

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 1 (2025)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/PXLE1275>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А. Р.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

<https://doi.org/10.48081/DNRI6162>

***А. С. Расмухаметова¹, М. А. Ергали², К. С. Олжабаева³,
Б. Ж. Мустагулова⁴**

^{1,2,3,4}Ф. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1376-6112>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7060-5293>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2018-8835>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5191-8310>

* e-mail: a.rasmukhametova@aes.kz

ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІНІҢ ИНТЕГРАЦИЯСЫ ҮШІН ЭНЕРГИЯНЫ ЖИНАҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Бұл мақалада жаңартылатын энергия көздерінің ауқымды интеграциясы үшін энергияны сақтау технологияларына жан-жақты шолу және салыстырмалы талдау берілген. Жұмыста желіге интеграциялаудың әртүрлі сценарийлері үшін қолайлы нұсқаларды анықтау мақсатында техникалық, қаржылық және экологиялық критерийлер бойынша әртүрлі энергияны жинақтаудың жүйелері (ЭЖЖ) бағаланады. Әдіснамалық тұрғыдан, энергияны сақтау түріне байланысты жіктеледі және техникалық сипаттамалары, қаржылық көрсеткіші және қоршаған ортаға әсері бойынша бағаланады. Су жинаушы электростанциялары (СЖЭ) сияқты механикалық энергияны сақтау жүйелері сенімділік пен тиімділікті қамтамасыз ететін жетілген шешім болып табылады, әсіресе энергияны аса ірі көлемде сақтау үшін. Электрохимиялық ЭЖЖ, соның ішінде литий-ионды (Li-ion) батареялар және ванадий редокс-батареялар (ВРБ) масштабталу икемдігі мен жоғары энергия тығыздығын көрсетеді, бірақ қаржылық салымдар мен экологиялық тұрақтылыққа қатысты мәселелерге тап болады. Сонымен қатар, суперконденсаторлар және асқыноткізгіштік магниттік энергияны жинақтау жүйелері (АМЭЖЖ) сияқты жаңа технологиялар жоғары қуаттың жылдам шығарылуының арқасында электр желісінің тұрақтылығы мен сапасын арттыруға көмектеседі. Мақалада тұрақты энергетикалық

болашақты қамтамасыз ету үшін негізделген шешімдер қабылдауға ықпал ететін энергетикалық жүйеге интеграциялаудың мәселелерін шешу үшін ЭЖЖ технологияларының әртараптандырылған портфолиосының қажеттілігі көрсетілген.

Кілтті сөздер: энергияны жинақтау жүйелері, желіге интеграция, жаңартылатын энергия көздері, салыстырмалы талдау, ЭЖЖ қолдануы

Кіріспе

Жаңартылатын энергия көздерін электр желісіне интеграциялау тұрақты және сенімді энергетикалық болашаққа қол жеткізу үшін шешуші рөл атқарады. Дегенмен, жаңартылатын энергия өндірісінің айнамалы және өзгермелі сипаты, электр желілерінің тұрақтылығы мен тиімділігіне айтарлықтай қиындықтар туғызады. Энергияны сақтау жүйелері артық энергияны сақтау және қажеті бойынша беру арқылы осы мәселелерді тиімді шешуді ұсынады. Бұл мақалада техникалық, қаржылық және экологиялық аспектілерін бағалай отырып, әртүрлі ЭЖЖ технологияларына жан-жақты шолу берілген. Энергияны сақтаудың механикалық, электрохимиялық, жылу, электр және химиялық әдістерін қарастыра отырып, бұл зерттеу жаңартылатын энергия көздеріне негізделген энергия жүйелеріне ауқымды интеграция үшін ең қолайлы технологияларды анықтауға бағытталған. Өнімділікке, экономикалық тиімділікке және қоршаған ортаға әсерге негізделген жүйелі салыстырудың арқасында бұл шолу негізделген шешімдер қабылдауға және ЭЖЖ технологияларын стратегиялық енгізуге жол ашып, энергетика секторындағы мүдделі тараптар үшін құнды мәліметтер береді.

Материалдар мен әдістемері

ЭЖЖ технологияларын таңдау қолдану мақсатына байланысты, өйткені әр түрлі мақсаттар үшін әр түрлі талаптарға ие және бүгінгі таңда, барлық пайдалану сценарийлері үшін барлық критерийлер бойынша технологиялардың ешқайсысы қанағаттандыра алмайды. ЭЖЖ қолданудың негізгі бағыттарын мақсаты бойынша үш топқа бөлуге болады: электр энергиясының сапасын сақтау, қуатты сұранысын теңестіру және тәуліктік сұраныс. Қолдану аясы бойынша 5 негізгі топқа бөлінеді: генерацияны қолдау және үлкен көлемді сақтау қызметтері; инфрақұрылымды қолдау қызметтері; тарату инфрақұрылымын қолдау қызметтері; қосымша қызметтері; тұтынушылардың энергия менеджментін қамтамасыз ететін қызметтер [1, 52-б.]. Әрбір қызмет түрі үшін ЭЖЖ-не қойылатын техникалық талаптар бар, мысалы, энергия сапасын сақтау үшін жоғары қуатты энергияны жылдам босату немесе энергияның тәуліктік сұраныс үшін ұзақ разрядтау уақыты бар үлкен көлемдегі энергияны сақтау қабілеті.

ЭЖЖ үш негізгі критерий мен ішкі критерий бойынша салыстырылды. Негізгі критерийлер техникалық, қаржылық және экологиялық критерийлер болып табылады.

Техникалық критерийлер жүйенің өнімділігі мен сенімділігін бағалауға мүмкіндік береді және оның көмегімен ЭЖЖ қолдану сценарийлері таңдалады. Техникалық критерий бойынша көлемдік энергия және қуат тығыздығы, гравиметриялық энергия және қуат тығыздығы, АС-АС жүйесінің тиімділігі, жауап беру уақыты, разряд ұзақтығы және технологиялық жетілуі сияқты параметрлер бағаланады. Технологиялық жетілу дегеніміз-технологияның практикалық қолдануға дайындығы мен сенімділігі. Жетілуге әсер ететін факторларға ғылыми-зерттеу және тәжірибелік-конструкторлық кезең, нақты өмірдегі сипаттамалар және коммерциялық қол жетімділік жатады.

Қаржылық бағалау меншікті құн көрсеткіштерін талдауды қамтиды. Бұған белгіленген қуат бірлігі мен сақталған көлем бірлігі үшін күрделі шығындардың меншікті құны, сондай-ақ қызмет көрсету және пайдалану шығындары кіреді. Күтілетін қызмет ету мерзімін және өмірлік циклдар санының бағалауы, ЭЖЖ экономикалық өміршендігі мен беріктігін бағалауға көмектеседі. Бұл сандық талдау шешім қабылдаушыларға инвестицияның орындылығы мен ықтимал қайтарымын бағалауға мүмкіндік береді.

Қоршаған ортаға әсерді бағалау өндіріс, пайдалану және кәдеге жарату кезіндегі көміртегі ізін және технологияның бүкіл өмірлік циклі ішінде қоршаған ортаның ластануын бағалауды қамтиды. Жалпы экологиялық іздерді бағалау тұрақты даму мақсаттарына сәйкестікті қамтамасыз етеді.



1 – сурет ЭЖЖ технологияларының бөлінуі. СЖЭ – су жинаушы электростанция, ПЭЖЖ пневматикалық энергия жинақтау жүйесі, МЭЖЖ ө маховиктік энергия жинақтау жүйесі, Pb-Acid ө Қорғасын қышқыл батареясы, NaS – натрий-күкірт батареясы, NaNiCl₂ – натрий-никель-хлор батареясы, BPB – Ванадий редокс-батареясы, NiCd – никель-кадмий батареясы, Li-ion – литий ион батареясы, АМЭЖЖ – асқынөткізгіштік магниттік энергия жинақтау жүйесі, СКЭЖЖ – Суперконденсаторлық энергия жинақтау жүйесі, H₂ – сутек негізіндегі энергия жинақтау жүйесі.

Энергияны сақтау әдістеріне негізделген ЭЖЖ таңдау және жіктеу. СЖЭ, пневматикалық ЭЖЖ және маховиктік ЭЖЖ сияқты механикалық энергияны сақтау жүйелері олардың сенімділігі мен масштабталуына байланысты таңдалды. Литий-ионды батареяларды, қорғасын қышқылды батареяларды және ванадий тотықтандырғыш батареяларды қоса алғанда, электрохимиялық энергияны сақтау жүйелері жоғары энергия тығыздығы мен жылдам жауап беру мүмкіндігі үшін таңдалды. Асқынөткізгіштік магниттік энергия сақтау және суперконденсаторлар сияқты электр энергиясын сақтау жүйелері жоғары қуатты лезде шығару қабілеті үшін таңдалды. Ақырында, химиялық энергияны сақтау жүйелері, сутегі отын элементтері, энергияны ұзақ уақыт сақтау қабілеті және таза энергияны түрлендіру мүмкіндігі үшін таңдалды. Әр санаттың өзіндік артықшылықтары бар, бұл энергия жүйелеріне интеграциялау үшін энергияны сақтау технологияларын жан-жақты қарастыруды қамтамасыз етеді.

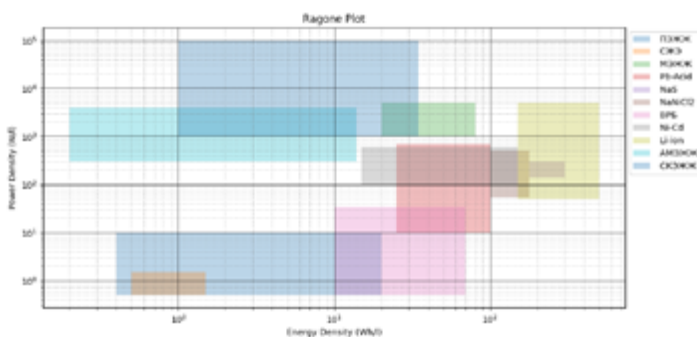
Нәтижелер және талқылау

СЖЭ және ПЭЖЖ айтарлықтай сыйымдылығымен және разрядтау ұзақтығымен ерекшеленеді, және электр желісінің масштабында энергияны басқаруға ықтималды технологиялар. СЖЭ әдетте қуаттың тығыздығын 0,5-тен 1,5 Вт/л - ге дейін және энергия тығыздығын 0,5-тен 2 Втсағ/л-ге

дейін көрсетеді, бұл ретте тиімділігі 65-87 %, ал разрядтың ұзақтығы 1-24+ сағатты құрайды. Бұл бүкіл әлем бойынша жалпы орнатылған қуаты 178 ГВт-тан асатын жетілген технология, бұл әлемдегі жалпы энергия жинақтау жүйелерінің 90 % - дан астамын құрайды [3, 61-6].

ПЭЖЖ ұқсас диапазонды ұсынады: қуат тығыздығы 0,5-2 Вт/л, энергия тығыздығы 20 Втсағ/л дейін, тиімділігі 50-89 %, разрядтың ұзақтығы 1-24+ сағат. Дегенмен, ПЭЖЖ географиялық шектеулер және кейбір қондырғыларда жанармайға тәуелділік сияқты шектеулерге тап болады, бұл өмір барысында CO₂ шығарындыларына әкеледі. Дегенмен, екі технология да айтарлықтай инвестицияларды қажет етеді 1716-2207 \$/кВт СЖЭ үшін және 1087-1784 ПЭЖЖ үшін. Ұзақ қызмет ету мерзімі, әдетте ГАЭС үшін 40-60 жыл және ПЭЖЖ үшін 20-40 жыл, жоғары цикл ресурсымен бірге оларды географиялық және қаржылық шектеулерге қарамастан энергияны жаппай сақтаудың сенімді шешімдеріне айналдырады.

Одан бөлек, МЭЖЖ төмен техникалық қызмет көрсетумен, ұзақ өмірлік циклмен және жоғары тиімділікпен ерекшеленеді: қуат тығыздығы 1000-5000 Вт/л-ге дейін, ал энергия тығыздығы 800-2000 Втсағ/л-ге дейін. Сонымен қатар жылдам жауап беру уақытын және разрядтың ұзақтығын 15 секундтан 15 минутқа дейін ұсынады, бұл оларды желінің тұрақтылығы мен жиілігін реттеуге қолайлы етеді.



2 – сурет Рагон диаграммасы, кесте 1 мәліметтері бойынша салынған

Қорғасын қышқылды (ҚҚА, Pb-Acid) аккумуляторлары орташа энергия тығыздығымен (50-90 Вт/кг) және тиімділігімен (65-90 %), сондай-ақ жылдам жауап беру уақытымен (<10 миллисекунд) ерекшеленеді. Бұл сипаттамалар оларды қысқа мерзімді резервтеуге және желіні тұрақтандыруға қолайлы. ҚҚА орташа тиімділікке, төмен шығындарға, үйлесімді өндіріске, жылдам

жауап беру уақытына және өздігінен разрядтың төмен жылдамдығына, үзіліссіз зарядпен жұмыс істеу қабілетіне және жақсы кәдеге жарату мүмкіндігіне ие. Олардың салыстырмалы түрде қысқа қызмет ету мерзімі (5-15 жыл) және жоғары техникалық қызмет көрсету талаптары ЖЭК интеграциясы үшін негізгі шектеу болып табылады.



3 – сурет ЭЖЖ технологияларының пайдалы әсер коэффициенттерінің салыстырмасы, кесте 1 мәліметтері бойынша салынған

Натрий-күкірт (NaS) және натрий-никель-хлорид (NaNiCl₂) батареялар жоғары энергия тығыздығын (150-300 Вт/кг) және тиімділікті (75-90%) қамтамасыз етеді. Екі түрдің де разряд ұзақтығы 24 сағатқа дейін жетеді, бұл оларды жүктемені теңестіруге және жаңартылатын энергиямен тұрақты қамтамасыз етуге жарамды етеді. Дегенмен, олар жоғары жұмыс температурасын (300-350°C) қажет етеді, бұл термореттелу, қауіпсіздік және жүйенің күрделілігіне қатысты мәселелерге ие. NaS батареялары жоғары жұмыс температурасын қажет етеді, бұл сенімді қауіпсіздік жүйелерін қажет етеді. Сонымен қатар, олар күкірттің төмен электрaktivтілігі, Na дендриттерінің түзілуіне байланысты сыйымдылықтың тез деградациясы және полисульфидтің шаттл әсері сияқты мәселелерге тап [4, 241-6.].

Негізгі техникалық көрсеткіштер 1 - ші кестеде [5, 14-6.] the energy grid is changing to fit the increasing energy demands but also to support the rapid penetration of renewable energy sources. As a result, energy storage devices emerge to add buffer capacity and to reinforce residential and commercial usage, as an attempt to improve the overall utilization of the available green energy. Although various research has been conducted in the field including photovoltaic and wind

applications, the study on suitability identification of different storage devices for various stationary application types is still the gap observed which needs further study and verification. The review performed fills these gaps by investigating the current status and applicability of energy storage devices, and the most suitable type of storage technologies for grid support applications are identified. Moreover, various technical, economic and environmental impact evaluation criteria's are taken into consideration for the identification of their characteristics and potentials. The comprehensive review shows that, from the electrochemical storage category, the lithium-ion battery fits both low and medium-size applications with high power and energy density requirements. From the electrical storage categories, capacitors, supercapacitors, and superconductive magnetic energy storage devices are identified as appropriate for high power applications. Besides, thermal energy storage is identified as suitable in seasonal and bulk energy application areas. With proper identification of the application's requirement and based on the techno-economic, and environmental impact investigations of energy storage devices, the use of a hybrid solutions with a combination of various storage devices is found to be a viable solution in the sector.»»container-title»:»Renewable and Sustainable Energy Reviews»,»DOI»:»10.1016/j.rser.2022.112213»,»ISSN»:»13640321»,»journalAbbreviation»:»Renewable and Sustainable Energy Reviews»,»language»:»en»,»page»:»112213»,»source»:»DOI.org (Crossref көрсетілген.

1 – Кесте Негізгі техникалық көрсеткіштер.

Технология	Көлемдік		Гравиметрикалық		ПӘК, %	Жауап беру уакты	Разрядталу ұзақтығы
	Қуаттығыздығы, Вт/л	Энергиятығыздығы, Втсағ/л	Қуаттығыздығы, Вт/кг	Энергиятығыздығы, Втсағ/кг			
СЖЭ	0.5-1.5	0.05-2	0.5-3	30-60	65-87	с-мин	1-24ч+
ПЭЖЖ	0.5-10	0.4-20	30-60	-	41-90	1-15 мин	1-24ч+
МЭЖЖ	1к-5к	20-80	400-5000	5-230	90-95	<10 мс	15с-15мин
Pb-Acid	10-700	25-100	75-400	15-50	65-90	<10 мс	<4ч
NaS	150-300	150-300	150-230	100-240	70-90	мс	1-24 ч
NaNiCl2	54-500	100-180	150-200	100-447	60-98	<1с	с - часы
ВРБ	0.5-34	10-70	80-160	10-35	60-85	с – 10 мин	<10ч

Ni-Cd	80-600	15-150	100-300	50-300	60-90	20 мс	с-часы
Li-ion	50-5к	150-500	150-2000	75-230	80-98	20мс	мин-часы
ТЭЖЖ	-	80-500	10-50	80-250	30-100	-	1-24+
АМЭЖЖ	300-4к	0,2-13,8	500-2000	1-75	90-98	мс	мс-мин
СКЭЖЖ	1к-10 ⁵	1-35	10-10 ⁶	0.05-22	85-99	мс	мин-часы
H ₂ ЭЖЖ	>500	500-3000	5-800	600-10к	20-66	с-мин	1-24ч+

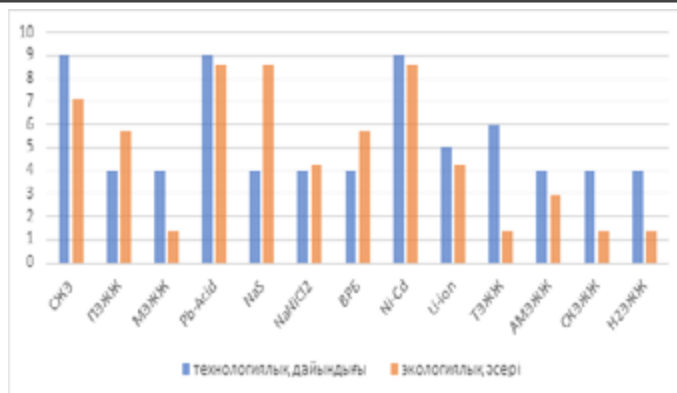
Ванадий редокс – аккумуляторлар ұзақ разрядты (10 сағатқа дейін) және жоғары циклдік жүктемелерге төзімділікті қажет ететін қосымшалар үшін өте қолайлы. 70-85 % тиімділігімен және жылдам жауап беру уақытымен (миллисекундтар) ВРБ жаңартылатын энергияны ауқымды сақтау үшін өте қолайлы, дегенмен олардың энергия тығыздығы басқа технологиялармен салыстырғанда төмен [7, 241-б.].

2 – Кесте қаржылық салымдар көрсеткіші және технологиялық дайындығы.

Технология	Қаржылық салымдар		Жылдық, \$/кВт	Өмір ұзақтығы	Цикл саны	Технологиялық дайындығы
	\$/кВт	\$/кВтчас				
СЖЭ	1133-2207	105-511	15-28	40-60	20к-50к	Жетілген техно логия/ комерциали- зацияланған
ПЭЖЖ	774-1784	16-278	10-19	20-60	500-13к	Даму/ комерциали- зациялану сатысында
МЭЖЖ	100-1446	500-25к	5-20	15-20	20к-100к	Даму/ ерте коммерциали- зациялану сатысында
Pb-Acid	1214-4100	365-790	4-50	5-15	1370	Жетілген технология/ комерциали- зацияланған
NaS	380-4к	300-500	7-80	5-20	2500-4000	Даму/ комерциали зациялану сатысында

NaNiCl ₂	150-300	100-345	-	10-14	4500	Даму/ комерциали- зациялану сатысында
ВРБ	600-9000	150-1000	7-70	10-20	>12к	Даму/ ерте коммерциали зациялану сатысында
Ni-Cd	500-1500	400-2400	20	10-20	2000-3500	Даму/комерциали- зациялану сатысында
Li-ion	1000-10к	300-2500	6-23	5-15	2800-6000	Даму/комерциали- зацияланған
ТЭЖЖ	200-2800	4-590	7-43	5-40	-	Даму/ ерте коммерциали- зациялану сатысында
АМЭЖЖ	200-489	1 0 8 5 - 10854	18.5	20-30	20к-100к	Тәжірибиелік демонстрация
СКЭЖЖ	100-480	300-2000	6	20-30	100к-500к	Даму/ ерте коммерциали- зациялану сатысында
H ₂ ЭЖЖ	400-2000	1-295	16-24	5-30	1к-10к	Даму/ ерте коммерциали- зациялану сатысында

Никель-кадмий (Ni-Cd) батареялары жұмыс тұрақтылығымен, техникалық қызмет көрсетудің қарапайымдылығымен, шамадан тыс зарядтауға және шамадан тыс зарядтауға төзімділігімен, жақсы төмен температуралық өнімділігімен және беріктігімен ерекшеленеді. Бұл сипаттамалар оларды жаңартылатын энергия өндірісінің өзгергіштігі мен үзілістерін қолдауға қолайлы етеді. Алайда улы кадмийдің болуы қоршаған ортаның жай-күйіне алаңдаушылық туғызады, ластанудың алдын алу үшін дұрыс кәдеге жаратуды және қайта өңдеуді қажет етеді [8, 511-б.].



4 – сурет технологиялық дайындық және экологиялық әсері көрсеткіштері

Кесте 3 – ЭЖЖ технологияларының қызмет түріне қолайлығы.

Технология	Арбитраж	ЖЭК қолдау қосымша қызметтері	ЖЭҚ шығындарын азайту	Желінің қуатын көтеру	Жиліктік тиімді тұрақтандыру	Маусымдық Арбитраж
СЖЭ	+	±	+	+	+	+
ПЭЖЖ	+	±	+	+	+	+
МЭЖЖ	–	+	–	–	+	–
Pb-Acid	Ү	Ү	–	–	Ү	–
NaS	+	+	+	±	+	–
NaNiCl2	+	+	+	±	+	–
ВРБ	±	+	+	±	±	±
Ni-Cd	Ү	Ү	Ү	–	Ү	–
Li-ion	+	+	+	+	+	–
ТЭЖЖ	–	–	+	+	–	+
АМЭЖЖ	–	+	–	–	+	–
СКЭЖЖ	–	+	–	–	+	–
H ₂ ЭЖЖ	+	±	+	+	±	+

+ - қызметін көрсетуге қолайлығы жоғары

± - қызметін көрсетуге қолайлығы орташа

– - қызметін көрсетуге қолайлы емес

Литий-ионды батареялар жоғары энергия және қуат тығыздығымен сонымен қатар жақсы тиімділік көрсеткішімен ерекшеленеді. Жылдам жауап беру уақыты (миллисекундтар) және шығындардың төмендеуі оларды ең жоғары жүктемені төмендетуден бастап жүктемені теңестіруге және жиілікті реттеуге дейін ЖЭК интеграциясының кең ауқымына жарамды етеді. Алайда, оларға алғашқы инвестициялар айтарлықтай және қоршаған ортаға және қауіпсіздікке қауіп төндіреді, соның ішінде улы материалдарды кәдеге жарату, термиялық іске қосу қаупі және жанғыш электролит проблемалары [9, 25–6.].

Энергияны жылу ретінде жинайтын жылу энергиясын сақтау жүйелері 24 сағатқа дейін разрядтау ұзақтығымен ұзақ мерзімді энергияны сақтау үшін тиімді. Тиімділіктің төмендеуіне қарамастан, Тер күн жылу электр станцияларымен біріктірілуі мүмкін, тіпті күн болмаған кезде де тұрақты энергиямен қамтамасыз етіледі.

Асқыноткізгіштік магниттік энергия жинақату жүйелері және суперконденсаторлық энергия жинақтау жүйелері – бұл сөзсіз артықшылықтарға ие энергияны сақтаудың озық технологиялары. АМЭЖЖ жүйелері жоғары тиімділікпен және жылдам жауап беру уақытымен ерекшеленеді, бұл оларды жиілікті басқару сияқты қосымшалар үшін өте қолайлы етеді. Дегенмен, олар күрделі салқындату жүйелерін қажет етеді және капитал құны жоғары.

Қорытынды

Энергияны жинақтау жүйелерін бағалау кезінде энергетикалық желіге интеграциялау үшін әртүрлі технологиялардың әртүрлі мүмкіндіктері мен күшті жақтарын көрсететін бірнеше негізгі қорытындылар жасауға болады. Су жинақтау электростанциялары және пневматикалық энергия жинақтау жүйелері жоғары сыйымдылықты және ұзақ мерзімді энергияны сақтау шешімдерін қамтамасыз етеді, әсіресе маусымдық арбитражға және дәстүрлі генерацияны қолдауға жарамды. Олардың тиімділігі нақты географиялық және инфрақұрылымдық жағдайларға байланысты, бұл олардың кең таралуын шектейді.

Литий-ионды батареялар әмбебаптығымен және жылдам жауап беру уақытымен ерекшеленеді, бұл оларды арбитраждан көмекші қызметтерге дейін және қуатты нығайтуға дейін әртүрлі салаларда қолдануға өте ыңғайлы етеді. Дегенмен, ресурстардың қол жетімділігі мен кәдеге жаратылуына

қатысты мәселелер олардың ауқымдылығына және маусымдық арбитраж сияқты кейбір контексттердегі ұзақ мерзімді тұрақтылығына әсер етеді.

Маховикті энергияны жинақтау жүйелері және асқыноткізгіштік магниттік энергия сақтау құрылғылары сияқты мамандандырылған жоғары өнімді технологиялар көмекші қызметтерді ұсыну және электр желісінің тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін өте маңызды. МЭЖЖ жиілікті реттеуде және қысқа мерзімді теңгерімде тамаша жұмыс істейді, ал АМЭЖЖ сыйымдылығы мен сақтау ұзақтығының шектеулеріне қарамастан жоғары тиімділік пен жылдам разряд уақытын қамтамасыз етеді.

Натрий-күкірт, натрий-никель-хлорид және ванадий редокс-батареялар әртүрлі қолданбаларда, әсіресе жаңартылатын энергия көздерін қолдауда және қуатты нығайтуда орташа және жоғары өнімділікті көрсетеді. Бұл технологиялар өнімділік пен қолдану арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді, бірақ масштабталуы мен реакция жылдамдығы бойынша литий-ионды батареялармен салыстыруға болмайды.

Қорғасын қышқылды және никель-кадмий батареялары ескірген жүйелер немесе тауашалық қосымшалар үшін қолайлы орташа шешімдер болып табылады, мұнда шығындар бірінші кезектегі міндет болып табылады. Дегенмен, олардың сенімділігі және беріктігі жаңа технологиялардан асып түседі.

Суперконденсаторлар электр қуатының сапасын жақсарту және қолдау қызметтерін ұсыну арқылы қысқа мерзімді қосымшалар үшін жоғары өнімділік мүмкіндіктерін ұсынады. Төмен энергия сыйымдылығын компенсациялау үшін басқа ЭЖЖ құрамында гибриді турде жұмыс істеу көрінеді.

Термиялық энергияны жинақтау жүйелері және Сутегі энергияны жинақтау жүйелері жаңартылатын энергия көздерін біріктіруге арналған инновациялық шешімдер болып табылады. ТЭЖЖ, әсіресе концентраторлық күн энергиясы жүйелерімен үйлескенде, ұзақ мерзімді энергияны сақтау үшін айтарлықтай әлеует ұсынады.

Қорытындылай келе, электр желісіне қосылу үшін ең қолайлы ЭЖЖ таңдау қолданбаның нақты қажеттіліктерін, соның ішінде сақтау ұзақтығын, жауап беру уақытын, масштабталуын және географиялық шектеулерді мұқият қарастыруды қамтитынын атап өткен жөн. Мұнда қарастырылған технологиялардың әрқайсысы қажетті нәтижелер мен операциялық талаптарға негізделген жеке шешімдерді қажет ететін бірегей артықшылықтар мен шектеулерге ие. Зерттеулер мен әзірлемелерді жалғастыру қолданыстағы шектеулерді еңсеру және осы технологияларды қазіргі энергетикалық жүйелерге біріктіру үшін өте маңызды. Өздерінің күшті жақтарын пайдалану

және инновациялар арқылы мәселелерді шешу арқылы ЭЖЖ тұрақты және өміршең энергетикалық болашаққа қол жеткізуде шешуші рөл атқара алады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 European White Book on Grid-Connected Storage. European Distributed Energy Resources Laboratories [отчет]. 2011. – 177 б.

2 Energy Storage Applications Summary. European Association for Storage of Energy (EASE) [отчет]. 2020.

3 **Symeonidou, M., Giama, E., Papadopoulos, A.** Life Cycle Assessment for Supporting Dimensioning Battery Storage Systems in Micro-Grids for Residential Applications // *Energies*. 2021. – № 19. – Т. 14 – С. 61–89.

4 **Liao, Q., Sun B., Liu Y., и др.** A techno-economic analysis on NaS battery energy storage system supporting peak shaving: Techno-economic analysis; NaS battery; peak shaving // *Int. J. Energy Res*, 2016. – № 2. – Т. 40 – С. 241–247.

5 **Kebede, A.A., Kalogiannis, T., Van Mierlo, J., и др.** A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022. – Т. 159 – С. 112–213.

6 **Furquan Nadeem, Nadeem, F., S. M. Suhail Hussain, и др.** Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems // *IEEE Access*, 2019. - Т. 7 – С. 4555–4585.

7 **Anke, M., Wang M.** Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review // *Applied Energy*, 2016. - Т. 179 - С. 350–377.

8 **Luo X., Wang J., Dooner, M., и др.** Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation // *Applied Energy*, 2015. – Т. 137 – С. 511–536.

9 **Viswanathan, V., Mongird K., Franks, R., и др.** 2022 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. U.S. Department of energy, 2022. – 151 с.

10 **Zakeri, B., Syri S.** Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. – Т. 42 – С. 569–596.

23.09.24 ж. баспаға түсті.

04.12.24 ж. түзетулерімен түсті.

26.02.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. С. Расмухаметова¹, М. А. Ергали², К. С. Олжабаева³, Б. Ж. Мустагулова⁴

^{1,2,3,4}«Алматинский университет энергетики и связи имени

Гумарбека Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы

Поступило в редакцию 23.09.24

Поступило с исправлениями 04.12.24

Принято в печать 26.02.25

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

В данной статье представлен всесторонний обзор и сравнительный анализ технологий хранения энергии для крупномасштабной интеграции в сети возобновляемых источников энергии. В работе оцениваются различные системы накопления энергии (СНЭ) по техническим, финансовым и экологическим критериям с целью выявления подходящих вариантов для различных сценариев интеграции в энергосистемы. Методологически, технологии накопления энергии классифицируются по способам применения и оцениваются по техническим характеристикам, финансовой жизнеспособности и воздействию на окружающую среду. Механические системы хранения энергии, такие как гидроаккумулирующие станции (ГАЭС), являются зрелыми решениями, обеспечивающими надежность и эффективность, особенно для хранения большего объема энергии. Электрохимические варианты, включая литий-ионные (Li-ion) батареи и ванадиево-редокс батареи (ВРБ), демонстрируют масштабируемость и плотность энергии, но сталкиваются с проблемами, связанными со стоимостью и экологической устойчивостью. Кроме того, новые технологии, такие как суперконденсаторы и сверхпроводящие индукционные накопители энергии (СПИН), обещают повысить стабильность и устойчивость энергосистемы благодаря быстрому высвобождению большой мощности. Применяя целостный подход, заинтересованные стороны смогут справиться со сложностями интеграции накопителей энергии, способствуя созданию устойчивого и надежного энергетического будущего.

Ключевые слова: системы накопления энергии, сетевая интеграция, возобновляемые источники энергии, сравнительный анализ, услуги СНЭ

*A. S. Rasmukhametova¹, M. A. Yergali², K. S. Olzhabayeva³, B. Zh. Mustagulova⁴

^{1 2 3 4}Almaty University of Power Engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeev named after G. Daukeev,

Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 23.09.24

Received in revised form 04.12.24

Accepted for publication 26.02.25

COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS INTEGRATION

This paper presents a comprehensive review and comparative analysis of energy storage technologies for large-scale integration into renewable energy grids. The paper evaluates different energy storage systems (ESS) according to technical, financial and environmental criteria in order to identify suitable options for different grid integration scenarios. Methodologically, energy storage technologies are categorised by application mode and evaluated for technical performance, financial viability and environmental impact. Mechanical energy storage systems, such as pumped hydro storage (PHS), are mature solutions that provide reliability and efficiency, especially for storing larger amounts of energy. Electrochemical options, including lithium-ion (Li-ion) batteries, Na-based and vanadium-redox batteries (VRBs), demonstrate scalability and energy density, but face challenges related to cost and environmental sustainability. Furthermore, emerging technologies such as supercapacitors and superconducting magnetic energy storage (SMES) have the potential to enhance grid stability and resilience by rapidly releasing large amounts of power. By adopting a holistic approach, stakeholders can address the complexities of energy storage integration, thereby contributing to the development of a sustainable and reliable energy future.

Keywords: energy storage systems, grid integration, renewable energy, comparative analysis, ESS services.

Теруге 10.03.2025 ж. жіберілді. Басуға 28.03.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс №4358

Сдано в набор 10.03.2025 г. Подписано в печать 28.03.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4358

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz