

**УРАХУВАННЯ РИЗИКУ НЕВИКОРИСТАНИХ
МОЖЛИВОСТЕЙ ПІД ЧАС ОБҐРУНТУВАННЯ
ОПТИМАЛЬНОГО СЦЕНАРІЮ ВВЕДЕННЯ НОВИХ
АГРЕГАТИВ НА ГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНИХ
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ В УКРАЇНІ**

Д.В. СТЕФАНИШИН

Анотація. Розглянуто завдання обґрунтування оптимального сценарію введення нових потужностей гідроенергії на гідроакумуляційних електростанціях (ГАЕС) в Україні згідно з прийнятою урядом Програмою розвитку гідроенергетики на період до 2026 р., у якій передбачено добудову і прийняття в експлуатацію чергових агрегатів на Дністровській і Ташлицькій ГАЕС, а також будівництво Канівської ГАЕС. Запропоновано вирішення поставленого завдання на підставі попарного порівняння альтернатив за критерієм мінімального сукупного ризику з урахуванням ризику невикористаних можливостей, де як розрахункові характеристики, за якими формувалися складові сукупних ризиків альтернатив, приймалися енергетичні показники різних варіантів введення агрегатів та їх вартість. Показано принципову можливість вибору оптимального сценарію введення нових агрегатів на ГАЕС в Україні з меншим сукупним ризиком порівняно з іншими можливими сценаріями.

Ключові слова: альтернатива, гідроакумуляційна гідроелектростанція, оптимізація, попарне порівняння, прийняття рішень, ризик невикористаних можливостей, сукупний ризик, сценарій.

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку електроенергетики гідроакумуляційні електростанції (ГАЕС) розглядаються як найбільш ефективні джерела регулювання навантажень в об'єднаних енергетичних системах (ОЕС) в контексті забезпечення стійкості, живучості, надійності і безпеки ОЕС, особливо в країнах з великою часткою теплової і, зокрема, атомної енергетики [1–3], до яких належить і Україна [1].

На відміну, наприклад, від гідроелектростанцій (ГЕС) або високоманеврених газотурбінних установок, ГАЕС поряд з регулюванням здатні забезпечувати ефективну акумуляцію надлишкової енергії (табл. 1) (частка ГАЕС становить понад 99% від ємності акумуляторів усіх типів [4]), здійснюючи таким чином подвійне регулювання потужності в ОЕС (табл. 2). Це стиму-

лює будівництво ГАЕС у світі, у тому числі і в тих країнах, у яких значна увага приділяється пришвидшеному розвитку нетрадиційних (альтернативних) технологій вироблення електроенергії, зокрема і тих, що використовують інші відновлювані джерела енергії (вітрові, геотермальні, сонячні електростанції тощо).

Таблиця 1. Коефіцієнт корисної дії (ККД) різних технологій акумуляції електроенергії [2]

Технологія акумуляції електроенергії	ККД, %
Літій-іонні акумулятори	90...95
Свинцево-кислотні акумулятори	80...90
Гідроакумуляція (ГАЕС)	75...80
Ванадієві відновно-окиснювальні акумулятори	~ 75
Нікель-кадмієві, нікелеві металогідридні акумулятори	70
Повітряно-компресорні акумулятори адіабатичної дії	< 70
Повітряно-компресорні акумулятори	42...54
Водневі акумулятори	< 40

Таблиця 2. Порівняльна характеристика маневрених якостей основних типів електростанцій [1]

Тип електростанцій	Технічний мінімум навантаження, % (відношення мінімальної допустимої потужності до встановленої)	Діапазон регулювання, %	Час набору повної потужності, хв	
			Після зупинки	Із «гарячого» стану
Атомні	85...90	10...15	390...660	60
Теплові (вугілля, мазут)	70...80	20...30	90...180	20...50
Газотурбінні	0	100	15...30	0,5
ГЕС	0	100	1...2	0,25...0,5
ГАЕС	0	200	1...2	0,25...0,5

На 2011 р. за даними праці [4] загальна потужність ГАЕС у світі досягла 127 ГВт. Найбільша частка встановленої потужності ГАЕС — у країнах Європейського союзу (ЄС), яка на 2009 р. складала 38,3 ГВт (36,8% від світової) при 140 ГВт загальної потужності від гідрогенерації і майже 5% від потужності всіх електростанцій ЄС [5].

У світі налічується понад 460 великих ГАЕС, 63 з яких мають установлену потужність у турбінному режимі 1000 МВт і більше, ще дев'ять — добудовуються. В Україні натеper працює три ГАЕС: Київська (234,5 МВт у турбінному режимі і 120 МВт — у насосному) — перша в Україні і на території країн бувшого СРСР, яку введено в експлуатацію ще в 1972 р. [6]; експлуатуються три агрегати на Дністровській (загальною потужністю в турбінному режимі 972 МВт і насосному — 1263 МВт) і два агрегати на Ташлицькій ГАЕС (302 МВт у турбінному режимі та 633 МВт — у насосному). Основними їх функціями є регулювання частоти і графіка навантажень в ОЕС країни, формування аварійного резерву електроенергії. У Програмі

розвитку гідроенергетики на період до 2026 р. [7], яку схвалено Кабінетом Міністрів України в липні 2016 р., розглядається добудова Дністровської ГАЕС з уведенням в експлуатацію ще чотирьох агрегатів, після чого вона має стати шостою за потужністю ГАЕС у світі (2268 МВт), добудова Ташлицької ГАЕС з уведенням в експлуатацію чергових чотирьох агрегатів з доведенням її потужності в турбінному режимі до 906 МВт, а також будівництво Канівської ГАЕС з установленою потужністю в турбінному режимі 1000 МВт.

ЗАГАЛЬНА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЙОГО ФОРМАЛІЗАЦІЯ ТА МЕТА РОБОТИ

Будівництво та експлуатація гідроенергетичних об'єктів, як показує практика, пов'язуються зі значним ризиком [8–11], детальний аналіз, адекватна кількісна оцінка і належне врахування якого під час прийняття рішень являє собою надзвичайно складну міждисциплінарну проблему [10, 12–16].

Усі можливі ризики будівництва і експлуатації ГЕО (ГЕС, ГАЕС) важко передбачити й ідентифікувати, адже і характер, і масштаб більшості впливів навколишнього середовища на об'єкти і об'єктів на довкілля, якісні і кількісні ефекти і наслідки, які так чи інакше реалізуються в майбутньому, тією чи іншою мірою є невизначеними або стохастичними. Можна стверджувати, що остаточного вирішення завдання аналізу, оцінювання і врахування всіх ризиків для кожного такого об'єкта незалежно від місця його розташування, складу гідроспруд, їх параметрів, гідроенергетичних показників тощо досягнути неможливо, хоча б тому, що цілі різних природокористувачів, економічні і соціально-екологічні пріоритети суспільства, місцевих общин, а також техніко-економічні та екологічні критерії й обмеження постійно змінюються в часі.

Тому національні стратегії більшості країн світу щодо розвитку потенційно небезпечних технологій, до яких, безумовно, належить і гідроенергетика, в контексті забезпечення їх екологічної і техногенної безпеки, орієнтуються на концепцію прийнятних, а не «нульових» ризиків [10, 16, 17]. При цьому принципова неможливість досягнення «нульового» ризику може зумовлюватися і тим, що відмова від потенційно небезпечної діяльності (наприклад, від будівництва ГАЕС) теж може бути обтяжена ризиком — ризиком невикористаних (або ж утрачених) можливостей [18].

Іншою концепцією, на яку можна спиратися під час керування безпекою складних технічних систем і технологій з урахуванням ризику, є концепція розумно досяжного низького рівня ризику (risk as low as reasonably practicable) [16, 17] або ж раціонального ризику. Згідно з цією концепцією під час прийняття рішень на кожному етапі життєвого циклу об'єкта або технології мають відшуковуватися альтернативи, обтяжені меншими ризиками. Такий підхід дозволяє одночасно реалізовувати три принципи, які сприяють раціоналізації потенційно небезпечної діяльності: доцільності, оптимізації й адаптивізації (адаптивності) [10, 16, 17].

Урахування ризику під час прийняття рішень спрощується у випадку попарного порівняння альтернатив. Такий підхід, зокрема з урахуванням

ризикую невикористаних можливостей, уже використовувався [18] для порівняння варіантів розвитку гідроенергетики в Росії на перспективу до 2030 р. [18] та вибору оптимального варіанта подальшого розвитку Дніпровського каскаду ГЕС [19].

Загальну формалізацію завдання прийняття рішень з урахуванням ризику невикористаних можливостей на підставі попарного порівняння альтернатив наведено у праці [20], де сукупний (повний) ризик кожної з допустимих альтернатив визначається у вигляді лінійної комбінації можливих затрат та інших негативних ефектів і результатів l , пов'язаних з відповідним рішенням, та очікуваних позитивних ефектів і результатів (вигод, надбань, переваг) g , що можуть бути отримані у випадку альтернативного рішення, а задача багатокритеріальної оптимізації на зліченній множині допустимих альтернатив $\mathbf{A} = \{a_i\}$, $i = \overline{1, n}$, при їх попарному порівнянні, зводиться до такої задачі оптимізації:

$$d_{\text{opt}} = \{a_{i,\text{opt}} \mid a_{i,\text{opt}} \in \mathbf{A} \wedge r_{i,\text{opt}} = \min(r_{i,j}, r_{j,i}) \quad \forall (a_i, a_j)\}, \quad i, j = \overline{0, n}, \quad i \neq j, \quad (1)$$

де $r_{i,j}$, $r_{j,i}$ — повні ризики відповідно альтернативи a_i порівняно з a_j та a_j порівняно з a_i : $r_{i,j} = l_i + g_i$, $r_{j,i} = l_j + g_i$, де l_i , l_j і g_i , g_j — значення відповідним чином нормованих згортки критеріїв, що мінімізуються та максимізуються, для альтернатив a_i і a_j відповідно, подані як власні ризики та ризики невикористаних можливостей альтернатив a_i , a_j відповідно.

Мета роботи — презентація можливості раціонального обґрунтування оптимального сценарію введення нових агрегатів на ГАЕС в Україні, обтяженого меншим сукупним ризиком порівняно з іншими можливими сценаріями у випадку реалізації прийнятої Програми розвитку гідроенергетики на період до 2026 р., у якій передбачено добудову і введення в експлуатацію чергових агрегатів на Дністровській і Ташлицькій ГАЕС, а також будівництво Канівської ГАЕС.

ОЦІНЮВАННЯ КОМПОНЕНТ СУКУПНОГО РИЗИКУ АЛЬТЕРНАТИВ

Як розрахункові характеристики, з яких формувалися складові власного (системного) ризику l альтернатив, розглядалися: різниця між установленими потужностями в насосному N_p і турбінному N_t режимах $N_p - N_t$, МВт; різниця між споживанням електроенергії E_p в насосному режимі та її виробітком E_t в турбінному режимі $E_p - E_t$, млн кВт-год, затрати на будівництво (уведення гідроагрегатів) K , млрд грн. Як характеристики, з яких формувалися компоненти ризику невикористаних можливостей g , розглядалися: установлені потужності в турбінному режимі N_t , МВт; сумарна регульовальна потужність $N_t + N_p$, МВт; виробіток електроенергії E_t , млн. кВт-год. Для спрощення задачі розглянуті розрахункові характеристики, з яких формувалися компоненти сукупного ризику для кожної альтернативи, вважалися рівноцінними.

Оскільки вибрані нами характеристики мають різні одиниці вимірювання, то кількісне оцінювання відповідних компонент сукупного ризику виконувалося в бальних одиницях на основі логарифмічної шкали [20]. Бальна оцінка деякого значення y_k відповідної характеристики буде такою:

$$r(y_k) = \mu_k \lg y_k + y_{k,0},$$

де μ_k — модуль; $y_{k,0}$ — нуль-пункт на інтегральній логарифмічній шкалі довжиною L , балів, для параметра y_k :

$$\mu_k = \frac{L}{\lg y_{k,\max} - \lg y_{k,\min}}; \quad y_{k,0} = -\mu_k \lg y_{k,\min},$$

де $y_{k,\max}$; $y_{k,\min}$ — максимальне і мінімальне значення y_k .

Якщо $y_{k,\min} = 0$, припускаємо: $y_{k,0} = 0$; $\mu_k = \frac{L}{\lg y_{k,\max}}$, $r(0) = 0$.

Складові сукупного ризику (системного ризику l та ризику невикористаних можливостей g) кожної i -ї альтернативи відносно j -ї подаємо сумами бальних оцінок відповідних характеристик:

$$l_i = \sum_{k=1} l_{k,i}; \quad g_j = \sum_{k=1} g_{k,j}.$$

Після формування бальних оцінок складових сукупного ризику для відібраних допустимих альтернатив упорядковуємо їх та визначаємо функції сукупного ризику у вигляді лінійних комбінацій $r_{i,j} = l_i + g_j$; $r_{j,i} = l_j + g_i$.

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ З ВИБОРОМ ОПТИМАЛЬНОГО СЦЕНАРІЮ ВВЕДЕННЯ НОВИХ АГРЕГАТИВ НА ГАЕС

На першому кроці досліджень нами розглядалася множина з таких 11 альтернатив: a_0 — відмова від уведення нових потужностей на ГАЕС; a_1 — уведення в експлуатацію агрегата 4 другої черги на Дністровській ГАЕС; a_2 — добудова Ташлицької ГАЕС з уведенням в експлуатацію агрегатів 3, 4, 5, 6; a_3 — уведення в експлуатацію агрегата 4 другої черги на Дністровській ГАЕС та добудова Ташлицької ГАЕС з уведенням в експлуатацію агрегатів 3, 4, 5, 6; a_4 — будівництво Канівської ГАЕС; a_5 — добудова Дністровської ГАЕС з уведенням в експлуатацію агрегата 4 другої черги та агрегатів 5, 6, 7 третьої черги; a_6 — уведення в експлуатацію агрегата 4 другої черги на Дністровській ГАЕС та будівництво Канівської ГАЕС; a_7 — добудова Ташлицької ГАЕС з уведенням в експлуатацію агрегатів 3, 4, 5, 6 та будівництво Канівської ГАЕС; a_8 — добудова Ташлицької ГАЕС з уведенням в експлуатацію агрегатів 3, 4, 5, 6, уведення в експлуатацію агрегата 4 другої черги на Дністровській ГАЕС та будівництво Канівської ГАЕС; a_9 — добудова

Дністровської ГАЕС з уведенням в експлуатацію агрегата 4 другої черги, агрегатів 5, 6, 7 третьої черги та побудова Канівської ГАЕС; a_{10} — добудова Ташлицької ГАЕС з уведенням в експлуатацію агрегатів 3, 4, 5, 6, добудова Дністровської ГАЕС з уведенням в експлуатацію агрегата 4 другої черги, агрегатів 5, 6, 7 третьої черги та побудова Канівської ГАЕС.

Нумерація альтернатив виконувалася за зростанням установленної потужності у турбінному режимі. Розрахункові характеристики порівнюваних альтернатив наведено в табл. 3. Альтернативи з визначенням їх характеристик формували згідно з даними, наведеними в програмі [7].

Таблиця 3. Розрахункові характеристики альтернатив a_i , $i = \overline{0,10}$

a_i	Потужності, МВт				Електроенергія, млн кВт·год			K , млрд грн *
	N_t	N_p	$N_t + N_p$	$N_p - N_t$	E_t	E_p	$E_p - E_t$	
a_0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_1	324	421	745	97	388,5	515,5	127	2,796
a_2	604	861	1465	257	582	785	203	14,9
a_3	928	1282	2210	354	970,5	1300,5	330	17,696
a_4	1000	1120	2120	120	1017	1153	136	11,98
a_5	1296	1684	2980	388	1554	2062	508	11,196
a_6	1324	1541	2865	217	1405,5	1668,5	263	14,776
a_7	1604	1981	3585	377	1599	1938	339	26,88
a_8	1928	2402	4330	474	1987,5	2453,5	466	29,676
a_9	2296	2804	5100	508	2571	3215	644	23,176
a_{10}	2900	3665	6565	765	3153	4000	847	38,076

* Вартість будівництва в цінах 2013 р. [7]

Бальне оцінювання складових ризику альтернатив проводилося на інтегральній логарифмічній шкалі довжиною $L = 10$ балів. Результати бального оцінювання характеристик альтернатив зведено в табл. 4.

Оптимальну альтернативу вибирали згідно з правилом (1) попарним порівнянням, починаючи з пари (a_0, a_1) з відбором і збереженням на кожному кроці альтернативи, обтяженої меншим сукупним ризиком [20].

Результати попарного порівняння наведених альтернатив a_i , $i = \overline{0,10}$, показують, що відмова від уведення нових потужностей на ГАЕС (a_0) є найгіршою (найризикованішою) альтернативою і може надалі не розглядатися, а найкращою порівняно з будь-якою іншою альтернативою є альтернатива a_1 — уведення в експлуатацію агрегата 4 другої черги на Дністровській ГАЕС.

Таблиця 4. Результати бального оцінювання характеристик та складових сукупного ризику альтернатив a_i , $i = \overline{0,10}$

a_i	Від'ємні характеристики			l	Додатні характеристики			g
	$N_p - N_t$	$E_p - E_t$	K		N_t	$N_t + N_p$	E_t	
a_0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_1	6,890	7,185	2,825	16,900	7,251	7,524	7,401	22,176
a_2	8,357	7,881	7,422	23,660	8,032	8,294	7,903	24,228
a_3	8,839	8,602	7,895	25,336	8,571	8,761	8,537	25,869
a_4	7,210	7,287	6,823	21,320	8,665	8,714	8,595	25,974
a_5	8,978	9,242	6,637	24,856	8,990	9,101	9,122	27,213
a_6	8,102	8,265	7,399	23,767	9,017	9,057	8,997	27,070
a_7	8,934	8,642	9,043	26,619	9,257	9,312	9,157	27,726
a_8	9,279	9,114	9,315	27,708	9,488	9,526	9,427	28,442
a_9	9,383	9,594	8,636	27,613	9,707	9,713	9,747	29,166
a_{10}	10	10	10	30	10	10	10	30

Сукупні ризики $r_{i,j}$, $r_{j,i}$ заносилися в рядки таблиці рішень (рис. 1).

a_i	a_j										
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
a_0	–	22,18	24,28	25,87	25,97	27,21	27,07	27,73	28,44	29,17	30
a_1	16,90	–	41,13	42,77	42,87	44,11	43,97	44,63	45,34	46,07	46,90
a_2	23,66	45,84	–	49,53	49,64	50,87	50,73	51,37	52,10	52,83	53,66
a_3	25,34	47,51	49,56	–	51,31	52,55	52,41	53,06	53,78	54,50	55,34
a_4	21,32	43,5	45,55	47,19	–	48,53	48,39	49,05	49,76	50,49	51,32
a_5	24,86	47,03	49,08	50,73	50,83	–	51,93	52,58	53,30	54,02	54,86
a_6	23,77	45,94	47,00	49,64	49,74	50,98	–	51,49	52,21	52,93	53,77
a_7	26,62	48,8	50,85	52,49	52,59	53,83	53,69	–	55,06	55,79	56,62
a_8	27,71	49,89	51,94	53,58	53,68	54,92	54,78	55,43	–	56,87	57,71
a_9	27,61	49,79	51,84	53,48	53,59	54,83	54,68	55,34	56,05	–	57,61
a_{10}	30	52,18	54,23	55,87	55,97	57,21	57,07	57,73	58,44	59,17	–

Рис. 1. Таблиця рішень для попарного порівняння альтернатив a_i , $i = \overline{0,10}$

Для врахування можливості почергового введення нових агрегатів на Ташлицькій ГАЕС, зокрема і введення агрегата 4 другої черги на Дністров-

ській ГАЕС, додатково порівнювали сім таких альтернатив: a_1 — введення агрегата 3 на Ташлицькій ГАЕС; a_2 — введення агрегата 3, 4 на Ташлицькій ГАЕС; a_3 — введення агрегата 4 другої черги на Дністровській ГАЕС; a_4 — введення агрегата 3, 4, 5 на Ташлицькій ГАЕС; a_5 — введення агрегата 3 на Ташлицькій ГАЕС і агрегата 4 другої черги на Дністровській ГАЕС; a_6 — введення агрегата 3, 4 на Ташлицькій ГАЕС і агрегата 4 другої черги на Дністровській ГАЕС; a_7 — введення агрегатів 3, 4, 5 на Ташлицькій ГАЕС і агрегата 4 другої черги на Дністровській ГАЕС.

Розрахункові характеристики відповідних альтернатив a_i , $i = \overline{1,7}$, наведено в табл. 5. Результати бального оцінювання їх характеристик зведено в табл. 6. Таблицю рішень для попарного порівняння альтернатив a_i , $i = \overline{1,7}$, показано на рис. 2. Підтверджено оптимальність попередньо відібраної альтернативи введення агрегата 4 другої черги на Дністровській ГАЕС.

Таблиця 5. Розрахункові характеристики альтернатив a_i , $i = \overline{1,7}$

a_i	Потужності, МВт				Електроенергія, млн кВт-год			K , млрд грн
	N_t	N_p	$N_t + N_p$	$N_p - N_t$	E_t	E_p	$E_p - E_t$	
a_1	151	226,5	377,5	75,5	87,5	119	31,5	2,42
a_2	302	453	755	151	175	238	63	5,6
a_3	324	421	745	97	388,5	515,5	127	2,796
a_4	453	679,5	1132,5	226,5	262,50	357,00	94,5	8,78
a_5	475	647,5	1122,5	172,5	476,00	634,50	158,5	5,216
a_6	626	874	1500	248	563,5	753,5	190	8,396
a_7	777	1100,5	1877,5	323,5	651,00	872,50	221,5	11,576

Таблиця 6. Результати бального оцінювання характеристик та складових сукупного ризику альтернатив a_i , $i = \overline{1,7}$

a_i	Від'ємні характеристики			l	Додатні характеристики			g
	$N_p - N_t$	$E_p - E_t$	K		N_t	$N_t + N_p$	E_t	
a_1	0	0	0	0	0	0	0	0
a_2	4,764	3,554	5,360	13,678	4,231	4,321	3,454	12,006
a_3	1,722	7,148	0,923	9,793	4,660	4,238	7,428	16,326
a_4	7,550	5,633	8,234	21,417	6,706	6,849	5,474	19,029
a_5	5,679	8,284	4,907	18,869	6,996	6,793	8,440	22,229
a_6	8,173	9,214	7,948	25,335	8,681	8,601	9,281	26,562
a_7	10	10	10	30	10	10	10	30

a_i	a_j						
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
a_1	–	12,01	16,33	19,03	22,23	26,56	30,00
a_2	13,68	–	30,00	32,71	35,91	40,24	43,68
a_3	9,79	14,56	–	28,82	32,02	36,36	39,79
a_4	21,42	33,42	37,74	–	43,65	47,98	51,42
a_5	18,87	30,88	35,20	37,90	–	45,43	45,43
a_6	25,33	37,34	41,66	44,36	47,56	–	55,33
a_7	30,00	42,01	46,33	49,03	52,23	56,56	–

Рис. 2. Таблиця рішень для попарного порівняння альтернатив $a_i, i = \overline{1,7}$

На наступному кроці здійснювався вибір оптимальної альтернативи після введення в експлуатацію агрегата 4 другої черги на Дністровській ГАЕС. Сформовано нову групу із шести альтернатив, серед яких: a_1 — добудова Ташлицької ГАЕС з уведенням агрегатів 3, 4, 5, 6; a_2 — добудова Дністровської ГАЕС з уведенням агрегатів 5, 6, 7 третьої черги; a_3 — будівництво Канівської ГАЕС; a_4 — добудова Ташлицької ГАЕС з уведенням агрегатів 3, 4, 5, 6 та будівництво Канівської ГАЕС; a_5 — добудова Дністровської ГАЕС з уведенням агрегатів 5, 6, 7 третьої черги та побудова Канівської ГАЕС; a_6 — добудова Ташлицької ГАЕС з уведенням агрегатів 3, 4, 5, 6, добудова Дністровської ГАЕС з уведенням в експлуатацію агрегатів 5, 6, 7 третьої черги та побудова Канівської ГАЕС. Розрахункові характеристики альтернатив $a_i, i = \overline{1,6}$, та результати їх бального оцінювання зведено в табл. 7, 8. Таблицю рішень для їх попарного порівняння показано на рис. 3. Кращою альтернативою в цьому випадку виявилась альтернатива a_3 — будівництво Канівської ГАЕС потужністю 1000 МВт.

Додатково враховувалась можливість почергового введення нових агрегатів на Ташлицькій ГАЕС при будівництві Канівської ГАЕС. Розглядалися сім відповідних альтернатив, як і в попередньому випадку введення агрегата 4 на Дністровській ГАЕС. Підтверджено оптимальність альтернативи будівництва Канівської ГАЕС після введення агрегата 4 на Дністровській ГАЕС.

Таблиця 7. Розрахункові характеристики альтернатив $a_i, i = \overline{1,6}$

a_i	Потужності, МВт				Електроенергія, млн кВт·год			K , млрд грн
	N_t	N_p	$N_t + N_p$	$N_p - N_t$	E_t	E_p	$E_p - E_t$	
a_1	604	861	1465	257	582	785	203	14,9
a_2	972	1263	2235	291	1165,5	1546,5	381	8,4
a_3	1000	1120	2120	120	1017	1153	136	11,98
a_4	1604	1981	3585	377	1599	1938	339	26,88
a_5	1972	2383	4355	411	2182,5	2699,5	517	20,38
a_6	2576	3244	5820	668	2764,5	3484,5	720	35,28

Таблиця 8. Результати бального оцінювання характеристик та складових сукупного ризику альтернатив a_i , $i = \overline{1,6}$

a_i	Від'ємні характеристики			l	Додатні характеристики			g
	$N_p - N_t$	$E_p - E_t$	K		N_t	$N_t + N_p$	E_t	
a_1	4,436	2,403	3,994	10,833	0	0	0	0
a_2	5,160	6,181	0,000	11,341	3,280	3,062	4,457	10,799
a_3	0,000	0,000	2,474	2,474	3,476	2,679	3,582	9,737
a_4	6,668	5,480	8,105	20,253	6,734	6,487	6,486	19,708
a_5	7,171	8,013	6,176	21,360	8,158	7,898	8,483	24,539
a_6	10	10	10	30	10	10	10	30

a_i	a_j					
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
a_1	–	21,632	20,5704	30,5407	35,3718	40,8332
a_2	11,341	–	21,0782	31,0485	35,8795	41,3409
a_3	2,47377	13,273	–	22,1813	27,0124	32,4738
a_4	20,2534	31,0525	29,9906	–	44,792	50,2534
a_5	21,3597	32,1588	31,0969	41,0672	–	51,3597
a_6	30	40,7991	39,7373	49,7075	54,5386	–

Рис. 3. Таблиця рішень для попарного порівняння альтернатив a_i , $i = \overline{1,6}$

На заключному кроці досліджень вибиралася оптимальна альтернатива після уведення агрегата 4 на Дністровській ГАЕС та побудови Канівської ГАЕС. Порівнювалися альтернативи: a_1 — уведення агрегата 3 на Ташлицькій ГАЕС; a_2 — уведення агрегатів 3, 4 на Ташлицькій ГАЕС; a_3 — уведення агрегатів 3, 4, 5 на Ташлицькій ГАЕС; a_4 — добудова Ташлицької ГАЕС з уведенням агрегатів 3, 4, 5, 6; a_5 — добудова Дністровської ГАЕС з уведенням агрегатів 5, 6, 7 третьої черги; a_6 — добудова Дністровської ГАЕС з уведенням агрегатів 5, 6, 7 третьої черги і уведенням агрегата 3 на Ташлицькій ГАЕС; a_7 — добудова Дністровської ГАЕС з уведенням агрегатів 5, 6, 7 третьої черги і введенням агрегатів 3, 4 на Ташлицькій ГАЕС; a_8 — добудова Дністровської ГАЕС з уведенням агрегатів 5, 6, 7 третьої черги і введенням агрегатів 3, 4, 5 на Ташлицькій ГАЕС; a_9 — добудова Дністровської ГАЕС та добудова Ташлицької ГАЕС. Розрахункові характеристики альтернатив та результати їх бального оцінювання зведено в табл. 9, 10. Таблицю рішень для попарного порівняння альтернатив a_i , $i = \overline{1,9}$, показано на рис. 4.

Таблиця 9. Розрахункові характеристики альтернатив $a_i, i = \overline{1,9}$

a_i	Потужності, МВт				Електроенергія, млн кВт-год			K , млрд грн
	N_t	N_p	$N_t + N_p$	$N_p - N_t$	E_t	E_p	$E_p - E_t$	
a_1	151	226,5	377,5	75,5	87,5	119	31,5	2,42
a_2	302	453	755	151	175	238	63	5,6
a_3	453	679,5	1132,5	226,5	262,50	357,00	94,50	8,78
a_4	604	861	1465	257	582	785	203	14,9
a_5	972	1263	2235	291	1165,5	1546,5	381	8,4
a_6	1123	1489,5	2612,5	366,5	1253,00	1665,50	412,50	10,82
a_7	1274	1716	2990	442	1340,5	1784,5	444	14
a_8	1425	1942,5	3367,5	517,5	1428,00	1903,50	475,50	17,18
a_9	1576	2124	3700	548	1747,5	2331,5	584	23,3

Таблиця 10. Результати бального оцінювання характеристик та складових сукупного ризику альтернатив $a_i, i = \overline{1,9}$

a_i	Від'ємні характеристики			l	Додатні характеристики			g
	$N_p - N_t$	$E_p - E_t$	K		N_t	$N_t + N_p$	E_t	
a_1	0	0	0	0	0	0	0	0
a_2	3,497	2,374	3,705	9,576	2,955	3,037	2,315	8,307
a_3	5,543	3,762	5,690	14,995	4,684	4,813	3,669	13,166
a_4	6,180	6,381	8,026	20,587	5,911	5,941	6,328	18,180
a_5	6,807	8,537	5,495	20,839	7,939	7,792	8,647	24,378
a_6	7,970	8,809	6,613	23,393	8,555	8,475	8,889	25,919
a_7	8,915	9,061	7,751	25,728	9,093	9,067	9,115	27,274
a_8	9,711	9,296	8,655	27,662	9,571	9,587	9,326	28,484
a_9	10	10	10	30	10	10	10	30

a_i	a_j								
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
a_1	–	8,31	13,17	18,18	24,38	25,92	27,27	28,48	30,00
a_2	9,58	–	22,74	27,76	33,95	35,49	36,85	38,06	39,58
a_3	15,00	23,30	–	33,18	39,37	40,91	42,27	43,48	45,00
a_4	20,59	28,89	33,75	–	44,96	46,51	47,86	49,07	50,59
a_5	20,84	29,15	34,01	39,02	–	46,76	48,11	49,32	50,84
a_6	23,39	31,70	36,56	41,57	47,77	–	50,67	51,88	53,39
a_7	25,73	34,03	38,89	43,91	50,11	51,65	–	54,21	55,73
a_8	27,66	35,97	40,83	45,84	52,04	53,58	54,94	–	57,66
a_9	30,00	38,31	43,17	48,18	54,38	55,92	57,27	58,48	–

Рис. 4. Таблиця рішень для попарного порівняння альтернатив $a_i, i = \overline{1,9}$

Кращою альтернативою на цьому кроці виявилася a_5 — добудова Дністровської ГАЕС з уведенням агрегатів 5, 6, 7 третьої черги.

ВИСНОВКИ

Одним з підходів до обґрунтування програм і планів розвитку енергетики може бути врахування ризику під час прийняття рішень. При цьому під час обґрунтування доцільності введення нових потужностей гідрогенерації на ГАЕС з урахуванням ризику мають братися до уваги і ризики невикористаних можливостей.

У результаті проведених досліджень встановлено, що найбільш доцільним сценарієм введення нових потужностей гідрогенерації на ГАЕС в Україні для реалізації Програми розвитку гідроенергетики на період до 2026 р., який дозволяє мінімізувати сукупний ризик включно з ризиком невикористаних можливостей, є сценарій, за яким на першому етапі рекомендується зосередити зусилля на введенні агрегата 4 на Дністровській ГАЕС, на другому — на будівництві Канівської ГАЕС, на третьому — на добудові Дністровської ГАЕС з уведенням агрегатів 5, 6, 7 третьої черги. Після цього може розглядатися можливість добудови Ташлицької ГАЕС з почерговим введенням агрегатів 3, 4, 5, 6.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Розвиток теплоенергетики та гідроенергетики* / Є.Т. Базеев, Б.Д. Білека, Є.П. Васильєв та ін.; наук. ред. В.М. Клименко, Ю.О. Ландау, І.Я. Сігал. 2013. — 399 с. — Режим доступу: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-3/part-2/section-2/2-8>)
2. *Vennerman P. Pumped storage plants – Status and perspectives* / P. Vennerman, K.H. Gruber, J.U. Naaheim and al. // *VGB Power Tech.* — 2011. — N. 4. — P. 32–38.
3. *Родионов В.Г. Оптимизация структуры генерирующих мощностей. Аккумуляторы – накопители энергии* // *Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего.* — М.: ЭНАС, 2010. — С. 68–69.
4. *Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits* / Rastler et al. EPRI, Palo Alto, CA, 2010. — Available at: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx ProductId=00000000001020676>
5. *International Energy Statistics.* — Available at: <http://www.eia.gov>.
6. *Поташиник С.И. Каскад Среднеднепровских ГЭС: Опыт освоения и эксплуатации* / С.И. Поташиник. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 144 с.
7. *Програма розвитку гідроенергетики на період до 2026 року.* Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 13 липня 2016 р. № 552-р. — Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/552-2016-%D1%80#n7>
8. *Ivashintsov D.A. Ecological and sociodemographic consequences of hydrotechnical construction (Problems of safety and risk)* / D.A. Ivashintsov, D.V. Stefanishin, A. B. Veksler // *Power Technology and Engineering.* — 1993. — Vol. 27, Issue 12. — P. 685–691.
9. *Environmental experience gained from reservoirs in operation.* Trans. of the 18-th Int. Cong. on Large Dams. — Vol 2. — Q.69. Durban-South Africa, 1994. — 780 p.

10. Векслер А.Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин. — СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2002. — 591 с.
11. *Гидроэнергетика* и окружающая среда / Под общ. ред. Ю. Ландау и Л.А. Сиренко. — К.: Либра, 2004. — 484 с.
12. *The use of risk analysis to support dam safety decisions and management*. Trans. of the 20-th Int. Congress on Large Dams. — Vol. 1. — Q. 76. — Beijing-China, 2000. — 896 p.
13. *Risk Assessment in Dam Safety Management*. A reconnaissance of benefits, methods and current applications. ICOLD Bulletin 130. — Paris, 2005. — 276 p.
14. Качинський А.Б. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи: моногр. / А.Б. Качинський; Ін-т проблем нац. безпеки Нац. акад. служби безпеки України. — К.: [б. н.], 2004. — 470 с.
15. Панкратова Н.Д. Оцінювання багатофакторних ризиків в умовах концептуальної невизначеності / Н.Д. Панкратова, Н.І. Недашківська // *Кибернетика и системный анализ*. — 2009. — № 2. — С. 72–82.
16. Стефанишин Д.В. Методологічні підходи до оцінки та врахування ризику в задачах забезпечення надійності і безпеки гребель / Д.В. Стефанишин, О.М. Трофимчук // *Концепція захисту критичної інфраструктури: Стан, проблеми та перспективи її впровадження в Україні: зб. матеріалів міжнар. наук.-практ. конф. (7–8 листоп. 2013 р., Київ–Вишгород) Національний інститут стратегічних досліджень. Сер. «Національна безпека»*. — Вип. 5. — К., 2014. — С. 88–98.
17. Маршалл В. Основные опасности химических производств / В. Маршалл. — М.: Мир, 1989. — 671 с.
18. Стефанишин Д.В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності / Д.В. Стефанишин. — К.: Азимут-Україна, 2009. — 104 с.
19. Стефанишин Д.В. Про перспективи гідроенергетики в Україні та вибір варіанту розвитку Дніпровського каскаду з врахуванням ризику / Д.В. Стефанишин // *Гідроенергетика України*. — 2010. — № 3. — С. 5–11.
20. Стефанишина-Гаврилюк Ю.Д. Прийняття рішень у природокористуванні з урахуванням ризику невикористаних можливостей на підставі попарного порівняння альтернатив / Ю.Д. Стефанишина-Гаврилюк, Д.В. Стефанишин // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2016. — № 3. — С. 51–62.

Надійшла 07.04.2017