

УДК 620—91

Б. І. Мокін, д. т. н., проф., акад. АПНУ

## ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ПОВІТРЯНИХ АКУМУЛЮЮЧИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

*Висвітлено екологічні та економічні перспективи доповнення електроенергетичної системи акумуляторами енергії класу повітряних акумулюючих електростанцій. Запропоновано функціональні схеми комплексів «вітроелектростанції — повітряна акумулююча електростанція» та економіко-математичні моделі для їх аналізу.*

Вступ

Проблеми нестачі енергоресурсів та проблеми погіршення стану навколишнього середовища з кожним днем стають усе актуальнішими для людства. Тож пошук методів вирішення цих проблем для науковців є теж актуальним [5, 7].

Добуваючи первинні енергоресурси, руди та будівельні матеріали, людство погіршує стан навколишнього середовища, зменшує ареал комфортного проживання та збільшує небезпеку руйнування усього, що створене природою та руками людини [7].

Для зменшення цього впливу людство намагається збільшити частку використання в повсякденному житті енергії поновлюваних джерел, особливе місце серед яких посідає вітер [7].

Енергія вітру в багатьох районах Землі уже сьогодні є конкурентоспроможною з енергією теплових (ТЕС), гідравлічних (ГЕС) та атомних електростанцій (АЕС) [2]. Але у більшості регіонів України швидкість вітру недостатня для ефективного перетворення його енергії на вітроелектростанціях (ВЕС) в електричну енергію в кількостях, достатніх для забезпечення зростаючого її споживання в населених пунктах та на нових промислових об'єктах [5]. А тому в цих регіонах України держава планує спорудження нових АЕС.

Але для АЕС актуальною є проблема використання створеної електроенергії в нічні та обідні провали електроспоживання, оскільки законом для АЕС є робота в базовому режимі з генерацією стабільної потужності. Тож для збереження «зайвої» електричної енергії, яка генерується у ці години, поряд з АЕС необхідно мати потужні акумулятори. Але потужних електричних акумуляторів, здатних зберігати електричну енергію у значних кількостях без перетворення в інші види енергії, поки що людство не створило. Тож фахівці пропонують зберігати цю «зайву» електроенергію, перетворюючи її на гідравлічних акумулюючих електростанціях (ГАЕС) в енергію води, закачаної із нижнього басейну у верхній, та на повітряних акумулюючих електростанціях (ПАЕС), перетворюючи її в енергію стисненого повітря, закачаного в наземні чи підземні резервуари [1].

Ідея побудови ПАЕС для акумуляції електроенергії в Україні не здобула прихильників серед переважної більшості фахівців, оскільки вони вважають її такою, що не може бути обґрунтованою економічно. Особливою вадою ПАЕС противники їх зведення вважають те, що повітряні маси, які від стиснення нагріваються, перед закачуванням у повітросховище потрібно охолоджувати, що, на їхню думку, вимагатиме додаткових коштів на спорудження та експлуатацію потужних градирень. А це уже крім додаткових економічних збитків додасть ще й додаткових екологічних збитків [1, 5].

В даній роботі показано перспективність побудови ПАЕС з використанням під повітросховища вироблених кар'єрів, рудників, шахт, газових і нафтових свердловин та карстових печер і підземних каменоломень. Показано, як завдяки підключенню ПАЕС до діючих енергосистем можна суттєво збільшити ефективність використання їх сумарної потужності без спорудження нових АЕС та магістральних ЛЕП. Показано, як зростає ВВП держави від використання енергії вітру, завдяки її акумуляції вночі і створенню потоків «з-під землі» вдень, завдяки поверненню для використання земель над «покрівлями» ПАЕС, завдяки зниженню рівня поверхневих вод під тиском закачаного повітря. Доведено, що повітря, яке закачуватиметься у повітросховища, не потрібно охолоджувати, а достатньо лише охолоджувати турбокомпресори, які його закачуватимуть. А при такому під-

ході не потрібні градірні взагалі. Більше того, завдяки прогріву «даху» повітросховища і через нього постійному підгріву ґрунту, насипаного на «дах», створюється можливість побудови при кожній ПАЕС потужних парників, в яких протягом усього року вирощуватимуться овочі без витрачання на їх обігрів додаткової теплової енергії від ТЕЦ. Сформульовані задачі, які постають при комплексному вирішенні проблеми акумуляції електричної енергії за допомогою ПАЕС з позицій підвищення енергозабезпечення регіонів, підвищення ефективності використання виробленої на ТЕС та АЕС електричної енергії та покращення екології у цих регіонах.

Екологічне та економічне обґрунтування доцільності створення ПАЕС

Станом на сьогодні у будь-якому економічному регіоні України можна віднайти сотні природних та рукотворних підземних і наземних об'єктів, придатних для створення повітросховищ стисненого повітря (ПС) в якості акумуляторів енергії.

На Волині, Поділлі, Поліссі, у Криму, Прикарпатті та на Одещині — це карстові печери та покинуті підземні каменоломні, довжина яких сягає від десятків метрів до сотень кілометрів з висотою до 20 метрів і шириною в таких же межах.

У Донбасі, Криму, Прикарпатті та на Дніпропетровщині і Черкащині — це відпрацьовані вугільні і соляні шахти та рудники залізних і поліметалевих руд об'ємом до одного мільйона кубометрів і більше.

У Прикарпатті та на Полтавщині і Харківщині — це відпрацьовані нафтові та газові свердловини об'ємом від ста тисяч кубометрів і більше.

Рівномірно по усій Україні — це колишні кар'єри з видобутку глини, руд корисних копалин та щебеню площею до 10 гектарів і більше та глибиною від 10 до 200 метрів.

Можливість створення ПС у підземеллях ні в кого не викликає сумнівів, тим паче, що і досвід такий в Україні уже є — усім відомо про вітчизняні підземні сховища природного газу, що поступає до нас із Росії, завдяки яким забезпечується безперебійна подача природного газу споживачам в Україні та за кордоном під час аварій на магістральних газопроводах. А оскільки у нас є діючі підземні газосховища, то не може не бути технологій їх побудови. Тож ніяких принципових труднощів на шляху створення підземних ПС немає — потрібно лише доведення доцільності їх створення і обґрунтування економічної ефективності сьогодні чи в майбутньому з урахуванням відмінностей в закачуванні горючого газу та негорючого повітря та різної економічної віддачі кожного їхнього кубометра.

Тож цілком очевидним є те, що дослідження можливостей і перспектив створення підземних ПС в якості акумуляторів енергії необхідно проводити в напрямку адаптації для цих цілей існуючих технологій побудови підземних газосховищ природного газу та визначення умов і термінів введення ПС в експлуатацію з прийнятними для суспільства і бізнесових структур економічними показниками.

Що ж стосується створення наземних ПС в якості акумуляторів енергії, то доводиться констатувати, що станом на сьогодні немає ні технологій їх створення, ні методик оцінки економічних показників, ні математичних моделей для дослідження процесів у них і з ними. А саме цей напрямок розвитку засобів акумуляції енергії може внести один із найвагоміших внесків в поліпшення стану довкілля. Адже відпрацьовані кар'єри та глинища сьогодні багатотисячними виразками вкрили поверхню землі, перетворивши ці її ділянки на свідчення варварського відношення людини до природи та вогнища бруду, безнадії і небезпеки.

На рис. 1а показано, як, покриваючи широкий, але неглибокий кар'єр бетонними плитами, встановленими на колонах, які у свою чергу міцно скріплені з фундаментами, та насипаючи на плити шар землі, можна ліквідувати цю ерозію земної поверхні і органічно вписати її в навколишній ландшафт.

А на рис. 1б показано, як у такий же спосіб можна органічно вписати в навколишній ландшафт колишній глибокий, але неширокий кар'єр.

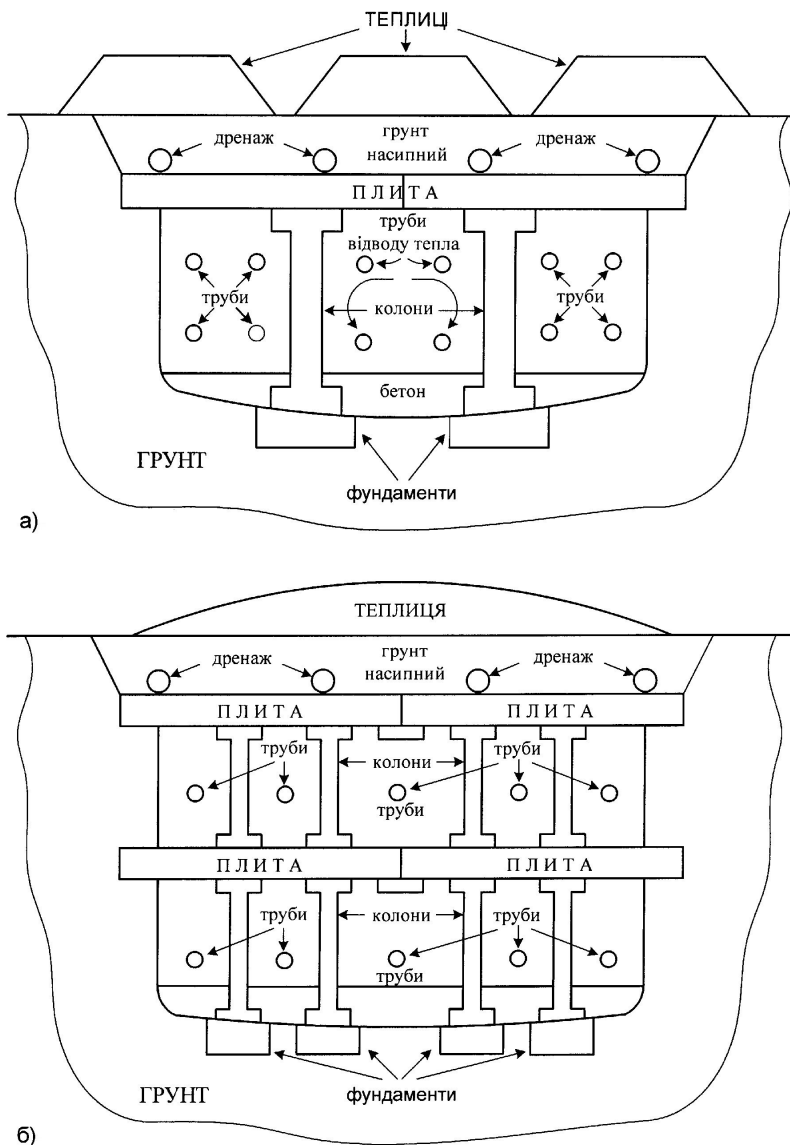


Рис. 1. Варіанти повітросховищ в поперечному розрізі:

а) в широкому але неглибокому кар'єрі; б) в неширокому але глибокому кар'єрі

Звичайно, якщо запропонувати у такий спосіб лише поліпшувати стан навколишнього середовища, то важко буде знайти інвестора, який погодився б вкладати у це кошти, оскільки, по-перше, цих коштів потрібно буде багато, а, по-друге, вони ніколи не окупляться. Але, якщо цю споруду перетворити у повітросховище, то вкладені інвестиції рано чи пізно окупляться, оскільки, по-перше, теплову енергію, яка виділятиметься при стисканні повітря, можна буде використовувати для обігріву близько розташованих приміщень і споруджених на насипному ґрунті теплиць (рис. 1), по-друге, електричну енергію, яка вироблятиметься вітроагрегатами при подачі на них стисненого повітря, можна буде використовувати в балансі енергосистеми, а по-третє, на насипному ґрунті, який є «дахом» повітросховища, а тому прогрівається теплом від стиснення повітря протягом усього року, можна вирощувати високі врожаї овочів, ягід і фруктів.

Технології спорудження повітросховищ, варіанти яких показані на рис. 1, автору невідомі, тож дослідження у цьому напрямку можна віднести до пріоритетних. Що стосується трубопроводів з відбору і використання тепла, яке виділяється в процесі стиснення повітря у ПС, то цей напрямок необхідно розпочинати з розробки адекватних математичних моделей.

Розпочати дослідження процесів стиснення повітря в ПС доцільно, зупинившись на максимальному тиску у 5 МПа (або, приблизно, у 50 атмосфер, що більш звично), оскільки саме на цей максимальний рівень розраховані діючі газосховища природного газу [8].

Зрозуміло, що повітросховища як самостійні об'єкти ніхто лише заради поліпшення ландшафту будувати не буде. Вони стають економічно цікавими лише у структурі повітряних акумулюючих електростанцій [1, 5], котрі працюють в режимі компресорних станцій, що закачують у ПС повітря при надлишку електроенергії в електроенергетичній системі (ЕЕС), до якої приєднані, і переходять в режим вітрових електростанцій, які перетворюють енергію стисненого повітря, акумульованого в ПС, в електричну енергію, в разі появи дефіциту електроенергії в ЕЕС.

Заради стабільної роботи газотранспортної системи в цілому у газосховищах падіння тиску газу нижче рівня у 2 МПа не допускають [1, 5, 8]. Очевидно, що цей рівень тиску в якості мінімально-допустимого можна для початку розрахунків встановити і для ПС у складі ПАЕС. А це, у свою чергу, означає, що на повітряному виході ПАЕС навіть у завершальній фазі її роботи в режимі ВЕС має бути досить сильний вітер, який дме «з-під землі», енергії якого достатньо для приведення в дію встановленої поряд стандартної наземної ВЕС навіть у природно-безвітряну у цей час погоду. Таке поєднання ПАЕС і спорудженої поряд ВЕС будемо називати комплексом ВЕС–ПАЕС.

На рис. 2 показано в поперечному розрізі один із можливих варіантів комплексу ВЕС–ПАЕС.

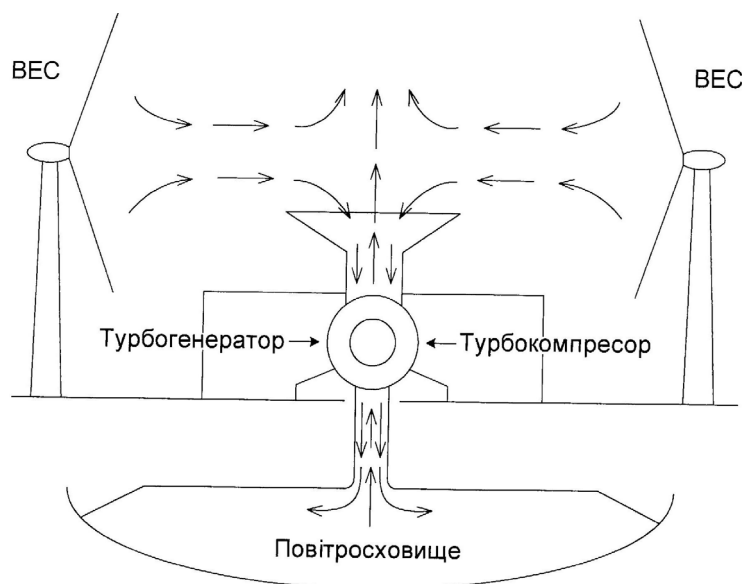


Рис. 2. Поперечний розріз 1-го варіанта комплексу ВЕС–ПАЕС

Але не виключено, що такий варіант комплексу ВЕС–ПАЕС, який показано на рис. 2, не скрізь і не на кожну потужність можна буде споруджувати, оскільки в певних умовах, дослідженню яких за допомогою геоінформаційних моделей потрібно буде приділити окрему увагу, простір над вихідним соплом ПАЕС може стати джерелом зародження потужних повітряних вихорів до смерчів і торнадо включно. При виявленні шляхом моделювання таких умов для якоїсь місцевості, для неї можна запропонувати інший варіант комплексу ВЕС–ПАЕС — він показаний на рис. 3.

У цьому варіанті верхню частину сопла ПАЕС пропонується зробити такою, яка має можливість обертатися навколо вертикальної осі. Регулюючи положення верхньої частини сопла шляхом її обертання навколо цієї осі, можна буде завжди уникнути випадків, коли вектори потоків вітру і стисненого повітря «гасять» один одного, зменшуючи віддачу енергії на вітроколесі ВЕС.

Схематично структурну схему комплексу ВЕС–ПАЕС, як виконаного по варіанту 1 так і по варіанту 2, можна представити у вигляді, показаному на рис. 4, на якому нижні індекси біля потоків вказують на джерело їх формування.

Зауважимо, що на цій схемі структурні блоки ТК і ТГ одночасно функціонувати не можуть, а лише або один, або другий.

Визначимо ті складові, за рахунок яких підвищиться ефективність ЕЕС в разі включення в її структуру регіональних комплексів ВЕС–ПАЕС.

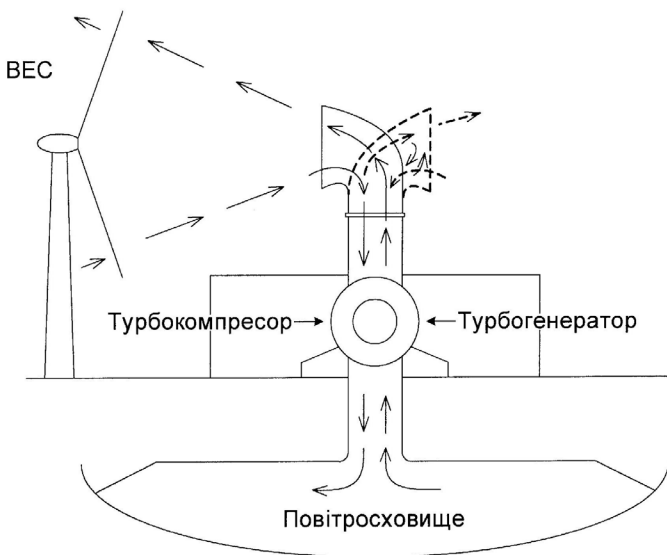


Рис. 3. Поперечний розріз 2-го варіанта комплексу ВЕС-ПАЕС

ну мережу ЕЕС від ВЕС, включених в комплекс ВЕС-ПАЕС. Слід зазначити, що ця електрична потужність надходить від ВЕС до ЕЕС в разі включення ВЕС в комплекс ВЕС-ПАЕС під час роботи ПАЕС незалежно від наявності у цей час у цій місцевості природного вітрового потоку  $\Pi_{\text{П}}$ , оскільки як витікаючи «з-під землі» із повітросховища  $\Pi_{\text{ПС}}$ , так і втікаючи «під землю» в повітросховище ПАЕС  $\Pi_{\text{ТК}}$  штучний вітровий потік збільшує градієнт тиску на лопатях вітроколеса ВЕС, віддаючи йому завдяки складовим  $\Pi_{\text{ТГ}}$ ,  $\Pi_{\text{ТК}}$  частину своєї енергії і примушуючи обертатись.

По-перше, це додаткова активна  $\sum P_{\text{ТГ}}$  та реактивна  $\sum Q_{\text{ТГ}}$  електрична потужність, що надходить в електричну мережу ЕЕС від регіональних ПАЕС, які, працюючи в режимі «підземних» ВЕС, перетворюють в турбогенераторах енергію стисненого в повітросховищах повітря  $\Pi_{\text{ПС}}$  в електричну енергію, що подається в мережу під час проходження піків навантаження, нарощуючи тим самим маневрову потужність ЕЕС без додаткових витрат на створення маневрових газотурбінних установок (ГТУ) та забезпечення їх додатковими паливно-енергетичними ресурсами у вигляді природного газу.

По-друге, це додаткова активна  $\sum P_{\text{ВЕС}}$  та реактивна  $\sum Q_{\text{ВЕС}}$  електрична потужність, що надходить в електричну мережу ЕЕС від ВЕС, включених в комплекс ВЕС-ПАЕС.

По-третє, це додаткове активне  $\sum P^*$  та реактивне  $\sum Q^*$  електричне навантаження на ЕЕС під час нічних та обідніх провалів загального навантаження на систему за рахунок використання «зайвої» електроенергії для закачування повітря в повітросховища регіональних ПАЕС в їх турбокомпресорному режимі. Слід зазначити, що завдяки цьому при провалах загального навантаження на ЕЕС її АЕС і ТЕС залишаються працювати в базовому режимі. А це зменшує обсяг ремонтних робіт на них, збільшує термін їх експлуатації та скорочує витрати палива, завдяки зменшенню

По-перше, це додаткова активна  $\sum P_{\text{ТГ}}$  та реактивна  $\sum Q_{\text{ТГ}}$  електрична потужність, що надходить в електричну мережу ЕЕС від регіональних ПАЕС, які, працюючи в режимі «підземних» ВЕС, перетворюють в турбогенераторах енергію стисненого в повітросховищах повітря  $\Pi_{\text{ПС}}$  в електричну енергію, що подається в мережу під час проходження піків навантаження, нарощуючи тим самим маневрову потужність ЕЕС без додаткових витрат на створення маневрових газотурбінних установок (ГТУ) та забезпечення їх додатковими паливно-енергетичними ресурсами у вигляді природного газу.

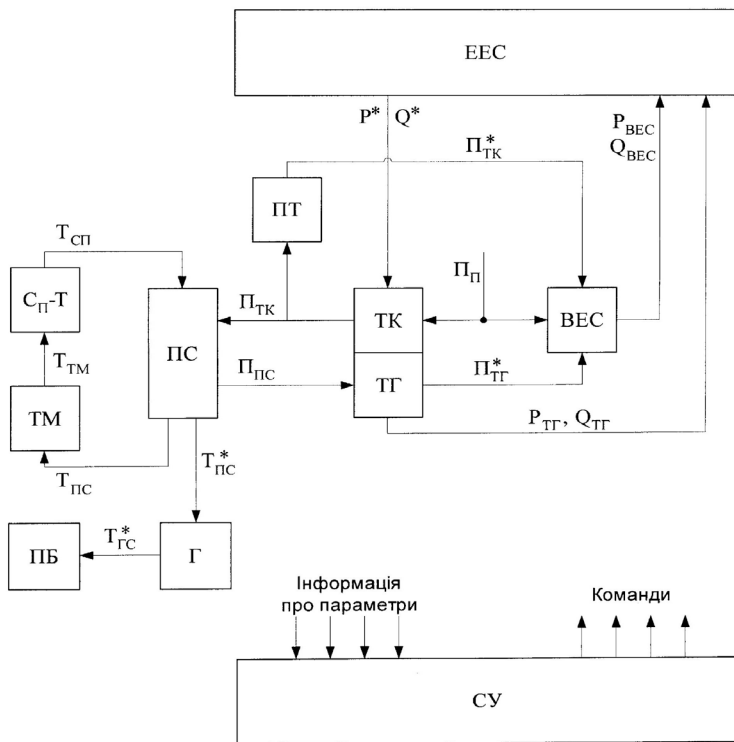


Рис. 4. Структурна схема комплексу ВЕС-ПАЕС, підключеного до ЕЕС: ТК — агрегат ПАЕС в режимі турбокомпресора, ТГ — агрегат ПАЕС в режимі турбогенератора, ПС — повітросховище, Г — ґрунт навколо ПС, ТМ — тепломережа, С<sub>п-Т</sub> — споживачі теплової енергії, ЕЕС — електроенергетична система, ВЕС — вітроелектростанція, ПАЕС — повітряна акумулююча електростанція, P, Q — потоки активної і реактивної електричної потужності, П — повітряні потоки, ПТ — перетворювач тиску повітряного потоку, Т — теплові потоки

кількості перехідних режимів.

По-четверте, це зменшення сумарних втрат активної електричної потужності в лініях електропередачі  $\sum \Delta P_{\text{ЛЕП}}$  як за рахунок забезпечення можливості передачі електроенергії, потрібної для закачування повітря в повітросховища ПАЕС, від далеко розташованих АЕС і ТЕС під час нічних та обідніх провалів загального електричного навантаження на ЕЕС чим зменшуються квадрати струмів в лініях електропередачі в формулі втрат активної електричної потужності, так і за рахунок забезпечення можливості передачі споживачам електроенергії, потрібної для проходження піків загального електричного навантаження в ЕЕС, від близько до них розташованих комплексів ВЕС–ПАЕС, що відіграють роль розосередженого джерела маневреної електричної потужності, чим забезпечується зменшення значень опорів ліній електропередачі у формулі втрат активної електричної потужності.

По-п'яте, це додатковий сумарний потік  $\sum T_{\text{ТМ}}$  теплової енергії, який передається споживачам СП-Т від тепломереж ТМ, трансформуючись з теплових потоків  $T_{\text{ПС}}$ , що виділяються в повітросховищах ПС під час стискування повітря, за рахунок чого кожна ПАЕС фактично перетворюється в ТЕЦ, функції парового котла в якій відіграють труби з рідиною, що прокладаються в її повітросховищі ПС.

По-шосте, це додатковий приріст сільськогосподарської продукції  $\Delta A_{\text{СП}}$ , обумовлений як зниженням рівня обводненості ґрунтів в регіонах розташування ПАЕС за рахунок витіснення ґрунтових вод з шахт і кар'єрів, використаних під повітросховища, —  $\Delta A_{\text{СП}}^{\text{ОГ}}$ , так і за рахунок облаштування теплиць і парників на насипних, що обігрівается тепловими потоками  $T_{\text{ПС}}^*$ ,  $T_{\text{ГС}}^*$ , ґрунтах Г «дахів» повітросховищ ПС, споруджених на місцях розташування балок, глинищ і кар'єрів, —  $\Delta A_{\text{СП}}^{\text{ТП}}$ .

По-сьоме, це економія коштів  $E_{\text{ВР}}$  від зменшення обсягів відновлювальних і ремонтних робіт, що матиме місце у зв'язку зі зниженням рівня ґрунтових вод у зонах розташування ПАЕС і, як наслідок, — зменшенням кількості будівель і споруд, що розвалились чи провалились або потріскались внаслідок розмиття ґрунтовими водами їх фундаментів.

### Економіко-математична модель ЕЕС з ПАЕС

У роботі [1] запропоновано економіко-математичні моделі як акумуляторів енергії (АЕ), до яких відносяться ПАЕС, так і ЕЕС з акумуляторами енергії. Вихідною координатою цих моделей є зведені сумарні річні затрати, відповідно,  $Z_{\text{АЕ}}$  та  $Z_{\text{ЕЕС}}$ , а також економічна ефективність  $S_{\text{АЕ}}$  використання АЕ.

В загальному вигляді в позначеннях, прийнятих у нашій роботі,

$$Z_{\text{ЕЕС}} = f(K, a, Z_{\text{П}}, C) + Z_{\text{АЕ}}, \quad (1)$$

де  $K$  — капіталовкладення на спорудження ЕЕС,  $a$  — частка амортизаційних відрахувань від капіталовкладень,  $Z_{\text{П}}$  — затрати на паливо, необхідне для вироблення заданої кількості енергії,  $C$  — вартість втрат енергії при її передачі до споживачів, а

$$Z_{\text{АЕ}} = (e_{\text{Н}} + a_{\text{ПС}}) k_{\text{ПС}} E_{\text{ПС}} + (e_{\text{Н}} + a_{\text{ТГ}\pm\text{ТК}}) k_{\text{ТГ}\pm\text{ТК}} P_{\text{ТГ}\pm\text{ТК}} + Z_{\text{СУ}} + ((1 - \eta_{\text{АЕ}}) / \eta_{\text{АЕ}}) E_{\text{ПС}} N_{\Sigma} C_0 (1 - k_{\text{В}}), \quad (2)$$

де  $e_{\text{Н}}$  — нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень (1/рік),  $a_{\text{ПС}}$  — коефіцієнт відрахувань на амортизацію, реновацію і обслуговування повітросховища (1/рік),  $k_{\text{ПС}}$  — питомі капіталовкладення в спорудження ПС (грн/Дж) — для ПАЕС вони дорівнюють відношенню капіталовкладень на спорудження ПС до енергоємності ПС,  $E_{\text{ПС}}$  — енергоємність ПС (Дж),  $k_{\text{ТГ}\pm\text{ТК}}$  — питомі капіталовкладення в спорудження агрегатів «турбогенератор-турбокомпресор» (грн/кВт),  $a_{\text{ТГ}\pm\text{ТК}}$  — коефіцієнт відрахувань на амортизацію, реновацію і обслуговування агрегатів «турбогенератор-турбокомпресор» (1/рік),  $P_{\text{ТГ}\pm\text{ТК}}$  — потужність агрегатів «турбогенератор-турбокомпресор» (кВт),  $Z_{\text{СУ}}$  — зведені річні сумарні затрати на систему управління ПАЕС (грн),  $k_{\text{В}}$  — коефіцієнт використання ПС, що показує, яка частина його енергоємності може бути вико-

ристана,  $C_0$  — собівартість електроенергії ЕЕС, в структурі якої функціонує ПАЕС (грн/Дж),  $N_\Sigma$  — кількість циклів включення ПАЕС в роботу протягом року,

$$\eta_{AE} = E_{ПК} / E_{ПР}, \quad (3)$$

— коефіцієнт корисної дії АЕ, виражений через  $E_{ПР}$ ,  $E_{ПК}$  — відповідно, спожиту та віддану в мережу електроенергію за один цикл роботи ПАЕС під час провалу навантаження в ЕЕС та під час проходження його піку.

Функція  $f(K, a, Z_{П}, C)$  в моделі (1), яка за змістом відображає собою зведені сумарні річні затрати ЕЕС без АЕ — позначимо їх  $Z_{ЕЕС}^*$ , містить в собі 15 членів, зі структурою яких можна ознайомитись в роботі [1] (вираз (4.9)). Оскільки ці члени моделі для подальших викладок у статті не використовуватимуться, то вони на цих сторінках і не наводяться.

Модель економічної ефективності  $S_{AE}$  — це

$$S_{AE} = \Delta S_\Sigma - Z_{AE}, \quad (4)$$

де  $\Delta S_\Sigma$  — сумарний економічний ефект від використання АЕ в ЕЕС, який в роботі [1] пропонується визначати за допомогою моделі, яка в наших позначеннях має вигляд

$$\Delta S_\Sigma = \Delta S_{П} + \Delta S_{ЕС} + \Delta S_{ТР} + \Delta S_{ЛЕП} + \Delta S_{ВТ} + \Delta S_{НАД} + \Delta S_{СТ} + \Delta S_{ЕК}, \quad (5)$$

і є сумою економічних ефектів від, відповідно, економії на паливі (індекс П), зменшенні капіталовкладень в електростанції (інд. ЕС), в трансформатори (інд. ТР), в лінії електропередачі (інд. ЛЕП), за рахунок зменшення втрат електроенергії (інд. ВТ), підвищення надійності електропостачання (інд. НАД), підвищення стійкості роботи ЕЕС (інд. СТ.) та поліпшення екологічного стану навколишнього середовища (інд. ЕК). Моделі цих складових в роботі [1] наведені під номерами, відповідно, (7.13), (7.21), (7.27), (7.25), (7.19), (7.29), (7.30) та (7.31), тож переносити їх в дану роботу немає сенсу.

Визначимо, якими складовими потрібно доповнити моделі (1)—(5), щоб вони стали придатними для оцінки ефективності і окремих комплексів ВЕС–ПАЕС і ЕЕС в цілому, в разі доповнення її цими комплексами.

Почнемо з коефіцієнта корисної дії, визначеного для АЕ моделлю (3). За цією моделлю ККД характеризує лише ту частину електроенергії  $E_{ПР}$ , спожитої за один цикл роботи АЕ, яка використовується в турбогенераторах ПАЕС для створення вторинної електроенергії  $E_{ПК}$  шляхом перетворення кінетичної енергії потоку повітря, стисненого в ПС турбокомпресорами. Але ж існує ще одна складова спожитої електроенергії, яка перетворюється у теплову енергію  $E_T$  при стисненні повітря турбокомпресорами. В існуючих проектах ПАЕС цю теплову енергію пропонується відбирати в охолоджувачах, використовуючи при цьому ще й третю складову  $E_{ОХ}$  спожитої електроенергії, котра витрачається на забезпечення роботи насосів подачі в охолоджувач охолоджуючої рідни. Тож спожиту акумулятором АЕ електроенергію в існуючих проектах ПАЕС можна в загальному вигляді представити моделлю

$$E_{ПР} = E_{ПК} + E_T + E_{ОХ} + E_{ПМТ} + E_{ВТ} + E_{ПТГ}, \quad (6)$$

де  $E_{ПМТ}$  — електроенергія, яка використовується для підтримання мінімально-допустимого тиску в ПС,  $E_{ВТ}$  — електроенергія, яка використовується для покриття втрат енергії, що мають місце на різних стадіях її перетворення в ПАЕС, а  $E_{ПТГ}$  — енергія, яка викидається в навколишнє середовище повітряним потоком з турбогенератора.

Оскільки в запропонованому варіанті АЕ у вигляді комплексу ВЕС–ПАЕС корисно використовується не лише електроенергія  $E_{ПК}$ , але і більша частина  $E_T^*$  теплової енергії  $E_T$ , яка подається для споживання в тепломережу, а також деяка частина  $E_{ПТГ}^*$  енергії  $E_{ПТГ}$  вторинного повітряного потоку, яка перетворюється в додаткову електричну на ВЕС, то ККД  $\eta_{AE}^*$  комплексу ВЕС–ПАЕС буде більшим ККД  $\eta_{AE}$  ПАЕС з традиційною структурою, оскільки він визначатиметься не за формулою (3), а за виразом

$$\eta_{\text{AE}}^* = (E_{\text{ПК}} + E_{\text{T}}^* + E_{\text{ПТГ}}^*) / E_{\text{ПР}}. \quad (7)$$

З тієї ж причини більше значення для комплексу ВЕС–ПАЕС матиме і коефіцієнт  $k_{\text{В}}^*$  використання ПС.

Тож завдяки більшим значенням ККД і коефіцієнта використання ПС в моделі (2) зведені затрати  $Z_{\text{AE}}^*$  для комплексу ВЕС–ПАЕС будуть мати менше значення у порівнянні з традиційною схемою ПАЕС при однаковому об'ємі ПС і однаковій потужності турбоагрегатів ТГ ± ТК. А це приводить згідно з моделлю (5) до збільшення економічної ефективності  $S_{\text{AE}}^*$  комплексу. Додаткове збільшення цього параметра матимемо ще й завдяки тому, що в моделі (5) для комплексу ВЕС–ПАЕС з'являються чотири нові доданки, тобто, модель сумарної економічної ефективності комплексу матиме вигляд

$$\Delta S_{\Sigma}^* = \Delta S_{\Sigma} + \Delta S_{\text{ТМ}} + \Delta S_{\text{ВЕС}} + \Delta S_{\text{СП}} + \Delta S_{\text{ВР}}, \quad (8)$$

де  $\Delta S_{\text{ТМ}}$  — економічна ефективність від використання споживачами в тепловій мережі теплової енергії, що виділяється в ПС під час стиснення повітря турбокомпресорами,  $\Delta S_{\text{ВЕС}}$  — економічна ефективність від використання електроенергії, згенерованої на ВЕС комплексу,  $\Delta S_{\text{СП}}$  — економічна ефективність від вирощення додаткової сільськогосподарської продукції на полях біля комплексу за рахунок ліквідації їх підтоплення та створення теплиць і парників,  $\Delta S_{\text{ВР}}$  — економічна ефективність від зменшення обсягів відновлювальних та ремонтних робіт в зонах витіснення ґрунтових вод на землях, прилеглих до комплексу ВЕС–ПАЕС.

Нехай в ЕЕС з АЕ із виробленої енергії корисно використовується  $W_{\text{ЕЕС}}$ , а в ЕЕС без АЕ лише  $W_{\text{ЕЕС}}^*$ . Очевидно, що за рахунок зменшення втрат енергії при передачі і збільшення часу роботи електростанцій ЕЕС в базовому режимі матимемо співвідношення

$$W_{\text{ЕЕС}}^* < W_{\text{ЕЕС}}, \quad (9)$$

яке зі збільшенням кількості АЕ, включених до структури ЕЕС, лише посилюватиметься.

Цілком очевидним є також і те, що за рахунок додаткових капіталовкладень на спорудження АЕ справедливим буде співвідношення

$$Z_{\text{ЕЕС}} > Z_{\text{ЕЕС}}^*, \quad (10)$$

яке зі збільшенням кількості АЕ, включених до структури ЕЕС, зростатиме повільніше ніж (9), оскільки суттєвий вклад в зведені затрати вносить паливо для електростанцій, якого зі збільшенням кількості АЕ для вироблення однієї і тієї ж кількості енергії потрібно менше. А тому при введенні в наступні роки все нових і нових комплексів ВЕС–ПАЕС в структуру ЕЕС графіки залежностей у часі умовних собівартостей корисно використаної енергії

$$C_{\text{ЕЕС}}^* = Z_{\text{ЕЕС}}^* / W_{\text{ЕЕС}}^*, \quad C_{\text{ЕЕС}} = Z_{\text{ЕЕС}} / W_{\text{ЕЕС}}, \quad (11)$$

будуть мати вигляд, показаний на рис. 5.

На графіку показано рік початку відліку, роки введення в дію чотирьох комплексів ВЕС–ПАЕС та рік встановлення рівноваги, за яким ЕЕС з комплексами ВЕС–ПАЕС починає працювати більш ефективно ніж ЕЕС без наявності таких комплексів у структурі, причому надалі ефективність доповнення ЕЕС комплексами ВЕС–ПАЕС стрімко зростатиме.



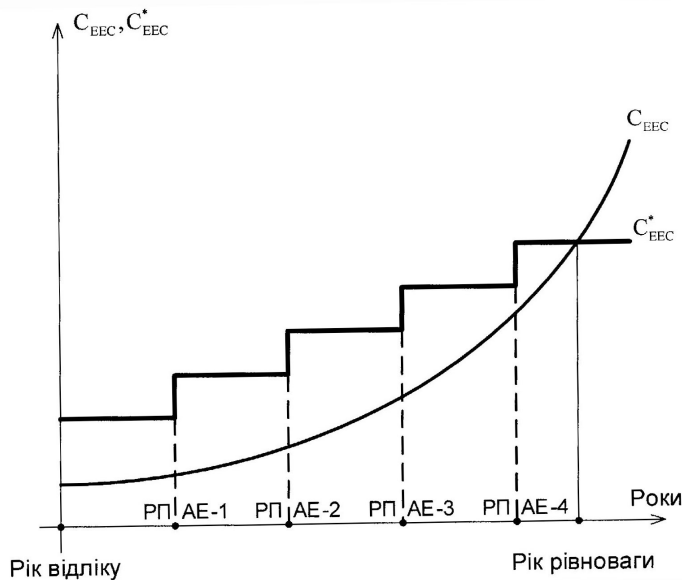


Рис. 5. Графік залежностей в часі умовних собівартостей корисно використаної енергії для ЕЕС:

з комплексами ВЕС–ПАЕС —  $C_{EЕС}^*$  та без них —  $C_{EЕС}$

мах. — М.: Высшая школа, 1989. — 159 с.

2. Ветроэнергетика / Под ред. Д. Рензо: Пер. с англ. под ред. Шефтера Я. И. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 272 с.

3. Дмитриев В. Н., Градецкий В. Г. Основы пневмоавтоматики. — М.: Машиностроение, 1973. — 360 с.

4. Мокін Б. І. Системи еколого-економічного управління // Зб. матеріалів 13-ї Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2006». — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006.

5. Мхитарян Н. М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы. — К.: Наукова думка, 1999. — 320 с.

6. Мхитарян Н. М. Энергосберегающие технологии в жилищном и гражданском строительстве. — К.: Наукова думка, 2000. — 417 с.

7. Скалкин Ф. В. Канаев А. А., Копп И. З. Энергетика и окружающая среда. — Ленинград: Энергоиздат, Лен. отд., 1981. — 280 с.

8. Ушаков С. С., Борисенко Т. М. Экономика транспорта топлива и энергии. — М.: Энергия, 1980. — 192 с.

**Мокін Борис Іванович** — професор кафедри моделювання і моніторингу складних систем.

Вінницький національний технічний університет

Питанням управління як комплексами ВЕС–ПАЕС так і ЕЕС з цими комплексами в структурі присвячена робота [4].

Висновки

1. Висвітлено економічні та екологічні перспективи доповнення ЕЕС акумуляторами енергії класу ПАЕС.

2. Запропоновано функціональні схеми комплексів ВЕС–ПАЕС та нові принципи побудови повітросховищ для них.

3. Відомі економіко-математичні моделі, розроблені раніше для ЕЕС з акумуляторами енергії взагалі, адаптовано і доповнено для аналізу ЕЕС з комплексами ВЕС–ПАЕС.

4. Запропоновано критеріальні співвідношення для порівняння варіантів доповнення ЕЕС комплексами ВЕС–ПАЕС і визначення прийнятного.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Астахов Ю. Н., Веников В. А., Тер-Газарян А. Г. Накопители энергии в электрических систе-