде знято з експлуатації енергоблоки №1 - 2 Южно-Української АЕС. Загальна встановлена потужність енергоблоків АЕС України, які пропонується до введення в експлуатацію до 2035 року складе 2,8 ГВт. До 2040 року передбачається завершення проектного строку експлуатації з урахуванням продовження на 20 років для енергоблоків ВВЕР-1000 загальною встановленою потужністю 8 ГВт.

Розрахунки потреб у природному урані виходячи з загальної встановленої потужності АЕС по роках на весь період дослідження наведено на рис. 3. Враховано наявні запаси природного урану відповідно до даних ОЕСД [7], що складають 220,7 тис. тон, а також додаткові резерви урану на рівні 277,0 тис. тон. В даний час виробництво урану в Україні становить 800 тон / рік, що відповідає 30% від загальної потреби АЕС у ядерному паливі, яка складає 2 480 тон. / рік. При визначенні попиту на природний уран у моделі ROADMAPS-ET розглядається постачання ядерного палива з двох незалежних постачальників: АТ «ТВЕЛ» (РФ) та компанії Вестингауз (США). Прогнозні оцінки з потреби у природному урані показують наступне: для

виробництва ядерного палива Україна до 2055 року потребує придбаний на світовому ринку уран у припущенні, що при виробництві палива компанії Вестингауз не використовується уран з РФ. На підставі затвердженої розпорядженням КМУ від 9 листопада 2016 року №943-р державної цільової програми розвитку атомно-промислового комплексу України до 2020 року [8], яка передбачає повне забезпечення потреб АЕС у природному урані, з 2020 року потребу у урані з Російської Федерації може бути ліквідовано. При цьому, після виведення з експлуатації енергоблоків №2 Хмельницької АЕС та енергоблоку №4 Рівненської АЕС з використанням паливних збірок АТ «ТВЕЛ» (РФ) (використання палива з РФ на весь час експлуатації передбачено контрактами на будівництво даних енергоблоків) на рівні 2400 т / рік достатньо для виробництва палива компанії Westinghouse. Оцінки показують, що починаючи з 2060 року складаються умови з продажу 265 тон / рік природного урану на світовому ринку.

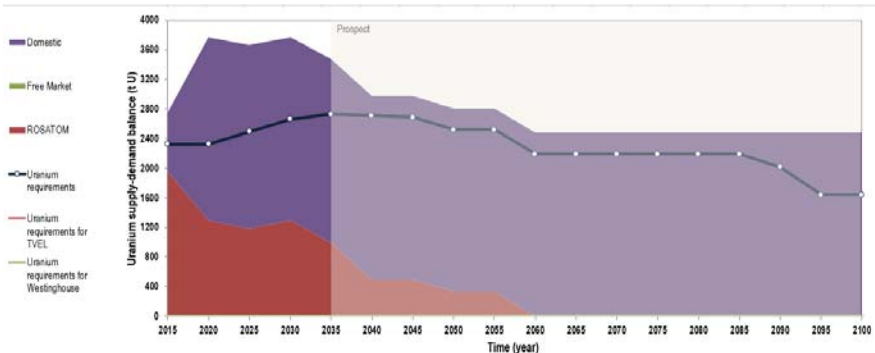


Рис. 3. Прогнозні оцінки з потреб АЕС України у природному урані

Щорічне вивантаження ядерного палива, яке використовувалося в ядерних реакторах України, складає 249 тон /рік. Для розробки моделі ЯЕС України з ROADMAPS-ET враховано наступні дані:

- загальна сумарна проектна ємність басейнів витримки (БВ) енергоблоків ВВЕР-1000 складає 3 349 тон важкого металу (ВМ);
- загальний об'єм ВЯП у БВ енергоблоків ВВЕР-1000 та ВВЕР-440 АЕС України – 2 050 тон ВМ та 133,87 тон ВМ на час проведення досліджень;
- для нових енергоблоків встановленої потужності 1200 МВт проектна ємність басейнів витримки приймається 732 тон ВМ.

Результати прогнозів з накопичення ВЯП та оцінка потреб у додаткових об'ємах довгострокових сховищ ВЯП з метою забезпечення стійкості ЯЕС України представлено на рис. 4. Враховуючи, що строк витримки ВЯП у БВ після вивантаження з активної зони енергоблоків АЕС складає не менше п'яти років, прогнозується необхідність у додаткових об'ємах сховищ ВЯП з 2050 року.

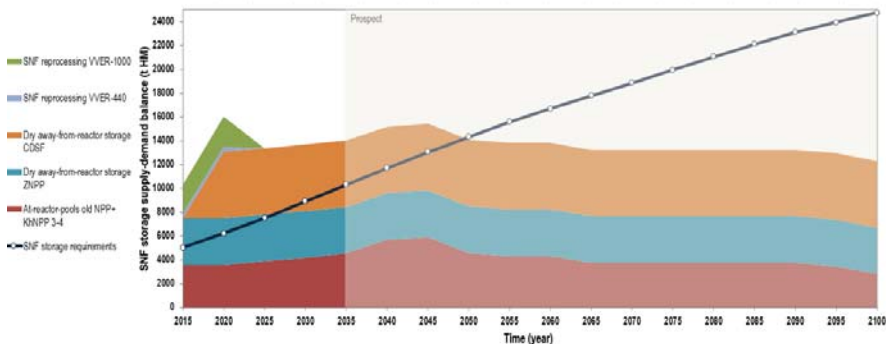


Рис. 4 Прогноз з накопичення ВЯП

Розробка дорожньої карти з використанням моделі МАГАТЕ ROADMAPS-ET дозволяє визначити основні наступні напрямки розвитку міжнародної кооперації України для забезпечення стійкості ЯЕС, які в цілому будуть пов'язані з отриманням ядерного палива та відповідних послуг з поводження з ВЯП, а саме

- подальша диверсифікація постачальників свіжого ядерного палива;
- реалізація заходів з розширення об'єму довгострокових сховищ ВЯП або будівництво геологічного захоронення ВЯП після 2050 року.

### Висновки

Планування розвитку ядерної енергетики України потребує комплексного аналізу, який включає розгляд всіх напрямків ЯПЦ. Приймаючи до уваги значні витрати на розвиток ядерної інфраструктури на національному рівні, сталий розвиток ЯЕС України стає можливим у разі наявності безперервного доступу до відповідних послуг ЯПЦ, послуг з виготовлення ядерного палива, зберігання або захоронення ВЯП. Застосування розрахункових засобів МАГАТЕ дозволяє виконати кількісний та якісний аналіз ЯЕС з візуалізацією результатів та визначенням відповідних дефіцитів у послугах ЯПЦ.

Створена на основі моделі МАГАТЕ ROADMAPS-ET дорожня карта розвитку ЯЕС України являється динамічним засобом прогнозування перспективного розгортання ЯПЦ України та дозволить розробити довгострокову програму розвитку ядерної енергетики України відповідно до вимог Нової Енергетичної стратегії до 2035 року.

1. Adoption of the Paris Agreement. UN FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1 (2015). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>
2. Climate change and nuclear power (2018) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/13395/Climate-Change-and-Nuclear-Power-2018>

3. Енергетична стратегія України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Розпорядження КМУ від 18.08.2017 No. 605-г
4. IAEA A project develops road mapping tool for future nuclear energy systems (2018) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-project-develops-roadmapping-tool-for-future-nuclear-energy-systems>
5. [http://www.energoatom.kiev.ua/files/file/itogi\\_06\\_2018.pdf](http://www.energoatom.kiev.ua/files/file/itogi_06_2018.pdf)
6. Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability: Final Report of the INPRO Collaborative Project GAINS. – Vienna: IAEA, 2013. – 271 p. – (IAEA Nuclear Energy Series. No. NP-T-1.14).
7. Uranium 2014: Resources, Production and Demand (2014). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2014/7209-uranium-2014.pdf>
8. Про схвалення Концепції Державної цільової економічної програми розвитку атомно-промислового комплексу на період до 2020 року Кабінет Міністрів України (2016) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npras/249592822>

*Поступила 1.10.2018р.*

УДК 004.896

С.В. Сушко, Київ

О.А. Чемерис, Київ

## **ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБЧИСЛЕНЬ НА РІЗНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ**

**Abstract.** The article reviews green computing issues. For the green computing purpose two different computing systems are compared by the energy efficiency factor. Measurements of the execution time and energy consumption are performed for the set of the test programs. Results of the measurements and comparison of the energy efficiency are provided.

### **Актуальність**

Розвиток обчислювальних систем головним чином спрямований на збільшення обчислювальної потужності та швидкодії. Водночас важливим критерієм обчислювальних систем є їх енергоспоживання [1].

Енергоспоживання є важливим параметром різноманітних обчислювальних систем. Для серверних обчислювальних систем, GRID систем енергоспоживання важливе з точки зору суттєвого збереження коштів на електроенергію, як внаслідок прямого розсіювання тепла, так і втрат на кондиціонування приміщень. Мобільні обчислювальні системи, що є більш енергоефективними, довше працюють від елементів живлення і, таким чином, довше виконують обчислювальні задачі.

У різноманітних обчислювальних системах використовуються як апаратні так і апаратно-програмні засоби зниження енергоспоживання під час