

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 622.232

**С.В. ШУЛЬЖЕНКО**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.  
Інститут загальної енергетики НАН України,  
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03680, Україна

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ АЕС В МАНЕВРЕНОМУ РЕЖИМІ

*В статті наведено аналіз впливу використання АЕС в маневреному режимі на техніко-економічні показники виробництва нею електроенергії. Очікуване в Україні підвищення долі генеруючих потужностей, що використовують відновлювані джерела, зокрема, вітрових та фотоелектричних станцій, які генерують нестабільну електричну потужність, зумовлює підвищення вимог до покриття маневрової частини графіка електричних навантажень національної Об'єднаної енергосистеми, що вимагає наявності додаткових маневрених потужностей. Впровадження маневрених режимів експлуатації АЕС, які відповідно до проекту передбачалось використовувати в номінальному режимі, є усталеною практикою, наприклад, в Німеччині та Франції і може бути застосовано і в Україні. З використанням детерміновано-стохастичного методу здійснена оцінка собівартості виробництва електроенергії в маневреному режимі для АЕС, які наразі використовуються в Україні, так і для перспективних АЕС середньої потужності.*

*Ключові слова:* атомна електростанція, математична модель, стохастична змінна, національна енергосистема.

Переважаюча більшість реакторних установок існуючих в світі АЕС були спроектовані для роботи в базовому режимі генерації електричної потужності. Крім суто особливостей проекту, доцільність експлуатації АЕС в базовому режимі зумовлена також такими двома головними чинниками:

– економічна привабливість – генерація електроенергії в базовому (номінальному) режимі забезпечує максимальний обсяг її виробництва, а також стабільну роботу технологічного обладнання АЕС, що об'єктивно підвищує надійність та тривалість терміну його

використання, а отже ці два чинники позитивно впливають на зменшення собівартості виробництва електроенергії;

– безпека експлуатації – оскільки за умов роботи АЕС в базовому режимі експлуатуючому персоналу протягом паливної кампанії необхідно лише контролювати «статичну» стабільність показників роботи обладнання, що є набагато простішим, ніж здійснювати змінні режими, для реалізації яких необхідно контролювати зміну багатьох показників в динаміці, то він є максимально безпечним.

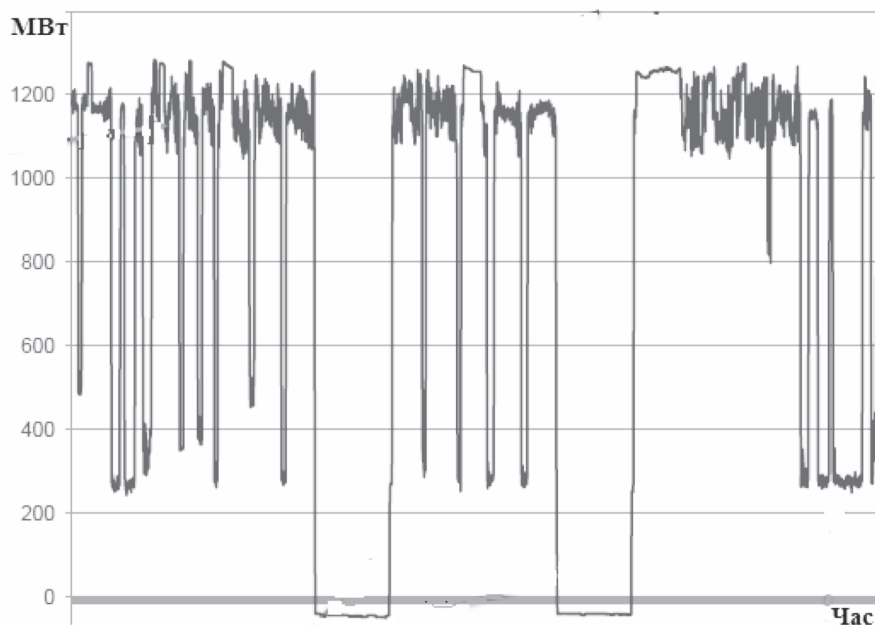
Необхідність реалізовувати маневрені режими експлуатації АЕС зумовлена єдиною причиною – наявним або очікуваним дефіцитом

© С.В. ШУЛЬЖЕНКО, 2016

маневрених неядерних генеруючих потужностей в національній енергосистемі, який неможливо або недоцільно усунути введенням в експлуатацію додаткових неядерних потужностей, або за рахунок перетоків потужності сусідніх енергосистем. В Європі маневрені режими експлуатації АЕС широко використовуються в Німеччині та Франції [1], при цьому причини, що спонукали до реалізації такого рішення, були дещо різні. У Франції дефіцит маневрених потужностей зумовлений значною часткою АЕС в структурі генерації електроенергії, щорічно приблизно 75% електроенергії генерується на АЕС, і практичною неможливістю вирішити питання достатньої забезпеченості маневреними потужностями за рахунок ТЕС на органічному паливі через незначні доступні внутрішні поклади органічних енергоресурсів і міркування національної енергетичної безпеки. В Німеччині тривалий час реалізується політика суттєвої підтримки розвитку відновлюваних джерел енергії, зокрема, вітрових та фотоелектричних станцій, підключених до національної енергосистеми, які є додатковим джерелом нестабільності частоти та потужності в ній, і хоча основними маневреними потужностями є теплові електростанції на органічному паливі (переважно кам'яному

вугіллі) [2], атомні електростанції обмежено беруть участь в добовому регулюванні частоти та потужності [1]. В Швеції, в очікуванні суттєвого зростання встановленої потужності вітрових електростанцій, здійснені дослідження [4] щодо опиту роботи АЕС в Європі у маневрених режимах, а також реалізовані практичні експерименти з добового зниження потужності АЕС до 60% від номінальної потужності, несення цього навантаження протягом 6 годин і потім повернення до 100% номінальної потужності [5]. Експерименти засвідчили практичну можливість роботи АЕС Швеції в такому режимі протягом декількох діб.

Найбільший практичний досвід експлуатації енергоблоків АЕС в маневреному режимі має Франція, де він реалізується з середини 70-х років XX ст. Результати свідчать про можливість безпечної експлуатації енергоблоків PWR в маневреному режимі з розвантаженням до 20% номінальної потужності та із зупинками на вихідні (рис. 1 [3]), хоча реалізація такого режиму має низку важливих особливостей. Фізико-технічні показники експлуатації енергоблока, зокрема, темпи набору або зниження потужності, залежать від умов експлуатації енергоблока в попередній період – протягом попередньої доби і навіть довше, тому для всіх



**Рис. 1.** Графік генерації потужності АЕС Golfech PWR-1300 МВт (Франція) протягом червня 2013 року [3]

енергоблоків централізовано на рівні експлуатуючої організації, у Франції це компанія Electricite de France, заздалегідь розробляються відповідні режимні карти, яких суворо дотримується операційний персонал кожної АЕС. В черговій зміні АЕС присутній окремий спеціаліст, який детально обізнаний з регламентами реалізації режимних карт, і який відповідальний і за необхідності здійснює зміну їх реалізації для забезпечення безпеки і надійності роботи енергоблока. Оскільки регулювання потужності реактора здійснюється, зокрема, шляхом регулювання заглиблення в реактор аварійної регулюючої касети (control rod) та вимагає змінного потоку охолоджуючої рідини, то це зумовлює додаткове навантаження на виконавчі механізми енергоблока, що веде до додаткових витрат на їх діагностику та за необхідності на ремонт, і відповідно збільшує умовно-постійні витрати.

Очікуване широке впровадження відновлюваної енергетики в національні енергосистеми зумовлює дослідження, спрямовані на розробку нових атомних реакторів, які відповідно до проектних рішень здатні маневрувати в широкому діапазоні. Протягом наступних 10–20 років очікується комерціалізація атомних енергоблоків середньої та малої потужності, які здатні брати участь у вторинному регулюванні потужності енергосистеми. Наприклад, компанія Westinghouse розробила модульний реактор потужністю 225 МВт(е) (Small Modular Reactor SMR-225), здатний працювати як в базовому, так і в маневровому режимі, причому проектна глибина розвантаження становить до 20% від номінальної потужності, що, зокрема, більше, ніж у вугільній ТЕС. На сьогодні впроваджені таких реакторів нема, але конкурент Westinghouse – компанія NuScale(США) планує побудувати першу АЕС з реакторами власного виробництва потужністю 50МВт(е) і схожими характеристиками до 2023 р.

В Україні перше дослідження роботи АЕС в режимі добового регулювання потужності було здійснено в 2006 р. на енергоблоці ВВЕР-1000 №2 Хмельницької АЕС і відновлено в 2015 р. За інформацією Держатомрегулювання України [6] в період з 21.04.2015р. по 11.05.2015р. реалізовано 21 цикл зміни потужності реакторної установки відповідно до вимог експлуатаційної документації, за таким

графіком:

- розвантаження зі 100% до 75% номінальної потужності енергоблока і подальша робота за цієї потужності протягом 6–12 годин;
- підвищення потужності до 100% і робота на потужності 100% від номінальної протягом 12–18 годин.

Таким чином, маневрений режим експлуатації АЕС очікувано в майбутньому стане нормою, що вимагає врахування цієї особливості в моделях розвитку національної атомної енергетики. В сучасних ринкових умовах функціонування національної енергетики найважливішим показником ефективності технології генерації електроенергії є її собівартість, яка прямо залежить від фінансових витрат на будівництво, комерційну експлуатацію, виведення з експлуатації та нейтралізацію відходів виробництва і обернено залежить від обсягів виробництва (постачання) електроенергії протягом життєвого циклу технології. Оскільки генерація електричної потужності АЕС, що працює у маневровому режимі, не є константою, а змінюється відповідно до поточних потреб графіка електричних навантажень ОЕС, тобто є стохастичною змінною, то для коректного врахування обсягів генерації електроенергії протягом життєвого циклу доцільно, як і для будь-якої маневреної генеруючої потужності, наприклад, ТЕС на органічному паливі, використовувати детерміновано-стохастичний метод [7]. Обчислення собівартості виробництва електроенергії на АЕС за життєвий цикл ( $C_{NPP}^{LCOE}$ , дол. США/МВт·год) здійснено за такою формулою:

$$C_{NPP}^{LCOE} = \frac{C^{LCC}}{E^{LC}}, \quad (1)$$

де  $C^{LCC}$  – витрати на виробництво електроенергії за життєвий цикл, які вимірюються в грошових одиницях (дол. США), причому номінальна вартість грошей відповідає першому етапу комерційної експлуатації АЕС,  $E^{LC}$  – обсяг відпуску електроенергії з шин АЕС протягом життєвого циклу, МВт·год.

Складові формули (1) визначались за формулами

$$C^{LCC} = \sum_{\tau=1}^n \frac{C_{\tau}^{K\wedge C}}{(1+r)^{\tau}} + \sum_{\tau=n+1}^{T+n} \frac{C_{\tau}^{M\wedge I} + C_{\tau}^I - C_{\tau}^{V'}(f)}{(1+r)^{\tau-n-1}} + \sum_{\tau=T+n+1}^{T+n+m} \frac{C_{\tau}^3}{(1+r)^{\tau-n-1}}, \quad (2)$$

де  $n$  – термін будівництва електростанції з моменту початку вкладення перших інвестицій і до часу її пуску в комерційну експлуатацію, років;  $\tau$  – етап життєвого циклу, рік;  $T$  – термін комерційної експлуатації електростанції, років;  $m$  – термін виводу електростанції з експлуатації, років;  $r$  – значення дисконту, долі;  $C_{\tau}^{V'}(f)$  – умовно-змінні виробничі витрати для відповідного етапу комерційної експлуатації електростанції, які визначаються як функція від режиму роботи АЕС протягом етапу, причому режим ( $f \in F$ ) є випадковою величиною з множини всіх доступних, дол. США;  $C_{\tau}^{K\wedge C}$  – капіталовкладення в електростанцію без урахування залучених кредитних коштів для відповідного етапу, дол. США;  $C_{\tau}^{M\wedge I}$  – умовно-постійні витрати без урахування сплати відсотків за користування кредитними коштами, дол.

США ( $C_{\tau}^{M\wedge I} = \sum_{d=1}^{365} C_{\tau}^N a_d^f$ , де  $d$  – доба відповідного

етапу життєвого циклу,  $C^N$  – умовно постійні витрати при використанні АЕС в номінальному режимі протягом доби (дол. США),  $a_d^f$  – коефіцієнт збільшення умовно-постійних витрат відповідно до маневреного режиму експлуатації АЕС протягом доби відповідного етапу, долі);  $C_{\tau}^I$  – сума сплати відсотків за користування кредитними коштами для відповідного періоду;  $C_{\tau}^3$  – витрати фінансових ресурсів на зняття АЕС з експлуатації.

Обсяг електроенергії, яку виробляє АЕС протягом її комерційної експлуатації ( $E^{LC}$ , МВт·год), визначається за такою формулою:

$$E^{LC} = \sum_{\tau=n+1}^{T+n} \sum_{d=1}^{365} E^N b_d^f, \quad (3)$$

де  $E^N$  – обсяг відпуску електроенергії з шин АЕС при її використанні протягом доби в номінальному режимі, МВт·год/доба;  $b_d^f$  – коефіцієнт зменшення обсягу відпуску електроенергії з шин АЕС при її використанні в маневреному режимі.

Використання цього методу передбачає формування можливих добових режимів використання встановленої потужності і стохастичне, з використанням наперед заданих ймовірностей обчислення обсягу виробництва електроенергії та умовно-постійних витрат для кожної доби використання АЕС протягом її комерційної експлуатації. Передбачається, що протягом кожної доби, робочого чи вихідного

Таблиця 1 – Режими експлуатації існуючих енергоблоків АЕС України

Режим (Р – робочий, В – вихідний день)	Потужність генерації електроенергії (% від номінальної) відповідно до часового періоду доби								Р, ймовірність	$a_d^f$
	0 – 3	3 – 6	6 – 9	9 – 12	12 – 15	15 – 18	18 – 21	21 – 24		
№1Р	65%	75%	85%	100%	100%	85%	75%	65%	0.5	1.1
№2Р	75%	75%	85%	100%	100%	85%	75%	75%	0.3	1.05
№3Р	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0.2	1
№1В	50%	50%	50%	65%	75%	75%	65%	50%	0.7	1.1
№2В	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	0.3	1.05

дня, АЕС може використовуватись лише в одному з можливих режимів, який вибирається відповідно до екзогенно заданих ймовірностей (табл. 1 та 2 стовпчик – Р, ймовірність) з використанням стохастичної змінної, розподіленої за рівномірним законом.

Для існуючих в Україні енергоблоків АЕС, за припущенням освоєння персоналом маневрених режимів їх експлуатації, для розрахунків використано базовий режим генерації потужності, а також декілька маневрених (табл. 1), які з огляду на відсутність досвіду є консервативними відносно тих, що використовуються

на АЕС Франції. Для перспективних АЕС середньої потужності за проектами Westinghouse [8] та NuScale [9] передбачено маневрування в більш широкому діапазоні (табл. 2).

Для перспективних реакторів середньої потужності питомі капіталовкладення в генеруючі потужності оцінені в діапазоні 2500 – 4000 дол. США/кВт(е), проектний термін їх експлуатації – 50 років. Паливна складова оцінена відповідно до досліджень, здійснених Міжнародною енергетичною агенцією в 2005 р. [10] (табл. 3).

**Таблиця 2 – Режими експлуатації перспективних АЕС середньої потужності за проектами Westinghouse та NuScale**

Режим (Р – робочий, В – вихідний день)	Потужність генерації електроенергії (% від номінальної) відповідно до часового періоду доби								Р, ймовірність	$a_d^f$
	0 – 3	3 – 6	6 – 9	9 – 12	12 – 15	15 – 18	18 – 21	21 – 24		
№1Р	65%	75%	85%	100%	100%	85%	75%	65%	0.5	1.1
№2Р	25%	45%	65%	85%	100%	85%	65%	45%	0.3	1.05
№3Р	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0.2	1
№1В	25%	25%	45%	65%	85%	65%	45%	25%	0.7	1.1
№2В	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	0.3	1.05

**Таблиця 3 – Вхідні дані для розрахунку паливної складової перспективних реакторів середньої потужності**

Показник	Одиниці виміру	Мінімальне значення	Максимальне значення
Вартість видобування $U_3O_8$	дол.США/ кг $U_3O_8$	20	100
Вартість конверсії сировини	дол.США/ кг U	3	8
Вартість збагачення	дол.США/ кг U	80	120
Вартість виготовлення тепловиділяючих зборок (ТВЗ)	дол.США/ кг ТВЗ	200	300
Вартість середньострокового зберігання відпрацьованого палива	дол.США/ кг ТВЗ	100	300
Вартість захоронення відпрацьованого палива	дол.США/ кг	300	600

Виконані розрахунки свідчать про те, що використання існуючих в Україні енергоблоків АЕС в маневрених режимах веде до зростання собівартості відпущеної електроенергії на 25 – 35%. Оскільки собівартість виробництва базової електроенергії всіма існуючими блоками, які експлуатуються НАЕК «Енергоатом», за оцінками автора, становить 30 – 35 дол. США/МВт·год, то переведення блоків в маневрений режим збільшує собівартість до 37,5 – 47,25 дол. США/МВт·год.

Для перспективних типів реакторів, оскільки режими маневрування ними передбачають більш глибоке розвантаження, що в порівнянні із базовим режимом їх використання веде до суттєво менших обсягів відпуску електроенергії, зростання собівартості є ще більшим – 35 – 50%. Через відсутність реалізованих проєктів будівництва і комерційної експлуатації реакторів середньої потужності неможливо достатньо точно оцінити собівартість виробництва ними електроенергії, тому для перспективних реакторів оцінена в цьому дослідженні собівартість електроенергії, виробленої в базовому режимі, може трактуватись лише як орієнтовна (50 – 65 дол. США/МВт·год), а переведення АЕС в маневрений режим її використання веде до збільшення собівартості до 67 – 97 дол. США/МВт·год. Таким чином, використання як існуючих, так і перспективних АЕС в маневрених режимах за показником собівартості зумовлює їх потенційну конкурентоздатність по відношенню до ТЕС на органічному паливі, зокрема, вугільних, що в перспективі може призвести до збільшення частки АЕС в структурі генеруючих потужностей національних енергосистем.

### Висновки

1. Необхідність реалізовувати маневрені режими експлуатації АЕС об'єктивно зумовлені головним чином наявним або очікуваним дефіцитом маневрених неядерних генеруючих потужностей в національній енергосистемі, який неможливо або недоцільно усунути введенням в експлуатацію додаткових неядерних потужностей, або за рахунок перетоків потужності сусідніх енергосистем, а також реалізацією політики підтримки розвитку відновлюваних джерел енергії, що веде до зростання частки вітрових та фотоелектричних станцій, підключених до національної енергосистеми, і

які є додатковим джерелом нестабільності частоти та потужності в ній.

2. Практично всі країни Європи з розвинутою атомною енергетикою, включаючи Україну, здійснили практичні експерименти експлуатації АЕС в маневрених режимах, а Франція експлуатує власні АЕС в маневрених режимах з глибоким, до 20% розвантаженням від номінальної потужності і навіть зупинками, з середини 70-х років ХХ ст. Накопичений досвід Франції, а також виконані експерименти в інших країнах свідчать про те, що використання АЕС в маневрених режимах є загалом безпечним, що дає змогу отримати додатковий маневрений резерв у національній енергосистемі.

3. Використання АЕС у маневрених режимах веде до зменшення корисного відпуску електроенергії, а також зростання умовно-постійних витрат, що в залежності від режимів маневрування зумовлює зростання собівартості відпущеної електроенергії на 25 – 50%. Для існуючих АЕС України, експлуатацію яких здійснює НАЕК «Енергоатом», собівартість відпущеної електроенергії АЕС, що експлуатуються в маневреному режимі, оцінено в 37,5 – 47,25 дол. США/МВт·год. У випадку експлуатації перспективних АЕС середньої потужності за проєктами Westinghouse та NuScale в маневрених режимах собівартість електроенергії оцінена в діапазоні 67 – 97 дол. США/МВт·год.

4. Використання як існуючих, так і перспективних АЕС у маневрених режимах за показником собівартості зумовлює їх потенційну конкурентоздатність по відношенню до ТЕС на органічному паливі, зокрема, вугільних, що в перспективі може призвести до збільшення частки АЕС в структурі генеруючих потужностей національних енергосистем.

1. *Technical and Economic Aspects of Load Following with Nuclear Power Plants* – Nuclear Energy Agency, OECD, 2011. – 53 с. – (Препринт / Nuclear Energy Agency, OECD, 2011).
2. *Stromproduktion in Deutschland* [Електронний ресурс] / Fraunhofer Energy Charts - Режим доступу: [https://energy-charts.de/power\\_de.htm](https://energy-charts.de/power_de.htm).
3. *Load Following EDF Experience Feedback* [Електронний ресурс] / IAEA Technical

Meeting – Load Following Sept 4–6, 2013, Paris. – Режим доступу: [https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-09-04-09-06-TM-NPE/8.feutry\\_france.pdf](https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-09-04-09-06-TM-NPE/8.feutry_france.pdf).

4. *Additional Costs for Load-following Nuclear Power Plants. Experiences from Swedish, Finnish, German and French nuclear power plants – Elforsk rapport 12:71, December 2012.* – 66 с. – (Препринт / SvenskaElforetagensForskning – OchUtvecklings – Elforsk – AB, December 2012).

5. *Economicas pectson Flexible Production and the Nordic Market. Flexible Operation Approaches for Nuclear Power Plants* [Електронний ресурс] / IAEA Technical Meeting – Load Following Sept 4–6, 2013, Paris. – Режим доступу: [https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-09-04-09-06-TM-NPE/18.henriksson\\_sweden.pdf](https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-09-04-09-06-TM-NPE/18.henriksson_sweden.pdf).

6. *Впровадження режиму добового регулювання потужності на енергоблоках АЕС України* [Електронний ресурс]. Державна інспекція атомного регулювання України. – Режим доступу: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/uk/publish/article/320023>.

7. *Шульженко С.В.* Особливості розрахунку вартісних показників у задачах прогнозування розвитку електроенергетичних систем за ринкових умов їх функціонування / С.В. Шульженко // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – № 18. – С. 16–20.

8. *Wstinghouse Electric Company* [Електронний ресурс]. The Westinghouse SmallModular Reactor. – Режим доступу: <http://www.westinghousenuclear.com/New-Plants/Small-Modular-Reactor>.

9. *NuScale Power – SMR Nuclear Tecnology*[Електронний ресурс] / NuScale Technology Overview. – Режим доступу: <http://www.nuscalepower.com/our-technology/technology-overview>.

10. *Projected Costsof Generating Electricity 2005 Update.* [Електронний ресурс]. OECD/IEA, 2005. – 233 р. – Режим доступу: <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2005/5968-projected-costs.pdf>.

*Надійшла до редколегії 15.03.2016*