

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ**М.М. Кулик¹**, академік НАН України, **О.В. Кириленко^{2*}**, академік НАН України¹ Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, Київ, 03150, Україна,e-mail: info@ienergy.kiev.ua² Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,e-mail: kyrvlenko@ied.org.ua

Визначено особливості та виконано аналіз програми розвитку гідроенергетики України до 2026 р. Показано, що на даний час застосування гідроелектричних та гідроакumuлюючих станцій для покриття пікових навантажень як за технічними, так і економічними та екологічними показниками поступаються більш прогресивним методам. Розглянуто нові технології покриття пікових навантажень, регулювання частоти і потужності в енергосистемах, які здатні успішно конкурувати з гідроелектростанціями. Визначено мінімальні обсяги маневрових потужностей, які повинні мати у своєму складі Об'єднана енергетична система України. Виконано порівняльний аналіз техніко-економічних та екологічних характеристик проекту Канівської гідроакumuлюючої станції та альтернативного проекту будівництва комплексу споживачів-регуляторів на теплових насосних установках. На прикладі реалізації проекту ущільнення графіків електричних навантажень шляхом впровадження електрокотлів на ТЕЦ при введенні в експлуатацію в енергосистемі Білорусії АЕС потужністю 2380 МВт показано переваги цього рішення. Наведено результати порівняльного дослідження процесів регулювання частоти і потужності в енергосистемах з потужними вітровими та сонячними електростанціями, в яких стабільність за частотою забезпечується введенням у систему потужних акумуляторних батарей і гідростанцій. Бібл. 12.

Ключові слова: гідро-та гідроакumuлюючі електричні станції, маневрові потужності, споживачі-регулятори на теплонасосних установках, регулювання частоти і потужності в системах з вітровими та сонячними електростанціями.

Вступ. З усіх видів енергоресурсів, які використовує людство, найбільш поширеним, універсальним та екологічним є електрична енергія. Разом із тим серед технологій її виробництва наразі не можна виділити таку, яка була б безумовним лідером за технологічними, економічними, екологічними та іншими показниками [1].

Атомні електростанції (АЕС), працюючи в нормальних базових режимах і маючи можливість нести великі за обсягами навантаження з високими економічними і екологічними показниками, в той самий час не можуть брати участь у покритті змінної частини графіків електричних навантажень (ГЕН). Для них характерними є проблеми з утилізацією та захороненням відпрацьованого ядерного палива, із зняттям з експлуатації устаткування, що відпрацьовало ресурс, а пересічна аварія навіть на одному атомному енергоблоці може призвести до екологічної катастрофи (найважливіший недолік).

Теплові електростанції (ТЕС) ефективно працюють у базовому режимі та забезпечують покриття більшості змінної частини ГЕН, однак мають проблеми з обсягами викидів шкідливих речовин (попіл, оксиди сірки та азоту) та вуглекислого газу.

Вітрові (ВЕС) та сонячні (СЕС) електростанції виробляють електроенергію без використання палива та з досить високими екологічними показниками, однак їхня гарантована потужність практично дорівнює нулю. Вони потребують наявності резервних потужностей у разі відсутності вітру/сонця, а під час роботи генерують нестабільну електроенергію, що вимагає установки регулюючих установок.

Серед спектра технологій генерації електроенергії особливе місце займають гідро (ГЕС)-та гідроакumuлюючі (ГАЕС) електростанції. При оцінюванні доцільності використання ГЕС у структурі генеруючих потужностей енергосистеми, перш за все, визначається, який тип може бути використаний: рівнинний чи гірський (висотний). Будівництво рівнинних ГЕС пов'язане із суттєвими витратами коштів через: затоплення великих площ родючих земель, відселення мешканців із зони затоплення,

втрата історичних пам'яток, руйнацію природних заповідників, спотворення ландшафтів, цвітіння і заболочення річок та водоймищ, інші негативні явища. Тому собівартість виробництва електроенергії на рівнинних ГЕС із урахуванням усіх витрат, пов'язаних з усуненням зазначених негативних явищ, наразі набагато перевищує цей показник для ТЕС чи АЕС. Для ГАЕС ситуація є ще складнішою, оскільки їхнє функціонування пов'язане не тільки із більшістю згаданих вище негативних факторів, а ще й із тим, що у своїй роботі вони використовують електроенергії значно більше, ніж генерують. Як наслідок, це значно збільшує собівартість виробництва електроенергії на ГАЕС. За таких обставин питання використання ГЕС та ГАЕС потребує детального дослідження.

Усе зазначене вище стосується рівнинних гідроелектростанцій. Для висотних (гірських) ГЕС згадані фактори практично не проявляються, у них висота гребель складає сотні метрів, потужність – тисячі мегават, питома площа водосховищ є у десятки-сотні разів меншою за цей показник для рівнинних ГЕС, більшість із них розташовані на незаселених територіях, непридатних для сільськогосподарського виробництва та ін. Характерний приклад: Саяно-Шушенська ГЕС у Росії має потужність близько 6000 МВт, висота її греблі – майже 250 м, тобто її потужність співпадає із сумарною потужністю усіх ГЕС та ГАЕС України на сьогодні, а вироблена електроенергія є втричі більшою. Тому висотні ГЕС є конкурентоспроможними з іншими типами електростанцій, навіть коли вони працюють лише у базових режимах, а за обсягами виробленої електроенергії в цілому у світі значно переважають рівнинні.

Особливості роботи ГЕС в Україні. В Україні всі ГЕС є рівнинними, мають невисокі економічні показники та значні екологічні вади, та все одно вони використовуються у структурі генеруючих потужностей Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України. Справа в тому, що теплові електростанції (вугільні чи газомазутні), маючи у своєму складі теплові котли, не можуть швидко змінювати свою потужність. Максимальна швидкість її зміни не перевищує $(0,06 - 0,07) P_{ном} / хв$, де $P_{ном}$ – номінальна потужність енергоблока. При перевищенні цієї швидкості метал трубопроводів котла може зруйнуватися. Котли на АЕС мають працювати в постійному (базовому) режимі, регулювання потужності всього енергоблока при цьому здійснюється останнім часом системними засобами. Разом із тим добовий графік електричних навантажень (ГЕН), який повинна забезпечити (покрити) енергосистема, має певну нерівномірність (ранковий та вечірній максимуми), коли швидкість зміни потужності помітно перевищує максимально допустиму зміну потужності ТЕС. Тому у структурі генеруючих потужностей енергосистеми мають бути швидкодіючі джерела (не обов'язково ГЕС чи ГАЕС), які у часи пікових навантажень змогли б забезпечити баланс електричної енергії в енергосистемі та, як наслідок, нормативні значення частоти. Історично склалося, що у більшості випадків такими джерелами були ГЕС та ГАЕС. Швидкодія цих джерел лежить у межах $(0,01 - 0,025) P_{ном} / сек$, що є достатньою для забезпечення електричного балансу в системі у часи пікових навантажень. Зазначена швидкодія зумовлена у даному випадку інерційністю направляючих апаратів, які регулюють потужність гідротурбіни.

Починаючи з ХІХ-го століття ГЕС та ГАЕС були безальтернативними джерелами в енергосистемах для покриття пікових навантажень. Очевидно, що за умов безальтернативності питання доцільності використання цих джерел у складі ОЕС України не могло виникати. Однак не менш зрозумілим є також те, що обсяги використання ГЕС та ГАЕС за зазначених умов мають бути мінімально необхідними і працювати лише на тих ділянках добових ГЕН, які не в змозі покрити ТЕС через власний ліміт швидкодії.

Не менш важливим є те, що протягом останніх десятирічч були створені технології регулювання частоти і потужності в енергосистемах, які здатні успішно конкурувати і потіснити у цій царині гідроелектростанції.

У зв'язку з зазначеним *метою* даної публікації є перегляд ролі та обсягів використання гідроенергетики в об'єднаних енергосистемах і, як наслідок, перегляд документа «Програма розвитку гідроенергетики на період до 2026 року».

Аналіз документа «Програма розвитку гідроенергетики до 2026 року». Програма розвитку енергетики на період до 2026 року (далі – Програма) була схвалена КМ України розпорядженням від 13.07.2016 р. № 552-р. Метою Програми є забезпечення енергетичної безпеки держави шляхом ефективного розвитку гідроенергетики з максимальним використанням економічно ефективного гідроенергетичного потенціалу, вдосконалення управління об'єктами гідроенергетики, підвищення рівня їхньої безпеки, збільшення регулюючих маневрових потужностей ГЕС і ГАЕС для підвищення стійкості та надійності роботи ОЕС України та інтеграції її в Європейську енергетичну систему, змен-

шення обсягу споживання органічних паливних ресурсів та техногенного навантаження на навколишнє природне середовище.

У Програмі описано сучасний стан гідроенергетики України, основні напрями її розвитку і перспективні проекти нового будівництва та реконструкції гідрогенеруючих потужностей. Наведено оцінки ефективності та очікувані результати реалізації Програми. У додатках до неї представлено план модернізації існуючих потужностей гідроенергетики ОЕС України та будівництва нових об'єктів гідроелектростанцій: Дністровської ГАЕС, Канівської ГАЕС, Каховської ГЕС-2, каскаду верхньодністровських гідроелектростанцій і Ташлицької ГАЕС та описано заходи із розроблення необхідної проектної документації, модернізації, реконструкції та нового будівництва об'єктів гідроенергетики, строки виконання зазначених заходів і відповідальні за їхнє виконання.

Гідроенергетика є складовою частиною ОЕС України, і рівень її розвитку має чітко відповідати структурі всіх генеруючих потужностей. Слід враховувати, що нове будівництво ГЕС та (особливо) ГАЕС започатковується лише за необхідності підтримки частоти в ОЕС у нормованих межах. Тому перед тим, як розпочати визначення обсягів перспективного будівництва ГЕС та ГАЕС, слід розрахувати потребу в електроенергії для економіки та соціальної сфери країни на період до 2026 р., спрогнозувати перспективні графіки електричних навантажень, обсяги імпорту і експорту електроенергії. Після цього з'являється можливість провести розрахунок майбутньої оптимальної структури генеруючих потужностей ОЕС України та визначити мінімально необхідну потужність ГЕС та ГАЕС. Розрахунки можна не робити за наявності затверджених відповідними державними органами документів, де зазначені показники або дані вже фігурують. Однак таких посилань у Програмі не представлено. За таких умов попередньо слід визначити необхідні обсяги пікових потужностей в ОЕС України на період до 2026 року і відповідно встановити доцільні (зазвичай мінімально необхідні) потужності ГЕС та ГАЕС.

Однак у Програмі замість того, щоб сформувану перспективну структуру ГЕС та ГАЕС із необхідною їхньою потужністю, запропонована структура, в якій загальна потужність гідроелектростанцій в ОЕС України є максимально можливою, а обмежуючим фактором є лише природні (географічні) умови.

У зв'язку з цим нагадаємо, що у 1990 році сумарна встановлена потужність електростанцій України дорівнювала 55,4 млн кВт, у т.ч. ГЕС та ГАЕС – 4,7 млн кВт. При цьому ОЕС України виробляла 298,5 млрд кВт·год електроенергії, а частота у ній забезпечувалася у діапазоні $50 \pm 0,2$ Гц (нормативні вимоги). У 2017 р. за практично такої самої встановленої потужності виробництво електроенергії зменшилося до показника 155,4 млрд кВт·год (майже вдвічі), а потужність ГЕС та ГАЕС зросла до 6,06 млн кВт. Вимоги щодо стабільності частоти залишилися незмінним. За цих умов ГЕН дещо розуцільнився, але його форма змінилася незначно. Співставлення цих даних свідчить про те, що за цих умов сумарна потужність ГЕС і ГАЕС вже у 2017 р. була надлишковою з цієї точки зору, а цілком достатньою була б потужність 4,7 млн кВт.

Окрім того, на рівні 2026 р. Програма передбачає введення в експлуатацію усіх ГЕС та ГАЕС в ОЕС України, які планувалися до спорудження в попередній період. Більш того, планується навіть додаткове будівництво гідроелектростанцій. Проте тоді прогнозувалося, що споживання електроенергії в Україні становитиме 400 – 450 млрд кВт·год. Наразі діючою Енергетичною стратегією України на період до 2035 р. визначено, що обсяги виробництва електроенергії у 2025 р. будуть складати 178 млрд кВт·год, а внесок ГЕС та ГАЕС – 12 млрд кВт·год. Програмою заплановано, що сумарна потужність ГЕС та ГАЕС у 2026 р. досягне значення 9,36 млн кВт.

Додатково для порівняння: згідно із звітними даними Міністерства палива та енергетики України у 2005 році було вироблено 185,2 млрд кВт·год електроенергії, доля ГЕС та ГАЕС – 12,3 млрд кВт·год при загальній їхній потужності 4,7 млн кВт та загальній встановленій потужності енергосистеми 52 млн кВт [2]. Слід зазначити, що форми графіків електричних навантажень за 2005 та 2026 рр. повинні практично співпадати, оскільки основні структурні зрушення в економіці України станом на 2005 рік в основному вже відбулися.

Аналіз, наведений вище, дає змогу зробити висновок про те, що наразі встановлена потужність ГЕС та ГАЕС в ОЕС України обсягом 6,06 млн кВт є достатньою. Тому введення в експлуатацію нових потужностей гідроелектростанцій обсягом 3,3 млн кВт за рахунок нового будівництва у період до 2026 р. є необґрунтованим і економічно недоцільним.

Необґрунтованою і помилковою за суттю є теза відносно того, що використання ГЕС та ГАЕС у часи максимальних навантажень є безальтернативним. Це було справедливим починаючи з XIX ст. та до 70-х – 80-х років XX століття. На сьогодні розроблені та у провідних країнах світу знай-

шли застосування щонайменше три нові технології, які за економічними, технічними та екологічними характеристиками значно виграють у порівнянні з ГЕС та ГАЕС. Це споживачі-регулятори на теплових насосах, споживачі-регулятори на електрокотлах та потужні електрохімічні батареї [3,4].

Проведемо аналіз кожної з цих технологій. Для цього на конкретних даних співставимо характеристики проекту будівництва Канівської ГАЕС та проекту використання комплексу споживачів-регуляторів на теплонасосних установках. У проекті будівництва Канівської ГАЕС [5] розглянуто два альтернативних варіанти: спорудження газотурбінної електростанції та імпорт високоманеврової електроенергії відповідного обсягу. Ці варіанти виглядають досить слабкими. Вони дійсно програють навіть варіанту будівництва Канівської ГАЕС. У той самий час для вирішення задач покращення керованості енергетичної системи України в тому числі для вирішення задач автоматизованого та автоматичного регулювання частоти і потужності в ОЕС України доцільно використовувати нову технологію, що базується на використанні теплонасосних установок (ТНУ). Зазначені ТНУ споживають електроенергію для виробництва тепла, що надходить у системи централізованого тепlopостачання (СЦТ). Завдяки акумулюючим здатностям СЦТ та іншим їхнім властивостям компресійні ТНУ можуть досить ефективно застосовуватись як споживачі-регулятори в системах автоматичного регулювання частоти і потужності, а також в автоматизованих системах диспетчерського управління для покриття графіків електричних навантажень. Вимоги щодо необхідності використання цих технологій зафіксовані в Енергетичній стратегії України (редакції 2006 та 2013 рр.). Тому розробники даного проекту, з нашої точки зору, повинні були розглянути альтернативний проект введення в роботу комплексу споживачів-регуляторів на базі ТНУ, який за системним ефектом в ОЕС України міг би замінити Канівську ГАЕС зі значним технологічним, економічним та екологічним ефектами.

У [6] наведено дані співставного аналізу техніко-економічних та екологічних характеристик проекту Канівської ГАЕС і альтернативного проекту будівництва комплексу споживачів-регуляторів на ТНУ. Останній виявився значно ефективнішим у порівнянні з проектом Канівської ГАЕС, оскільки він:

- вимагає на 2487,4 млн грн. менше капіталовкладень (тут і далі – ціни 2012 р.);
- забезпечує річний чистий прибуток на 5617,1 млн грн. більший у порівнянні з проектом будівництва ГАЕС;
- забезпечує окупність капіталовкладень протягом 1,55 року замість 24,6 років за проектом ГАЕС;
- забезпечує скорочення споживання природного газу на котельнях та ТЕЦ на 2,6 млрд куб. м, необхідних для вироблення на них 20,337 млн Гкал тепла, оскільки ТНУ використовують електроенергію, вироблену без вживання природного газу. Цей фактор є важливим з міркувань енергетичної безпеки України;
- щорічно використовує 2,69 млн т у.п. скидного техногенного тепла та енергії доквілля, що забезпечує значне зростання його економічної ефективності та скорочує викиди парникових газів та інших шкідливих речовин;
- не має жодних загроз щодо спотворення природних ландшафтів, втрат історичних пам'яток, затоплення родючих земель, переселення людей та ін.;
- може бути реалізований у термін значно коротший за термін будівництва Канівської ГАЕС;
- може бути реалізований з використанням устаткування українського виробника, оскільки ТНУ представляють собою холодильні машини, виробництво яких давно і добре освоєне в Україні;
- має інноваційний характер, захищений відповідними патентами, тоді як ГАЕС спирається на застарілу, неефективну технологію 19-го століття.

Наведемо ще одну перспективну альтернативну розробку. У [7] представлено результати виконання проекту ущільнення графіків електричних навантажень шляхом впровадження електрокотлів на ТЕЦ. Цей проект був реалізований в енергосистемі Білорусії під час введення в експлуатацію АЕС потужністю 2380 МВт. Згідно з цим проектом у нічні часи (нічний «провал») частина електричної потужності ТЕЦ не передається в мережу, а спрямовується на електричні котли ТЕЦ, що виробляють теплову енергію, яка передається в систему централізованого тепlopостачання. В інші години доби електрокотли вимикаються. Зменшення електричної потужності ТЕЦ в енергосистемі компенсується потужностями АЕС, завдяки чому АЕС отримують можливість працювати у базовій частині графіка

навантаження. За суттю цей проект є використанням споживачів-регуляторів на електрокотлах для ліквідації нічних «провалів», що є безпосереднім призначенням ГАЕС. Розробники визначили, що термін окупності цього проекту становить 0,5 – 1,5 року залежно від ціни на природний газ. При цьому як альтернативний варіант розглядалася можливість роботи АЕС у маневровому режимі. Про можливість використання ГАЕС з метою забезпечення роботи АЕС у базовому режимі в цьому проекті навіть не розглядалося.

Не так давно на ринку великих накопичувачів електроенергії з'явилися розробки, здатні успішно конкурувати з ГЕС та ГАЕС, – це потужні акумуляторні батареї (АБ). У ряді енергосистем розвинених країн встановлено і працюють АБ різної фізичної природи потужністю 100 МВт і більше з ємністю понад 400 МВт·год. [4]. Акумуляторні батареї мають дуже високу швидкодію. Швидкість зміни потужності АБ становить більше $7.00 P_{ном}/сек.$ Швидкодія є ключовим параметром генератора електроенергії у разі вирішення питання щодо використання його як регулятора в системі регулювання частоти. Для АБ характерним є також високий коефіцієнт корисної дії (він перевищує ККД ГАЕС майже вдвічі), відсутність загрози спотворень природних ландшафтів, руйнації природних заповідників та історичних пам'яток, малі займані площі, менші питомі капіталовкладення, відсутність загрози виникнення надзвичайних ситуацій типу руйнування гребель внаслідок стихійних явищ чи терактів та ін., простота в експлуатації та демонтажу. Таким чином, використання АБ слід розглядати як технологію, що на ринку технічних засобів зберігання електроенергії вже в недалекому майбутньому зможе значно потіснити використання ГЕС і ГАЕС.

Підсумовуючи викладене вище, слід зазначити, що наведені технології є альтернативами спорудженню нових рівнинних ГЕС та ГАЕС, і згідно з вказаними даними мають значно кращі показники, ніж варіанти будівництва нових гідроелектростанцій.

У Програмі не представлено обґрунтувань для цілого ряду намірів та тверджень. По-перше, у Програмі зазначається, що «На сьогодні в ОЕС України існує дефіцит резервів потужності автоматичного вторинного регулювання. Ефективним способом забезпечити наявність швидкостартуючого резерву потужності в зазначеній системі є перепрофілювання гідроелектростанцій з добового регулювання на вторинне регулювання частоти/потужності, для чого необхідне перспективне будівництво гідроакумуляуючих електростанцій, які будуть забезпечувати регулювання добового графіка навантаження в зазначеній енергосистемі».

Нагадуємо, що ГАЕС доцільно було використовувати лише на тих часових ділянках ГЕН, де не вистачає швидкодії для їхнього покриття тепловими електростанціями. Такими ділянками є «піки» ГЕН, їхня загальна протяжність становить лише біля 10 – 15% від протяжності добового інтервалу. На інших ділянках графіка електричних навантажень ГАЕС значно програють тепловим електростанціям в економічному відношенні. З появою нових технологій регулювання частоти і потужності в нормальних (покриття ГЕН) і аварійних (вторинне регулювання) режимах перспективи використання ГАЕС взагалі стають примарними. У [8] наведено результати дослідження, які показали, що безумовним лідером у царині вторинного регулювання частоти і потужності в енергосистемах є технологія адаптивного регулювання на базі теплових насосів або електрокотлів. Побудова системи автоматичного регулювання частоти і потужності (САРЧП) з використанням споживачів-регуляторів (СР) на теплових насосах потребує на 8,235 млрд грн. (тут і далі – ціни 2013 р.) (або на 38%) менше капіталовкладень у порівнянні з традиційним варіантом використання генераторів-регуляторів згідно з [9].

Система АРЧП на основі СР забезпечує чистий річний прибуток обсягом 23,4 млрд грн протягом терміна окупності капіталовкладень 0,58 року, тоді як ці показники для системи з традиційною структурою становлять 0,81 млрд грн та 26,8 року відповідно.

Система з використанням СР забезпечує зменшення використання природного газу на котельнях та ТЕЦ на 4,33 млрд куб. м вартістю 20,51 млрд грн., необхідних для вироблення на них 33,9 млн Гкал тепла, оскільки ТНС використовують електроенергію, вироблену без використання природного газу. Цей фактор забезпечує не тільки високу економічну ефективність зазначеного варіанта структури САРЧП, а й відіграє значну роль з точки зору забезпечення енергетичної безпеки держави.

Побудова САРЧП на основі СР дає змогу щорічно використовувати 4,43 млн т у.п. скидного техногенного тепла та теплоти доквілля, що окрім забезпечення зростання її економічної ефективності скорочує викиди парникових газів та інших шкідливих речовин. Економічні переваги такого рішення у порівнянні з традиційним (економічний ефект) складають 22,59 млрд грн. щорічно. Тому використовувати ГЕС та ГАЕС в ОЕС України для вторинного регулювання в САРЧП є необґрунтованим і недоцільним.

По-друге, в програмі зазначається, що «Відповідно до Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року загальна потужність електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії, становитиме 10,9 ГВт. Передбачається зростання загальної встановленої потужності ВЕС та СЕС, що є неманевреними енергогенеруючими потужностями, майже у п'ять разів. При цьому збільшення встановленої потужності об'єктів електроенергетики, що використовують відновлювані джерела енергії, має здійснюватися в межах, які є технологічно допустимими для забезпечення надійності функціонування ОЕС України. У зв'язку з цим саме використання ГАЕС є універсальним механізмом для розв'язання всіх проблем, що існують в ОЕС України».

У [10] наведено результати дослідження процесів регулювання частоти і потужності в об'єднаних енергосистемах, де працюють потужні вітрові і сонячні електростанції, та в яких стабільність частоти забезпечується введенням у систему потужних акумуляторних батарей чи гідроелектростанцій. Ці дослідження дали змогу зробити ряд висновків. За реальних швидкодій вітру (4 – 10 м/сек) для ефективного регулювання частоти в енергосистемі ($0,2 \text{ Гц} \geq |\Delta f_{max}| \geq 0,02 \text{ Гц}$) з потужними ВЕС (15 – 25% від встановленої потужності традиційних джерел в енергосистемі) достатньо мати акумуляторні батареї, сумарна потужність яких є співставною із сумарною потужністю ВЕС.

Гідроелектростанції можуть забезпечити ефективне регулювання частоти в енергосистемі з ВЕС великої потужності тільки у разі, коли їхня потужність у 3–5 і більше разів буде вищою за сумарну потужність ВЕС. При цьому від ГЕС буде відбиратися потужність, співставна з потужністю ВЕС.

Таким чином, для того, щоб забезпечити в ОЕС України можливість роботи ВЕС загальною потужністю 10,9 ГВт, необхідно загальну потужність ГЕС та ГАЕС у ній довести як мінімум до 33 ГВт (для цього буде замало потужностей Саяно-Шушенської, Красноярської, Братської та Усть-Ілімської ГЕС разом узятих).

Крім того, зазначимо, що ДП НЕК «Укренерго» у квітні 2018 року повідомила, що в Україні до 2025 р. потрібно збудувати 2,5 ГВт високоманеврених потужностей. При цьому обсяг вже виданих технічних умов на приєднання нових потужностей відновлюваних джерел енергії до енергосистеми становить 7426 МВт (ВЕС – 4200 МВт, СЕС – 3226 МВт). З метою стабілізації частоти ДП НЕК «Укренерго» планує побудувати газопоршневі електростанції загальною потужністю 2000 МВт та встановити 500 МВт акумуляторних батарей [11]. Як видно з наведеного, ДП НЕК «Укренерго» у перспективі до 2025 р. не планує використовувати потужності ГАЕС для стабілізації частоти при роботі ВЕС та СЕС. Натомість у її плани входить використання акумуляторних батарей.

І нарешті, по-третє, незрозумілими видаються твердження Програми щодо скорочення використання палива, викидів шкідливих речовин та парникових газів на ТЕС внаслідок впровадження ГАЕС. Проектні коефіцієнти корисної дії українських ГАЕС знаходяться згідно з Програмою в діапазоні 70 – 75%, а фактичні – ненабагато перевищують 50%. Тому, як зазначалося вище, ГАЕС виробляє електроенергії значно менше, ніж споживає. Таким чином, усі твердження Програми щодо економії палива та скорочення шкідливих викидів внаслідок впровадження ГАЕС є необґрунтованими і помилковими. У дійсності ситуація є діаметрально протилежною. Споживання палива та обсяги викидів шкідливих речовин на ТЕС внаслідок зростання потужностей ГАЕС в енергосистемі збільшаться.

Висновки. 1. При формуванні Програми були припущені помилки. Так, замість того, щоб розробити перспективну структуру генеруючих потужностей ОЕС України з виділенням у ній сектора гідроенергетики з мінімально необхідними обсягами нового будівництва ГЕС та ГАЕС, у Програмі фігурує необґрунтовано утворений перелік гідроелектростанцій, який складає сценарій максимально можливого їх будівництва на території України. При цьому на рівні 2026 р. встановлена потужність ГЕС та ГАЕС в Україні згідно з Програмою повинна становити 9363,8 МВт, а обсяги їхнього нового будівництва у період до 2026 р. – 3300,5 МВт. Докази необхідності наведених обсягів використання ГЕС та ГАЕС в ОЕС України у Програмі відсутні.

2. Наявні фактичні дані та прогнози розвитку ОЕС України показують, що протягом зазначеного періоду вже існуючі потужності ГЕС та ГАЕС обсягом 6063,3 МВт є надлишковими, їх надлишок становить не менше 1363,3 МВт, а нове будівництво ГЕС та ГАЕС обсягом 3300,5 МВт не є необхідним для ОЕС України. Враховуючи зазначене, а також те, що ГЕС та ГАЕС є екологічно небезпечними об'єктами, їх нове будівництво на території України у вказаний період є необґрунтованим і недоцільним.

3. Необґрунтованими виглядають пропозиції Програми щодо використання ГЕС та ГАЕС для вторинного регулювання в системі автоматичного регулювання частоти і потужності в ОЕС України.

Для цього, як показано вище, набагато ефективнішими в економічному та екологічному відношеннях є системи зі споживачами-регуляторами на теплових насосах та електродкотлах.

4. Пропозиції Програми щодо використання ГЕС і ГАЕС для стабілізації частоти в енергосистемах, в яких працюють потужні вітрові та сонячні електростанції, виглядають необґрунтованими та помилковими. Так, у структурі гідроелектричної потужності є інерційні механічні агрегати (направляючі апарати), що регулюють потужність гідроагрегату. Ці агрегати мають певну інерційність, і тому швидкість зміни потужності гідроагрегату не може перевищувати $(0.01 - 0.025) P_{ном} / \text{сек}$. У той самий час швидкість зміни електричної потужності вітроагрегату у 3 – 5 і більше разів вища, тому загальна потужність ГЕС та ГАЕС при спробах регулювати 10,9 ГВт потужностей ВЕС та СЕС (пропозиція Програми) повинна буде становити не менше 33 ГВт. В умовах України це є неможливим.

5. У зв'язку з наведеним у п.п. 1 – 4 пропонується розробити уточнену редакцію Програми, в якій розвиток гідроенергетики України буде визначено в органічному зв'язку з перспективним розвитком ОЕС України з урахуванням сучасних технологій виробництва, зберігання та використання електроенергії, у тому числі, технологій із застосуванням відновлюваних і нетрадиційних джерел.

6. У новій редакції Програми пропонується визначити доцільні обсяги використання в ОЕС України потужностей ГЕС та ГАЕС у період до 2026 р. Наведене нами значення 4,7 ГВт наразі є лише експертною оцінкою цього показника.

7. Нове будівництво ГЕС та ГАЕС в уточненій Програмі пропонується не планувати у зв'язку з тим, що загальний поточний обсяг наявної потужності ГЕС та ГАЕС в ОЕС України (6063,3 МВт) є на 1363,3 МВт більшим за верхню оцінку її мінімально доцільного рівня для 2026 р.

8. Програма передбачає виділення на нове будівництво ГЕС та ГАЕС у період до 2026 року капіталовкладень у розмірі 64,36 млрд грн. (ціни 2012 р.) або 8,04 млрд доларів США. Замість того, щоб спрямовувати ці великі кошти на будівництво нових гідроелектричних станцій загальною потужністю 3300,5 МВт, вважаємо більш доцільним використати їх на модернізацію та реконструкцію діючих теплових електростанцій. Питомі капіталовкладення на ці роботи складають 210 – 250 дол. США на 1 кВт потужності ТЕС [12]. Тобто, вивільнених коштів, а це 8,04 млрд дол. США, буде цілком достатньо для проведення модернізації та реконструкції ТЕС загальною потужністю 35000 МВт. За ці кошти практично всі теплові електростанції ОЕС України можуть бути в короткі терміни оновлені з доведенням їхніх техніко-економічних характеристик як мінімум до проектних показників. У результаті зменшаться до проектних питомі витрати палива (зменшиться собівартість виробництва електроенергії), зменшаться до проектних показники викидів пилу, оксидів сірки та азоту, вуглекислого газу, зросте діапазон розвантаження та швидкість зростання/зменшення потужності, буде ліквідована необхідність нічних зупинок крупних енергоблоків, покращаться показники за частотою в енергосистемі, зменшиться кількість аварій, з'явиться ще ціла низка позитивних чинників, що в результаті забезпечить зростання рівня енергетичної безпеки країни, спрощеним буде приєднання ОЕС України на паралельну роботу з енергосистемою ENTSO-E Євросоюзу, підвищиться конкурентоспроможність нашої енергосистеми, її екологічність та надійність роботи.

9. Надзвичайно важливою проблемою є радикальне покращення екологічного стану поверхневих вод в Україні. Зокрема, вже наразі екологічний стан р. Дніпро є критичним, що є добре відомим фактом, який не знайшов відображення у Програмі.

На нашу думку, поряд із низкою важливих заходів, спрямованих на радикальне покращення стану поверхневих вод в Україні, що мають суто екологічний сенс, вже навіть у поточному стані може бути обґрунтовано запропонований техніко-технологічний напрям ефективної екологізації р. Дніпро та (за необхідності) річок Дністер і Південний Буг. Цей напрям складається з кількох етапів:

- формування структури генеруючих потужностей ОЕС України на перспективу (до 2045 – 2050 рр.) з етапом до 2025 р., в якій будуть надані можливості використання як традиційних, так і новітніх (у т. ч. – відновлюваних) технологій виробництва та зберігання електроенергії;
- визначення на цій основі мінімально необхідних та доцільних обсягів використання ГЕС та ГАЕС;
- визначення обсягів технічно можливого і екологічно доцільного обсягу екологічного пропуску води поза гідроагрегатами ГЕС з метою позбавлення явища цвітіння у їхніх водосховищах;

- обсяги екологічно необхідного пропуску води повинні мати пріоритет перед мінімально необхідними потужностями ГЕС і ГАЕС; у разі, коли у віддаленій перспективі (наприклад, після 2045 р.) існуючі обсяги гідроелектричних станцій виявляються меншими за мінімально необхідні, їх (обсяги потужності гідроелектричних станцій) можна доповнити потужностями споживачів-регуляторів, великих акумуляторних батарей або мобільних маневрових атомних станцій.

У будь-якому разі за сучасного розвитку енергетичних технологій та науки навіть за наявності кризових явищ в Україні в економіці, фінансовій і соціальних сферах є можливості розробити та реалізувати з прийнятними витратами ефективну структуру енергосистеми України, яка буде позбавлена таких явищ, як цвітіння Дніпра, руйнація Чернечої гори, цілої низки природних заповідників та історичних пам'яток нашої країни.

1. Кулик М.М., Горбулін В.П., Кириленко О.В. Концептуальні підходи до розвитку енергетики України (аналітичні матеріали). Київ: Інститут загальної енергетики НАН України, 2017. 78 с.

2. Енергетична стратегія України до 2030 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. № 145-р. 129 с.

3. Лайзерович А.Ш. Возвращаясь к теме покрытия переменной части графиков энергопотребления в США. *Электрические станции*. 2018. № 6. С. 20–28.

4. Tesla completes Energy Storage Project for Southern California Edison. *Power Engineering*. 2017. No 3. Pp. 61–65.

5. Будівництво Канівської гідроакумулюючої електростанції. URL: www.uge.ua (дата звернення 15.01.2019)

6. Кулик М.М. Співставний аналіз техніко-економічних характеристик Канівської ГАЕС та комплексу споживачів-регуляторів для покриття графіків електричних навантажень. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. № 4 (39). С. 5–10.

7. Трутаев В.И., Сыропушинский В.М. Применение электрокотлов на ТЭЦ как эффективный способ получения маневренной электрической мощности в энергосистеме Белорусии с вводом АЭС. *Энергетическая стратегия*. 2010. № 4 (16). С. 19–24.

8. Кулик М.М. Техніко-економічні аспекти використання споживачів-регуляторів в системах автоматичного регулювання частотою і потужністю. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. № 1 (40). С. 20–28.

9. Основні вимоги щодо регулювання частоти та потужності в ОЕС України. Нормативний документ Мінпаливенерго України. Настанова. СОУ-Н ЕЕ ЯЕК04156:2009. Затверджено: Наказ Міністерства палива та енергетики від 24 березня 2009. № 158. С. 4–48.

10. Кулик М.М., Згуровець О.В. Особливості використання гідроелектростанцій та акумуляторних батарей для стабілізації частоти в енергосистемах. *Енерготехнології та ресурсосбереження*. 2018. № 4. С. 3–11.

11. URL: https://lb.ua/economics/2018/10/26/410950_ukrenergo_hochet_postroit.html (дата звернення 15.01.2019).

12. Борисов М.А. Развитие тепловой энергетики Украины на основе модернизации основного тепломеханического оборудования ТЭС. Автореферат дисертації канд.техн.наук. Київ. Інститут загальної енергетики НАН України. 2008. 23 с.

УДК 621.311

СОСОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ УКРАИНЫ

М.Н. Кулик¹, академик НАН Украины, А.В. Кириленко², академик НАН Украины

¹ Інститут общей энергетики НАН Украины, ул. Антоновича, 172, Киев, 03150, Украина, e-mail: info@icenergy.kiev.ua

² Інститут електродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: kvyrylenko@ied.org.ua

Определены особенности и выполнен анализ Программы развития гидроэнергетики Украины до 2026 г. Показано, что в настоящее время применение гидроэлектрических и гидроаккумулирующих станций для покрытия пиковых нагрузок как по техническим, так и экономическим и экологическим показателям уступают более прогрессивным методам. Рассмотрены новые технологии покрытия пиковых нагрузок, регулирования частоты и мощностей в энергосистемах, которые способны успешно конкурировать с гидроэлектростанциями. Определены минимальные объемы маневренных мощностей, которые должны быть в составе Объединенной энергетической системы Украины. Выполнен сравнительный анализ технико-экономических и экологических характеристик проекта Каневской гидроаккумулирующей станции и альтернативного проекта строительства комплекса потребителей-регуляторов на теплонасосных установках. На примере реализации проекта уплотнения графиков электрических нагрузок путем внедрения электрокотлов на ТЭЦ при вводе в эксплуатацию

в энергосистеме Беларуси АЭС мощностью 2380 МВт показаны преимущества этого решения. Приведены результаты сравнительного исследования процессов регулирования частоты и мощностей в энергосистемах с мощными ветровыми и солнечными электростанциями, в которых стабильность по частоте обеспечивается введением в систему мощных аккумуляторных батарей и гидростанций. Библ. 12

Ключевые слова: гидро-и гидроаккумулирующие электрические станции, маневровые мощности, потребители-регуляторы на теплонасосных установках, регулирование частоты и мощности в системах с ветровыми и солнечными электростанциями.

THE STATE AND PROSPECTS OF HYDROENERGY OF UKRAINE

M.M. Kulyk¹, O.V. Kyrylenko²

¹ Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
str. Antonovycha, 172, Kyiv, 03150, Ukraine, e-mail info@ienergy.kiev.ua

² Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: kyrylenko@ied.org.ua

The features and the analysis of the program of development of hydropower of Ukraine till 2026 are determined. It is shown that at present, the use of hydroelectric and hydroaccumulation plants to cover peak loads, both in terms of both technical and economic and environmental performance inferior to more advanced methods. New technologies of coating peak loads, frequency and power regulation in power systems that are able to compete successfully with hydroelectric power plants are considered. Determine the minimum volumes of maneuver capacity that the Joint Energy System of Ukraine should have in its composition. A comparative analysis of technical and economic and environmental characteristics of the project of the Kaniv hydroaccumulation plant and an alternative project for the construction of a complex of consumers-regulators on heat pump installations is performed. On the example of the project implementation, the compaction of the schedules of electrical loads by the introduction of electric boilers on the heat and power plant by the commissioning in the power grid of Belarus of a nuclear power station with a capacity of 2380 MW shows the advantages of this solution. The results of the comparative study of the frequency and power regulation processes in power systems with powerful wind and solar power stations in which the stability of the frequency is ensured by the introduction of a system of powerful storage batteries and hydraulic power plants are given. The advantages and disadvantages are defined. References 12.

Keywords: hydro-and hydro-accumulating power plants, shunting power, consumer-regulators in heat pump installations, frequency and power control in systems with wind and solar power stations.

1. Kulyk M.M., Gorbulyan V.P., Kyrylenko O.V. Conceptual approaches to the development of Ukrainian energy (analytical materials). Kyiv: Instytut Zahalnoi Enerhetyky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2017. 78 p. (Ukr)
2. Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2030, approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine from March 15, 2006. No 145-p. 129 p. (Ukr)
3. Layzerovych A.Sh. Returning to the topic of covering a variable part of the US energy consumption grades. *Elektricheskie stantsii*. 2018. No 6. Pp. 20–28. (Rus)
4. Tesla completes Energy Storage Project for Southern California Edison. *Power Engineering*. 2017. No 3. Pp. 61–65.
5. Construction of the Kaniv hydropneumatic power station. URL: www.uge.ua (accessed 15.01.2019). (Ukr)
6. Kulyk M.M. Correlation analysis of the technical and economic characteristics of the Kaniv HPP and a set of consumer regulators to cover the schedules of electrical loads. *Problemy zahalnoi enerhetyky*. 2014. No 4 (39). Pp. 5–10. (Ukr)
7. Trutayev V.I., Syropuschynsky V.M. The use of electric boilers at the HPP as an effective way to obtain mobile electric power in the power system of Belarus with the introduction of nuclear power plants. *Energeticheskaya strategiya*. 2010. No 4 (16). Pp. 19–24. (Rus)
8. Kulyk M.M. Technical and economic aspects of the use of consumer regulators in systems of automatic regulation of frequency and power. *Problemy zahalnoi enerhetyky*. 2015. No 1 (40). Pp. 20–28. (Ukr)
9. Basic requirements for frequency and power regulation in the UES of Ukraine. Regulatory document of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. Attitude. Approved: Order of the Ministry of Fuel and Energy of March 24, 2009. No 158. Pp. 4–48. (Ukr)
10. Kulyk M.M., Zgurovets O.V. Specifics of the use of hydroelectric power stations and storage batteries for frequency stabilization in power systems. *Energotekhnologii i resursoberezhnie*. 2018. No 4. Pp. 3–11. (Rus)
11. URL: https://lb.ua/economics/2018/10/26/410950_ukrenergo_hochet_postroit.html (accessed 15.01,2019).
12. Borysov M.A. Development of heat energy of Ukraine on the basis of modernization of the main heat and power equipment of the TPP. Diss. cand. tekhn.nauk. Kyiv, 2008. 23 p. (Ukr)

Надійшла 21.02.2019
Остаточний вріант 04.03.2019