

12. **Tao Y.** Deadbeat Repetitive Control for a grid-connected inverter with LCL Filter / **Y. Tao, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou, L. Liu** // IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). – Edinburgh, United Kingdom. – 2019. – Pp. 573-577.

13. **Ueta H.** 1MHz multiresampling deadbeat control with disturbance compensation method for three phase PWM inverter / **H. Ueta, T. Yokoyama** // International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). – Niigata, 2018. – Pp. 1883-1889.

14. **Xing Y.** An improved deadbeat plus plug-in repetitive controller for three-phase four-leg inverters / **Y. Xing, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou** // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Beijing, 2017. – Pp. 6325-6329.

УДК 621.311:620.92

О.А. ШРАМ, канд. техн. наук, доц., Ю.Г. КАЧАН, д-р техн. наук, проф.
Національний університет «Запорізька політехніка»

ВИЗНАЧЕННЯ ДОЦІЛЬНИХ ЗАСОБІВ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Метою дослідження є аналіз сучасних способів накопичення електроенергії, які можуть бути використані в мережах промислових підприємств та визначення доцільності їх застосування.

Методи дослідження. У статті використано теоретичні та емпіричні загальнонаукові методи дослідження, опис, аналіз та узагальнення тощо.

Наукова новизна. В роботі представлено аналіз доцільності використання різних засобів накопичення електричної енергії в мережах промислових підприємств з метою зменшення перетоків енергії при використанні відновлюваних джерел.

Практична значимість дослідження полягає в визначенні доцільних засобів накопичення електроенергії в мережах промислових підприємств, оскільки дає можливість зменшити небажані двонаправлені перетоки енергії та знизити її втрати.

Результати дослідження. В статті розглянуто сучасні способи накопичення електроенергії, які можуть бути використані в мережах промислових підприємств. До них відносяться акумуляторні батареї, двошарові електростатичні конденсатори, гідроакумуляуючі станції та водневі установки. Проведений аналіз технічних параметрів різних типів літєвих акумуляторних батарей показав, що використання цього засобу накопичення ускладнене через проблеми організації плаваючого заряджання та неможливості роботи в режимі струмових переважань. Використання суперконденсаторів в якості накопичувачів енергії обмежено значною питомою вагою високою вартістю. В той же час паралельна робота суперконденсаторів разом з акумуляторними батареями дозволяє суттєво покращити експлуатаційні характеристики останньої. Проведено аналіз використання гідроакумуляуючих станцій в мережах з відновлюваними джерелами енергії. Зазначено, що для ефективної роботи гідроакумуляуючої станції на території підприємства необхідно вирішити проблему накопичення великої кількості води. Високий потенціал щодо ефективного зберігання енергії мають новітні натепер водневі накопичувачі.

В статті розглянуто сучасні способи перетворення водню в електричну енергію за допомогою твердооксидних паливних елементів. Представлено технічні характеристики паливних комірок найбільш крупних виробників США, Канади, Німеччини, Японії, Південної Кореї.

Ключові слова: накопичувач енергії, відновлювані джерела енергії, паливна комірка, воднева енергетика, суперконденсатор, електрична енергія.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-57-52-59

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Значні коливання обсягів споживання енергії в електромережах промислових підприємств, а також зростаючі обсяги впровадження ними у якості власних розосереджених на їх території додаткових джерел останньої, таких як вітро- й геліоустановки, призводить до значних і небажаних двонаправлених перетоків енергії, надто великих коливань потужності, погіршення електромагнітної сумісності у мережах, тощо [1]. Обсяги генерації зазначених джерел мають випадковий характер через залежність від конкретних погодних умов, тож їх використання без можливості накопичення достатньо великої кількості енергії є проблематичним.

Місце розташування зазначених накопичувачів у промислових електромережах може бути або безпосередньо біля вітроустановки чи сонячної електростанції, або у місцях найбільших перетоків енергії. Все це залежить від обсягів такої генерації та потужності її споживачів на конкретному підприємстві.

Постановка задачі. Метою дослідження є аналіз сучасних способів накопичення електроенергії, які можуть бути використані в мережах промислових підприємств та визначення доцільності їх застосування.

Аналіз досліджень та публікацій. Натепер існує декілька способів накопичення електроенергії, заснованих на використанні акумуляторних батарей, двошарових електростатичних конденсаторів, гідроакумуляюючих станцій і поки що недостатньо відомих й, звідси, нерозповсюджених водневих установок. Кожен з них має свої недоліки й переваги щодо використання, а, отже, й потребує з'ясування його доцільності у випадку, що розглядається. Остання ж визначається за такими показниками:

наявність коливань напруги на шинах пристрою при його розрядженні;

стабільність ємності акумулятора;

наявністю і величиною струму саморозряду, який фактично визначає ККД акумулятора;

можливістю прискореного заряджання.

Найбільш розповсюдженими зараз є електрохімічні акумулятори, найстаріший з яких - свинцево-кислотний (СКАБ). Не дивлячись на появу більш досконалих типів таких пристроїв, останній використовується й донині. Але згідно з [2] в існуючих варіантах використання сонячних чи вітрових джерел енергії СКАБ застосовувати не доцільно. Це обумовлено тим, що реалізувати щодо них так зване плаваюче заряджання, коли АБ під'єднується паралельно навантаженню і заряджається чи розряджається хаотично, взагалі неможливо.

Пристрої іншої, ніж СКАБ системи, так звані лужні чи нікель-залізні акумулятори (НЗАБ) вже мають значні переваги у порівнянні з першими, а саме: витримують великі перевантаження, не виходять з ладу навіть при нетривалих коротких замиканнях чи глибоких ступенях розряду, достатньо довго можуть знаходитися у фактично розрядженому стані тощо. Але і їх застосування у системах електропостачання з ВДЕ теж є проблематичним.

Перш за все це обумовлено тим, що саморозряд НЗАБ за наявності електроду навіть із чистого заліза за місяць становить близько 40%, а із технічного - взагалі до 80%. А це фактично зводить нанівець ККД таких пристроїв. До того ж заряджання НЗАБ, згідно з [3], робиться невеликими постійними струмами протягом 6 – 7 годин. При цьому треба стежити за температурою електроду, яка не повинна бути більше ніж +40°C. Прискорене ж заряджання таких акумуляторів супроводжується інтенсивним газовиділенням, що може призвести навіть до їх вибухів.

Лужні акумулятори з кращими можливостями з'явилися з появою сплаву La-Ni-Co. Ці, так звані, нікель-металогідридні пристрої (НМГАБ) дозволяють адсорбувати водень протягом 100 циклів заряджання-розряджання. На відміну від НЗАБ останні пристрої припускають і швидке заряджання, яке при підтриманні величини напруги на їх клеммах у 0,8 – 1,8 В забезпечує до того ж високий ККД (близько 90%). Хоча в кінці зазначеного процесу останній дещо зменшується через те, що накопичена в АБ енергія починає поступово перетворюватися в теплоту. Та все ж можливості використання нікель-металогідридних акумуляторів у системах електропостачання з ВДЕ так і залишилися, на жаль, фактично не вивченими.

І це обумовлено тим, що на ринку накопичувачів енергії з'явилися дещо нові і більш сучасні літєві акумулятори (ЛАБ), які стали тепер найбільш споживаними. Вони мають у порівнянні з СК, НЗ і, навіть, НМГ-акумуляторами кращі питомі енергетичні характеристики, значно більший ресурс придатності та суттєво більший ККД. Їх незначний саморозряд обумовлений тим, що літєвий електрод у будь-яких електролітах покривається пасивною захисною плівкою, що перешкоджає розчиненню активного матеріалу анода.

Згідно з [4] загальна річна ємність всіх типів літєвих акумуляторів, що з'явилися на ринку вже наприкінці 2015 року досягла 60 000 МВт·год, тоді як всіх інших - лише 10 000 МВт·год. Існує ж тепер три їх типи:

з металевим літєвим електродом і рідким електролітом;

літій-іонні;

літій-полімерні.

Хоча виробники літєвих пристроїв і рекомендують здійснювати їх заряджання протягом 2 - 3 годин за двоступінчастим циклом: спочатку незначним постійним струмом до досягнення необхідного значення напруги, а потім вже лише підтримувати її незмінною, та зараз вже підтверджена можливість здійснювати це й у прискореному режимі. Так в роботі [5] наведено приклад, коли літій-іонну АБ, стінки якої були покриті металевою фольгою, вдалося зарядити до

80% ємності лише за 14 хвилин. І при цьому впродовж 500 циклів. Автори роботи [6] розглядають зміну вартості акумуляторних батарей з перспективою до 2050 року. Зазначається, що при постійному зростанні ринку акумуляторів очікується зниження їх вартості незалежно від динаміки цін на сировину.

Технічні характеристики сучасних типів літєвих акумуляторів наведені в табл. 1. Очевидно, що літій-залізо-фосфатні й літій-титанові вже зараз мають велику перспективу щодо використання в електромережах з відновлюваними джерелами енергії й зростатиме вона в міру збільшення обсягів їх виробництва, а, отже, й зменшення питомої вартості таких накопичувачів (грн/кВт·год). При цьому, хоча у останніх з них термін експлуатації найбільший і досягає 7 000 циклів, перші за іншими показниками все ж мають деяку перевагу. Та все ж, на жаль, жоден з існуючих натеper, навіть, літєвих, акумуляторів не здатен працювати в режимі струмових перевантажень.

Цікавими у використанні, що розглядається, стали нові накопичувачі енергії, так звані, суперконденсатори (СК), з великою ємністю (понад 3000 Ф), яка зберігає її в подвійному електричному шарі на поверхні високопористої структури. Вони є хітом XXI століття й використовуються зараз в енергетиці у якості пристроїв для зберігання та рекуперації енергії, а також джерел безперебійного енергозабезпечення [7]. Їх питома потужність досягає 6000 Вт/кг, а кількість циклів заряджання-розряджання дорівнює сотням тисяч. Працюють такі накопичувачі і в значно більшому температурному діапазоні (від -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$). Що ж до часу виходу на максимальну споживану потужність, то він складає лише 10...30 сек.

Та все ж і такі значні переваги не привели, на жаль, суперконденсатори до широкого використання. Причиною цього стала їх значна питома вага, яка у СК енергоємністю, наприклад, 10 кВт·год складає аж 2 тонни. А ще вони надто дорогі, адже зазначений СК коштує до \$2500. Хоча і очевидно, що і в цьому випадку вже скоро, завдяки збільшенню обсягів їх виробництва, собівартість суттєво зменшиться й призведе до прийнятної для споживача ціни.

Таблиця 1

Технічні характеристики основних типів літєвих акумуляторів промислового виробництва

Характеристики	Назва та аббревіатура АБ					
	літій-кобальтовий, LCO	літій-нікель-кобальт-алюмінієвий, NCA	літій-нікель-марганцево-кобальтовий, NMC	літій-марганцевий, LMO	літій-залізо-фосфатний, LFP	літій-титановий, LTO
Катод	$LiCoO_2$	$Li(Ni_{0.85}Co_{0.1}Al_{0.05})O_2$	$Li(Ni_{0.33}Mn_{0.3}Co_{0.33})O_2$	$LiMn_2O_4$	$LiFePO_4$	графіт
Анод	графіт	графіт	графіт	графіт	графіт	$Li_4Ti_5O_{12}$
Напруга одного елементу, В:						
номінальна	3,6	3,6	3,6...3,7	3,7	3,2...3,3	2,4
робочий діапазон	3,0...4,2	3,0...4,2	3,0...4,2	3,0...4,2	2,5...3,6	1,8...2,85
Питома енергія при нормованому струмі розряду, Вт·год/кг	150...240	200...260	150...240	100...150	90...120	70...80
Ресурс, циклів	500...1000	500	1000...2000	300...700	1000...2000	3000...7000
Питома вартість накопичення енергії, грн/кВт·год	13 200	13 000	15 500	11 000	14 845	37 000

На сьогодні ж СК в основному використовують у системах живлення двигунів електромобілів, де вони приймають на себе пускові навантаження. В подальшому ж здійснюється перемикання на акумуляторну батарею [8-10]. Таке комплексне джерело дозволяє суттєво покращити експлуатаційні характеристики АБ як основного накопичувача енергії. Це запобігає провалам напруги на останньому, згладжує його розрядний струм.

Зазначене проілюстровано на рис. 1, де наведена експлуатаційна часова залежність напруги на АБ в момент підключення до неї активно-індуктивного навантаження великої потужності.

Воно призвело до 30% провалу напруги й втрати останньої по закінченню перехідного процесу до 8%. У разі ж паралельного підключення до АБ суперконденсатора перехідний процес значно покращився як за провалом, так і за подальшою втратою напруги. Тож це підтверджує надані в роботі [11] рекомендації щодо спільного використання СК з АБ у співвідношенні їх енергоємностей один до трьох.

Рис.1. Зміна напруги на літєвому акумуляторі при підключенні до нього потужного активно-індуктивного навантаження: а і б - без та з суперконденсатором

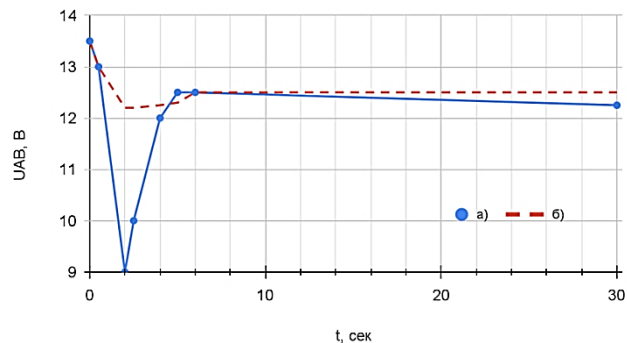
На жаль, у зазначеній роботі відсутня інформація щодо прискореного заряджання згаданого комплексного накопичувача, що ускладнює можливість оцінки його енергоефективності. Для цього бажано було б провести додаткові експериментальні дослідження і придбати відповідний досвід. Але хоча б те, що окремо один від одного літєві акумулятори й СК дозволяють це робити, свідчить про велику вірогідність, що й для комплексного накопичувача з їх використанням таке заряджання буде не менш ефективним.

Тож з наведеного вище аналізу очевидно, що в запропонованій у роботі [12] комбінованій локальній мережі, через яку всі ВДЕ промислового підприємства приєднуються до його загальної електромережі, бажано використовувати саме такий накопичувач. В зазначеному випадку до взаємопов'язаних локальних мереж змінного струму з неякісною електроенергією та постійного струму приєднуються відповідні ВДЕ без блоків забезпечення якості останньої, а вже потім і наявні на підприємстві її споживачі, які не потребують очищення електроенергії та постійного струму чи двигуни змінного струму з частотним керуванням. Згенеровані ВДЕ вже незначні у такому випадку надлишки енергії і пропонується акумулювати в накопичувачі, що знаходиться в мережі постійного струму. А вона потім через мережевий інвертор, який забезпечує двонаправлений переток енергії і приєднується до загальнозаводської мережі.

Що ж до останньої, де спостерігаються значно більші коливання потужності й перетоки енергії, які пов'язані з нерівномірним характером її споживання, то в ній потрібно, на нашу думку, мати більш потужну централізовану накопичувальну систему. Це дало б можливість підвищити енергоефективність підприємства ще й завдяки використанню так званого нічного тарифу на електроенергію та на більш вигідних з економічної точки зору умовах спілкуватися з її постачальниками. Звідси очевидно, що в умовах енергоринку підприємствам потрібно мати окремі структурні підрозділи, які б забезпечували значні обсяги накопичення електроенергії у їх власних електромережах.

Найбільш дослідженою щодо можливості зазначеного застосування є зараз гідроакумуляція [13, 14]. Вона вже давно використовується в енергетиці і має достатньо великі можливості. Це, насамперед, відомі гідроакумуляційні станції на ГЕС та атомних энергооб'єктах. В [13] розглядаються навіть приклади їх роботи з відновлюваними джерелами енергії й робиться висновок, що такі накопичувачі зможуть підвищити надійність і стабілізувати генерацію потужності розосереджених за рахунок ВДЕ систем електропостачання. Для реалізації ж гідроакумуляції потрібні лише насоси відповідної потужності, гідрогенератори з гідротурбіною (міні-ГЕС) й, звісно що, водосховища.

Якщо ж з вибором насосів та міні-ГЕС проблем на сьогодні вже не існує, то створити ємності для великої кількості води на території підприємств надто проблематично. Бо ж про ставки-накопичувачі у цьому випадку мова скоріше за все не йтиметься. Будувати ж бетонні підземні та наземні (напірні башти) водозбірників занадто дорого. Хоча саме від обсягу води в них у значній мірі залежатиме енергоефективність таких накопичувачів енергії. Адже очевидно, що сучасні насоси можуть за меншої кількості використаної електроенергії закачати в резервуар більшу кількість води (було б куди). При цьому деякі зразки мікро-ГЕС повернуть у мережу, за меншого обсягу використаної води (було б звідки), більшу кількість електроенергії. Вибрати кращі з них не складно. Вони використовуються у багатьох сферах діяльності і мають достат-



ньо великі пропозиції на вітчизняному ринку. Що ж до гідрогенераторів, то це є специфічне обладнання, яке виготовляється зараз переважно у Німеччині, Японії чи Франції.

Серед, наприклад, японських компаній, що спеціалізуються на такому виробництві слід ділити "Fuji Electric Co., Ltd." та "Marushima Hydraulic Gate Works Ltd". Ними випускаються мікро-ГЕС з пропелерною чи поперечно-струйною турбінами. Перші з них мають діапазон потужності 2,5 ... 50 кВт й розраховані на напір у 3 ... 15 м та витрату води 0,05 ... 0,5 м³/с. Другі більш потужні (до 1 000 кВт) і витримують напір до 100 м. Гідроагрегати ж, наприклад, французької фірми "Хідролес" розраховані на напір лише до 10 м й мають потужності до 50 кВт. Але у застосуванні, що розглядається, вони не менш цікаві. В табл. 2 наведені деякі відомості щодо зазначеного обладнання фірми "Fuji Electric Co., Ltd" та АО "Турбоатом".

Таблиця 2

Технічні характеристики мікро-ГЕС

МікроГЕС	Напір, м	Витрата, м ³ /с	Потужність, кВт	Країна виробник	Ціна, USD
ZD760-LM-15	3...4	0,06...0,07	2,2	Китай	1 680,00
VVP-4AA23	2	0,52	3,2	Японія	2 450,00
VVP-3AB48	4	0,35	4	Японія	2 900,00
ПР-5-Г-20	3...5	0,12...0,16	2,7...5	Україна	5 700,00
ПР-7-Г-20	4...7,5	0,13...0,24	3...10	Україна	6 900,00

Слід зауважити, що ціна мікро-ГЕС для підприємств, які використовуватимуть гідроакумуляцію, не буде враховувати вартість баластного навантаження, яке потрібне лише для поглинання надлишків активної потужності такої електростанції, якщо вона працює на ізольоване навантаження, а не на мережу. До того ж, якщо в ній будуть використані синхронні генератори, то це ще й зменшить реактивну потужність самої мережі. Що ж до вартості ємностей згаданих раніше підземного та надземного водозбірників, то саме вона, без сумніву, і буде у кожному конкретному випадку визначати економічну доцільність такої гідроакумуляційної системи. Адже це будуть досить дорогі капітальні споруди.

Не менш цікавим для створення централізованої загальномережевої системи накопичення енергії на підприємстві можуть бути й новітні натепер водневі технології.

Високий потенціал щодо ефективного зберігання енергії зумовлює постійне зростання частки водневих накопичувачів. Крім того, слід зазначити, що водень є екологічно чистим паливом, оскільки під час його згоряння не утворюються шкідливі викиди в атмосферу і скорочуються викиди парникових газів.

Українськими вченими запропонована Дорожня карта розвитку водневої енергетики, яка повинна забезпечити впровадження інноваційних технологій, розбудову вітчизняної науково-технічної та технологічної інфраструктури та ефективні шляхи використання водню в енергетичних системах з ВДЕ та в якості палива для транспортних засобів [15].

Водень в чистому вигляді практично не зустрічається, тому для його виробництва використовуються різноманітні ресурси. Так, водень може вироблятися з природного газу, біогазу, шляхом конверсії метану, за допомогою атомної енергетики тощо. Найбільш екологічно чистим методом виробництва водню на сьогодні є метод електролізу з використанням відновлюваних джерел енергії. За даними Міністерства енергетики США, собівартість виробництва водню електролізом становить від 2 до 5 доларів США за кг. Ця вартість включає вартість електроенергії (для Сполучених Штатів в середньому вона складає 0,15 доларів США за кВт·год), вартість обладнання для електролізу та інші витрати. Але, як зазначає дослідницька компанія BloomberNEF (BNEF), собівартість виробництва водню знизиться до рівня 0,8 - 1,6 USD/кг до 2050 року [16], що суттєво розширить можливості його використання.

Ефективність використання водню для генерації електроенергії залежить від технології, яка використовується для перетворення водню в електроенергію. Найпоширенішою технологією є паливний елемент (паливна комірка), який перетворює хімічну енергію водню в електричну енергію з ККД до 60%. Ці елементи складаються з двох електродів, розділених електролітом. На одному електроді відбувається окислення палива, а на іншому - відновлення кисню.

На сьогодні найпоширенішими типами паливних комірок є:

лужні паливні елементи (ЛПЕ), які працюють за відносно низьких температур (100 - 200°C) і використовують в якості палива водень і кисень. Вони мають коефіцієнт корисної дії 40 - 60%, але містять дорогі матеріали, такі, наприклад, як платина;

твердооксидні паливні елементи (ТОПЕ) працюють за більш високих температур (450 - 1000°C) і можуть використовувати в якості палива водень, метанол і природний газ. Вони мають нижчий ККД (30 - 40%), але більш стійкі до зовнішніх впливів і можуть працювати в широкому діапазоні температур.

Проточні паливні елементи (ПОПЕ) - складаються з двох каналів, якими протікають паливо й окисник. Електроліти в цих комірках знаходяться у вигляді пористих мембран, які дозволяють паливу і окиснику контактувати з електродами. ПОПЕ можуть використовуватися як стаціонарні, портативні та транспортні паливні елементи.

Сьогодні висока вартість паливних комірок та необхідність використання спеціальних видів палива обмежує їх використання. Але, безперечно, що паливні комірки є перспективною технологією, яка буде активно розвиватися в енергетичному секторі.

Найбільш крупними виробниками паливних комірок для генерації електроенергії є компанії Bloom Energy (США), Plug Power (США), Hydrogenics (Канада), Fuji Electric (Японія), Siemens (Німеччина), Doosan (Південна Корея). Вже сьогодні водневі технології використовуються для забезпечення чистою енергією цілих міст. Так, наприклад, американська компанія Plug Power у 2023 році розпочинає будівництво стаціонарної електростанції на водневих паливних елементах потужністю 8 МВт у місті Калігоста (Каліфорнія, США). Після вводу у комерційну експлуатацію наприкінці 2024 року ця електростанція буде забезпечувати місто екологічно чистою енергією під час надзвичайних ситуацій, лісових пожеж тощо. Технічні характеристики паливних комірок зазначених вище виробників наведено в табл. 3.

При виробництві водню методом електролізу молекули води розщеплюють на її складові - водень та кисень. На сьогодні такий спосіб отримання водню є найдорожчим у порівнянні з методами його виробництва на основі викопного палива. Але поєднання відновлюваних джерел енергії (ВЕС та СЕС) та виробництва низьковуглецевого, так званого "зеленого", водню дає можливість виробляти його в години мінімуму навантаження енергосистеми, коли відновлювані джерела генерують надлишкову електроенергію та в подальшому використовувати його в технологічному процесі або для генерації електроенергії в години максимального навантаження.

Таблиця 3

Технічні характеристики основних паливних комірок

Виробник	Bloom Energy	Plug Power	Fuji Electric	Siemens	Doosan
Тип паливної комірки	лужна	паливна комірка з протонообмінною мембраною (ПЕМ)			
Робоча температура	100-200°C	60-80°C	40 - 60°C	70-80°C	60-80°C
Тип палива	водень	водень	водень	водень	водень
ККД	50-60%	50-60%	48%	50-60%	50-60%
Вартість	висока	середня	середня	середня	середня
Надійність	висока	висока	висока	висока	висока
Застосування	статичні електростанції, промислові та транспортні установки				
Габарити, м	2,4×2,6×2	1,8×1,3×1,4	5,5×2,2×3,4	3,5×2,5×2,5	8,3×2,5×3,0
Вага, т	15,8	3	13,5	10	20
Електрична потужність, кВт	20 - 300	10 - 280	100	300	440

Компанія Bloom Energy використовує високоефективну технологію виробництва "зеленого" водню на основі твердого оксиду (табл. 4). Твердооксидні електролізери працюють при температурах від 500 до 850 °С, що дозволяє реалізувати більш ефективний високотемпературний електроліз і виробляти на 20 - 25% більше водню ніж низькотемпературні та лужні електролізери. Так, електролізер компанії Bloom Energy витрачає 37,7 кВт·год для виробництва 1 кг водню в той час, як лужні та мембранні електролізери - 52 - 54 кВт·год.

Таблиця 4

Технічні параметри модульних електролізерів Bloom Energy

Вихід H ₂ , (т/добу)	Вихід H ₂ , (кг/год)	Вихід H ₂ , (Нм ³ /год)	Споживана потужність, МВт
1.0	43	478	1.8
4.1	172	1914	7.2
6.2	258	2870	10.8
14.4	602	6697	25.2
28.9	1203	13394	50
57.8	2407	26789	100
115.5	4814	53577	200
300	12550	139684	525
573.5	23987	265973	1000

Електрична ефективність твердооксидного електролізера (SOEC) компанії FuelCell Energy складає 90% і може досягати 98% при використанні надлишкового тепла. Компактна конструкція модуля дозволяє легко розміщувати його поблизу джерел енергії та в зонах відчуження промислових підприємств. Розмір стандартного модулю складає лише $2.43 \times 12.19 \times 3.04$ метри, споживана потужність - 39,4 кВт·год на 1 кг водню.

Промислові накопичувальні системи засновані на водневих технологіях тільки починають застосовуватися на промислових підприємствах, але не має сумніву, що з часом їх використання тільки зростатиме. На відміну від суперконденсаторів, акумуляторних батарей та мікро-ГЕС водневі системи дозволять в перспективі суттєво підвищити коефіцієнт корисної дії систем накопичення енергії та вирішити проблему довготривалого зберігання електричної енергії.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Використання систем накопичення енергії промисловими підприємствами дозволяє значно зменшити небажані двонаправлені перетоки енергії, що виникають внаслідок випадкового характеру генерації відновлюваними джерелами енергії та нерівномірного споживання.

Використання електрохімічних акумуляторів в мережах з вітро- та геліоелектростанціями ускладнене через неможливість організації плаваючого заряджання. В цьому разі доцільно використовувати літєві акумулятори, хоча і їх здатність працювати в режимі струмових перевантажень на цей час ще недостатньо досліджена.

Значна питома вага та велика вартість суперконденсаторів обмежують можливості їх застосування в якості промислових систем накопичення електричної енергії.

Застосування на підприємствах гідроакумулявальних систем накопичення електроенергії обмежено неможливістю створення на їх території ставків-накопичувачів, а будівництво капітальних бетонних споруд для цього є надто дорогим.

Цікавим і перспективним напрямком розвитку систем накопичення енергії на промислових підприємствах є використання водневих технологій на основі електролізерів та зворотному перетворенні водню в електроенергії в твердооксидних паливних комірках.

Створення й використання потужних систем накопичення енергії промисловими підприємствами дозволить не тільки забезпечити безперервність електропостачання, але й більш ефективно інтегрувати відновлювані джерела енергії в їх власні електричні мережі.

Список літератури

1. Сінчук О. М., Краснопольський Р. І., Бойко С. М. Аспекти формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств / О. М. Сінчук, Р. І. Краснопольський, С. М. Бойко // Вісник Криворізького національного університету. – 2020. – Вип. 50. – С. 41–45. DOI: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-41-45.
2. Будько В. І. Аналіз особливостей роботи та специфіки зарядних режимів нікель-металогідридних та літєвих акумуляторних батарей / В. І. Будько // Відновлювана енергетика. - 2017. - № 2. - С. 17-25.
3. Каусс Я. Я. Выбор режимов заряда щелочных никель - железных тепловозных батарей: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.01. - Ленинград, 1984. - 124 с.
4. Types of Lithium-ion [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>.
5. Krieger E.M., Cannarella J., Arnold C. B. A comparison of lead-acid and lithium-based battery behavior and capacity fade in off-grid renewable charging applications / E.M. Krieger, J. Cannarella, C. B. Arnold // Energy. – 2013. – Vol. 60. – P. 492-500. ISSN 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.029>.
6. Lukas Mauler, Fabian Duffner, Wolfgang G. Zeier, Jens Leker. Battery cost forecasting: a review of methods and results with an outlook to 2050 // Energy & Environmental Science. The Royal Society of Chemistry. – 2021. – Vol. 14. Issue 9. – P. 4712-4739. DOI: 10.1039/D1EE01530C.
7. Кузнецов В., Панькина О., Мачковская Н. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство / В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская // Компоненты и Технологии. – 2005. – №50 (6). – С.12 - 16.
8. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте / А.К. Шидловский, В.Б. Павлов, А.В. Попов // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 43–47. http://www.techined.org.ua/2008_4/st7.pdf.
9. Смирнов О.П., Панікарський О.С., Боженів В.С., Смирнова А.О. Використання конденсаторів великої ємності для забезпечення оптимальних параметрів роботи акумуляторних батарей гібридних автомобілів / О.П. Смирнов, О.С. Панікарський, В.С. Боженів, А.О. Смирнова // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2009. – №3. – С. 50 - 55.
10. Слипченко Н.И., Письменецкий В.А., Гуртовой М.Ю. Исследование режимов работы АКБ и суперконденсатора в системе энергообеспечения электромобиля / Н.И. Слипченко, В.А. Письменецкий, М.Ю. Гуртовой //

Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Энергосберегающие технологии и оборудование. – 2012. – №58. – С. 31 – 35.

11. IEC 62196-1:2014 Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements. 2014. 176 p. [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://webstore.iec.ch/publication/6582>.

12. Качан Ю.Г., Шрам О.А. Щодо доцільної схеми приєднання відновлюваних джерел енергії до промислових електромереж / Ю.Г. Качан, О.А. Шрам // Відновлювана енергетика. – 2023. – Вип. 2(73). – С. 11-17. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2\(73\).11-17](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2(73).11-17).

13. Ramos H.M., Amaral M.P., Covas D.I.C. Pumped-Storage Solution towards Energy Efficiency and Sustainability: Portugal Contribution and Real Case Studies / H.M. Ramos, M.P. Amaral, D.I.C. Covas // Journal of Water Resource and Protection. – 2014. – Vol. 6. – P. 1099 - 1111.

14. Botterud A., Levin T., Koritarov V. Pumped Storage Hydropower: Benefits for Grid Reliability and Integration of Variable Renewable Energy, Argonne National Laboratory, 2014. – 56 p.

15. Кудря С.О., Рєпкін О.О., Яценко Л.В., Шинкаренко Л.Я., Ткаленко М.А. Концепція дорожньої карти розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року / С.О. Кудря, О.О. Рєпкін, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, М.А. Ткаленко // Відновлювана енергетика. – 2019. – Вип. 4(59). – С. 22-28. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4\(59\).22-28](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59).22-28).

16. 'Hydrogen Economy' Offers Promising Path to Decarbonization. [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://about.bnef.com/blog/hydrogen-economy-offers-promising-path-to-decarbonization/> (Дата доступу: 04.09.2023).

УДК 622.7

А.І. САМОЙЛОВ, канд. техн. наук, інженер-технолог

А.М. РЕДЬКА, гендиректор

ТОВ «Збагачувальна фабрика «Свято-Варваринська»

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЗБАГАЧЕННЯ ВУГІЛЛЯ

Мета. Метою даних досліджень є встановлення науково обґрунтованих умов побудови кривої елементарних зольностей та створення методики розрахунку показників для корегування режимів гравітаційного збагачення вугілля, що забезпечують максимальний вихід концентрату при потрібній якості.

Методи дослідження. Поставлене завдання вирішене з використанням аналізу літературних джерел, досліджень фракційних складів вугілля різної крупності і марок та методу апроксимації даних.

Наукова новизна. Показана некоректність існуючих методик побудови кривої зольності елементарних фракцій. Отримано рівняння, що зв'язує зольність елементарної фракції з зольністю та виходом сумарної фракції, що спливла. Розроблена методика розрахунку координат точок для побудови кривої зольності елементарних фракцій з використанням рівнянь зв'язку між фактичними сумарними параметрами фракцій. Запропоновані критерії оцінки точності побудови кривої зольності елементарних фракцій з використанням розрахунку кількості зольних одиниць фракцій при інтегруванні апроксимаційного рівняння та результатів апроксимації за даними важких фракцій, що потонули. Показано, що максимальний вихід концентрату при роздільному збагаченні вугілля можна досягти як при рівності зольностей елементарних шарів меж розділення згідно з положенням теореми Рейнгардта, так і при однакової густині розділення.

Практичне значення. Режимы збагачення вугілля різних марок Донбасу, що забезпечують рівні зольності елементарних шарів меж розділення чи густини розділу, дозволяють підвищити вихід концентрату при гравітаційному збагаченні в середньому на 0,4 % відносно в порівнянні з випуском концентратів машинних класів однакової зольності. Використання отриманих висновків доцільне для збагачувальних фабрик з найбільш прогресивною технологією, що включає процеси розділення у важкому середовищі. У цьому випадку густини розділу і важкої суспензії мають досить стабільну різницю, що дозволяє здійснювати оперативне регулювання режимів роботи апаратів.

Результати. На збагачувальній фабриці «Свято-Варваринська» застосування рекомендованих режимів дозволяє підтримувати середню зольність крупних відходів на рівні не нижче 86 – 87 %.

Ключові слова: вугілля, фракційний аналіз, криві збагачення, гравітаційне збагачення, режим розділення, вихід концентрату.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-57-59-64

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. При збагаченні вугілля використовуються технологічні схеми, що передбачають розділення сировини за крупністю на 3 – 4 машинних класів. Основна маса вугілля, за винятком дрібнозернистих шлаків, збагачується гравітаційними методами – за густиною компонентів. Регулювання параметрів роботи апа-