УДК 621.311 **doi: 10.20998/2313-8890.2023.09.05**

Яковенко Іван Сергійович, аспірант кафедра передача електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Тел. (+38)0688855789; E-mail: i.c.jakovenko@gmail.com ; ID ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9934-2841
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ РОБОТИ В ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Анотація. *Обґрунтовано доцільність розробки для сучасних промислових електричних мереж системи накопичення енергії, що передбачає застосування електрохімічних накопичувачів. Переваги такої системи накопичення полягають в можливості їх виготовлення виробниками, розташованими на території України, що також забезпечать конкуренцію світовим виробникам продукції з накопичувачів, забезпечить важелі для розвитку вітчизняної економіки, а також дозволить зменшити вартість впровадження таких систем накопичення енергії в електричні мережі. Представлені результати розробки електрохімічного накопичувача енергії для живлення споживачів промислових електричних мереж, які застосовуються для підприємств і виконуються із застосуванням центральних понижуючих підстанцій та декількох цехових трансформаторних підстанцій. Виконаний аналіз вимог щодо живлення споживачів промислового підприємства дозволив сформулювати основні технічні характеристики накопичувача електричної енергії для забезпечення надійної роботи підприємства в разі порушення централізованого електропостачання. Обґрунтовано тип та основні складові накопичувача, проведений розрахунок основних параметрів накопичувача енергії, а також визначені його габарити. Виконаний аналіз показників функціонування досліджуваної електричної мережі промислового підприємства в характерних сталих режимах роботи при використанні розробленого електрохімічного накопичувача електричної енергії. Доведено, що застосування розробленого накопичувача електричної енергії дозволить підвищити надійність живлення споживачів, забезпечуючи постачання електричної енергії для технологічного процесу підприємства протягом робочої зміни, що є дуже важливим заходом при можливості порушення електропостачання в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій. Перспективним є також використання запропонованого накопичувача електричної енергії у поєднанні з джерелами розподіленої генерації, які досить поширюються для досліджуваних промислових електричних мереж.*

Ключові слова: *система накопичення енергії, відновлювальні джерела енергії, розосереджена генерація, електрична мережа, параметр режиму, технічні характеристики, ємність.*

Yakovenko Ivan Sergiyovych, PhD student at the Department of electrical energy transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Tel. (+38)0688855789; E-mail: i.c.jakovenko@gmail.com; ID ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9934-2841
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2 Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

DEVELOPMENT OF AN ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE SYSTEM FOR OPERATION IN INDUSTRIAL ELECTRICAL NETWORKS

Abstract. *The article substantiates the expediency of developing an energy storage system for modern industrial electrical networks, which involves the use of electrochemical storage systems. The advantages of such a storage system are the possibility of their production by manufacturers located in Ukraine, which will also provide competition to global manufacturers of storage products, provide levers for the development of the domestic economy, and reduce the cost of introducing such energy storage systems into electrical networks. The article presents the results of the development of an electrochemical energy storage device for power supply to consumers of industrial electrical networks, which are used for enterprises and are carried out using central step-down substations and several workshop transformer substations. The analysis of the requirements for power supply to consumers of an industrial enterprise allowed to formulate the main technical characteristics of the energy storage system to ensure reliable operation of the enterprise in case of disruption of the centralised power supply. The type and main components of the storage system are substantiated, the main parameters of the energy storage system are calculated, and its dimensions are determined. An analysis of the functioning of the studied electrical network of an industrial enterprise in typical steady-state operation modes using the developed electrochemical energy storage system is carried out. It is proved that the application of the developed electric energy storage system will increase the reliability of power supply to consumers, ensuring the supply of electric energy for the technological process of the enterprise during the work shift, which is a very important measure in the conditions of power supply disruption under martial law and emergency situations. It is also promising to use the proposed electric energy storage system in combination with distributed generation sources, which are quite common for the industrial electrical networks under investigation.*
Keywords: *energy storage system, renewable energy sources, distributed generation, electric network, mode parameter, technical characteristics, capacity.*

Актуальність теми дослідження. Використання систем накопичення енергії (СНЕ) на сьогоднішній день є досить актуальним питанням для енергосистем багатьох країн світу, в тому числі й для України. Причиною цього є збільшення потужності відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), для яких є характерною тенденцією постійне зниження вартості технологій та широке застосування як для малопотужних побутових споживачів, так і для великих промислових. Суттєвим важелем для багатьох країн світу щодо активного розвитку ВДЕ є державно закріплені орієнтири щодо економії викопних паливних ресурсів, зменшення викидів діоксиду вуглецю, а також можливості завдяки розвитку власних генеруючих потужностей підвищити енергетичну незалежність держави. Так, стратегія розвитку світової енергетики визначає, що до 2040 року 50 % електроенергії буде вироблятись

за рахунок використання ВДЕ та альтернативних видів палива (АВП), а наприкінці XXI століття частка електроенергії, виробленої з ВДЕ та АВП може перевищити 85 % [1]. У 2020 році 27 держав ЄС в досягли показника 40 % генерації електроенергії за рахунок використання ВДЕ та АВП, а до 2050 року планується довести частку ВДЕ та АВП в загальному паливно-енергетичному балансі Євросоюзу до 50 %. Енергетичною стратегією України передбачено до 2035 р. зростання частки ВДЕ в енергетичному балансі країни до рівня 25 % [2].

Оскільки ВДЕ мають мінливий графік генерації деякі СНЕ мають можливість вирівняти графік навантаження за рахунок накопиченої енергії в них. На сьогоднішній день відомо велика кількість систем накопичення енергії які використовують різни речовини або матеріали для зберігання енергії для подальшої її генерації. Однак більшість з СНЕ не виробляються на території України що сильно збільшує вартість їх впровадження в нашій електричній мережі. Тому розробка власних СНЕ є актуальної задачею для підвищення ефективності роботи електричної мережі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В світі існує багато СНЕ, які працюють в різних режимах і передбачають підключення як безпосередньо біля ВДЕ або споживачів в розподільних електричних мережах, так і в будь-якому вузлі живильної мережі, враховуючи вимоги до географічних чи кліматичних умов роботи системи накопичення. Це сприяло тому, що багато уваги дослідників приділено аналізу та визначенню найкращих умов роботи СНЕ [3-5]. Так, авторами роботи [3] був проведений аналіз основних видів СНЕ, визначені їх позитивні та негативні сторони та проведено дослідження впливу кожного з видів СНЕ на показники електричної енергії. Обґрунтовано, що електрохімічні накопичувачі мають велику питому потужність та швидкість спрацювання, завдяки чому вони можуть використовуватися для покращення якості енергії, в процесах регулювання напруги, а також використовуватись в якості резервів

потужності. Однак ці СНЕ мають також і великий недолік, що полягає в обмеженому ресурсі повних циклів заряду та розряду, після закінчення якого такі накопичувачі потрібно утилізувати.

Найвідомішими системами накопичення є гідроакумулюючі електростанції, які мають значні встановлені потужності і застосовуються для балансування в енергосистемах. Інші СНЕ мають менші потужності, однак деякі з них мають можливість масштабуватися. У зв'язку з цим перед науковцями постало питання порівняння СНЕ між собою та обґрунтування їх використання для вирішення задач забезпечення режимів енергосистем та окремих електричних мереж. До найбільш суттєвих досліджень в цьому напрямку можна віднести роботи [6-10]. В роботі [7] представлено порівняння основних характеристик СНЕ, які використовуються в електроенергетиці, та визначені сфери застосування розглянутих видів СНЕ для вирішення режимних задач в усталених і перехідних режимах енергосистеми України. В [9] проаналізовані можливості застосування СНЕ при балансуванні режимів в умовах функціонування лібералізованого ринку електричної енергії.

Значна кількість робіт присвячена дослідженню впливу СНЕ на якість електроенергії в розподільчих та передавальних мережах [3, 11-13]. Авторами [11] виконано детальну оцінку впливу інтеграції розподілених СНЕ на покращення якості електроенергії в електричних мережах певної топології. Авторами [13] досліджувались питання оцінювання якості електропостачання в локальних системах з джерелами розосередженої генерації, а також забезпечення показників якості електричної енергії в таких системах.

Особливої уваги заслуговують роботи, присвячені питанням щодо особливостей використання СНЕ у енергетичних системах з ВДЕ для вирішення задач забезпечення режиму та покращення техніко-економічних показників [14-16]. Так, авторами [14] досліджено, що СНЕ позитивно впливає на зменшення впливу нестабільності генерації та у випадку зникнення живлення з сторони зовнішньої мережі дозволить певний час забезпечувати

електроенергією деяких критичних до перерви в електропостачанні споживачів. Авторами у [16] детально досліджено проблематику інтегрування СНЕ до електричних мереж з вітровими електростанціями і особливостей забезпечення стійкої генерації в цих мережах.

Суттєвий практичний інтерес становлять роботи, в яких розглядаються питання підвищення ефективності роботи енергосистем з різними видами СНЕ [17-19]. В роботі [18] запропоновані технічні та організаційні заходи для підвищення ефективності функціонування енергосистем з різними видами СНЕ в умовах лібералізованого енергоринку, які дозволяють обґрунтовано підходити для вирішення питань оптимізації режимів енергосистем. Автори [18] докладно розглядають вплив сучасних технологій та технічних засобів на показники надійності та ефективності функціонування систем енергопостачання різного призначення.

Отже, детальне дослідження питань застосування СНЕ в електричних мережах та системах показує, що для електричних мереж з великою частотою зміни генеруючої потужності, що виникає через наявність сонячних та вітрових електричних станцій, більшість авторів пропонують використовувати кінетичні накопичувачі електричної енергії. Дані накопичувачі мають високу швидкість перемикання між режимами генерації та споживання електричної енергії, що дозволяє вирівняти графік генерації таких електричних станції. В деяких випадках споживачу або енергосистемі потрібно тривалий час зберігати електричну енергію, для чого доцільно використовувати електрохімічні накопичувачі енергії.

Слід сказати, що після повномасштабного вторгнення російської федерації на територію України та нищення енергетичної інфраструктури значна частина промислових підприємств почала приділяти увагу забезпеченню живлення від локальних систем для забезпечення себе невеликою кількістю електроенергії для підтримки процесу виробництва. Здебільшого для цього впроваджуються ВДЕ, для підвищення ефективності

генерації яких в такому випадку бажано застосовувати СНЕ. В таких умовах важливим стає питання розробки для промислових електричних мереж СНЕ, які передбачають можливість застосування електрохімічних накопичувачів, а також перспективу їх виготовлення державними виробниками, що дозволить зменшити вартість впровадження таких СНЕ в електричні мережі, а також додатково створить конкуренцію світовим виробникам продукції з накопичувачів і сприятиме розвитку вітчизняної економіки.

Мета дослідження. Розробка СНЕ, основаної на використанні електрохімічних накопичувачів, що можуть вироблятися на території України для зменшення вартості впровадження їх в електричну мережу.

Розробка СНЕ електрохімічного типу. Ринок України на сьогодні має сильну орієнтацію на вибір обладнання європейських виробників. Одними з провідних виробників електрохімічних систем накопичення є ZPUE (Польща) та Ingeteam (Іспанія). Ці компанії мають гарний асортимент продукції та довгий період часу працюють на ринку СНЕ по всьому світу.

Для розробки СНЕ для промислової мережі із значними коливаннями в графіку генерації при використанні ВДЕ в якості локальних джерел живлення було вирішено використовувати акумуляторні батареї LiFePO4, які згідно з [3] мають значне число циклів роботи, а також мають велику питому потужність на одиницю ваги. З цих міркувань для рішення поставленої задачі для СНЕ було обрано електрохімічний акумулятор типу LF105, який виготовлений компанією EVE Power Co. Ltd і є лідером у застосуванні серед споживачів. Його основні технічні параметри приведені в табл. 1 [20]. Виготовлення електрохімічного акумулятора з такими параметрами можливо забезпечити на підприємствах України.

Для зручності та безпеки експлуатації обраного для СНЕ акумулятора була розроблена збірка формату 15S2P (S – кількість послідовно підключених акумуляторів, P – кількість паралельних лінії акумуляторів в збірці). Після чого для даної збірки розроблений корпус, в якому передбачено розташування окрім

акумуляторів ще й системи кліматконтролю та роз'ємів для зв'язку між збірками. В табл. 2 приведені дані акумуляторної збірки в корпусі.

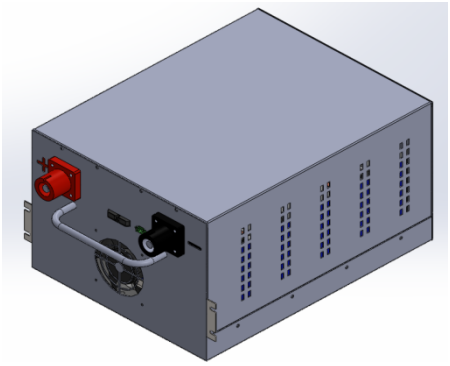
Таблиця 1.

Основні технічні характеристики акумулятора для СНЕ [20]

	Розміри, мм	130,3x36,7x195,5
	Номінальна ємність, А*ч	105
	Мінімальна напруга, В	2,5
	Номінальна напруга, В	3,2
	Максимальна напруга,В	3,6
	Внутрішній опір, мОм	<0,5
	Максимальний струм заряду, А	105(1С)
	Максимальний струм розряду, А	315(3С)
	Номінальний струм заряду, А	52,5(0,5С)
	Номінальний струм розряду, А	52,5(0,5С)
	Вага, кг	2,1

Таблиця 2.

Основні характеристики акумуляторної збірки для СНЕ

	Розміри, мм	435x292,62x634,44
	Номінальна ємність, А*ч	210
	Мінімальна напруга, В	37,5
	Номінальна напруга, В	48
	Максимальна напруга, В	54
	Загальна накопичена потужність, кВт * год	11,34
	Вага, кг	70

Для модульності та масштабованості СНЕ передбачається встановлення обраних для використання акумуляторів в шафу для експлуатації в закріпленому стані. Оскільки напруга збірки невелика, виникає необхідність підвищити напругу шляхом послідовного підключення декількох розроблених акумуляторних збірок. Для зменшення навантаження на контролер обробки даних акумуляторів кожна з розроблених акумуляторних шафа повинна мати відсік з комутаційним обладнанням та

контролером. Основні параметри такого силового відсіку приведені в табл. 3.

Таблиця 3.

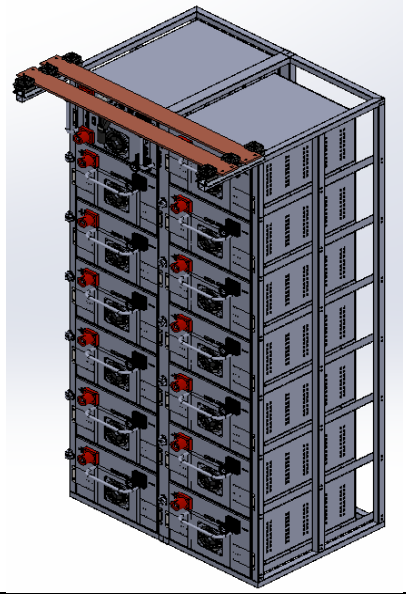
Основні характеристики силового відсіку з комутаційним обладнанням та контролером

	Розміри, мм	427x292,62x654,44
	Номінальна ємність, А*ч	250
	Номінальна напруга, В	1000
	Вага, кг	20

В табл. 4 представлені основні параметри акумуляторної шафи, в якій розміщено 13 підключених послідовно акумуляторних збірок та силовий відсік з комутаційною апаратурою та контролером. Для можливості паралельного підключення інших акумуляторних шаф було передбачено можливість їх розташування одна над одною та встановлення мідних шин, які закриваються захисним кожухом для запобігання прямого дотику до шин.

Таблиця 4.

Основні характеристики акумуляторної шафи

	Розміри, мм	920x2200x880
	Номінальна ємність, А*ч	210
	Максимальна ємність, кВт * год	147,42
	Максимальна напруга,	702
	Вага, кг	1000

Передбачається з'єднання між акумуляторними збірками, яке виконується кабелем зі спеціальними роз'ємами виробництва Phoenix Contact. З'єднання з шинами виконується таким самим шляхом, однак із сторони шини кріплення здійснюється за допомогою наконечників або спеціальними роз'ємами виробництва Schneider Electric або Rittal, що дозволить краще забезпечити контакт з шиною та зменшити контактний опір між шиною та приєднанням.

Для покращення захисту акумуляторної шафи та акумуляторів, було проведено розробку електричної схемі управління та моніторингу кожної акумуляторної шафи окремо, щоб в подальшому об'єднати їх в загальну мережу.

Розробка схеми моніторингу та автоматизація. Обладнання для систем моніторингу стану акумуляторних батареї на сьогоднішній день виробляється великою кількістю фірм виробників. Для розробленого накопичувача було обрано виробника Emus (Литва) через позитивний досвід використання такої продукції. Дана система в порівнянні з іншими виробниками має модульну конструкцію та готові роз'єми з дротами для масштабування системи накопичення. На рис. 1 наведено приклад схематичного підключення накопичувача для отримання акумуляторної батареї різної ємності [21], яке рекомендується виробником і передбачає забезпечення рівня максимальної напруги батареї нижче 1 кВ.

Для підвищити надійності роботи обладнання та збільшення безпеки персоналу була запропонована покращена схема підключення обладнання силового відсіку, яка розроблена згідно з рекомендаціями [22] і приведена на рис. 2. До базової рекомендованої схеми додано системи контролю напруги для живлення систем обдуву акумуляторних збірок, а також додано вимикач навантаження, який являє собою додатковий механізм захисту від ураження електричним струмом при проведені заходів з обслуговування обладнання. Для забезпечення надійності в схемі передбачені додаткові сухі контакти, які

відповідають вимогам підвищення надійності спрацьовування при певних аваріях акумуляторної шафи для дублювання їх в схемі диспетчеризації.

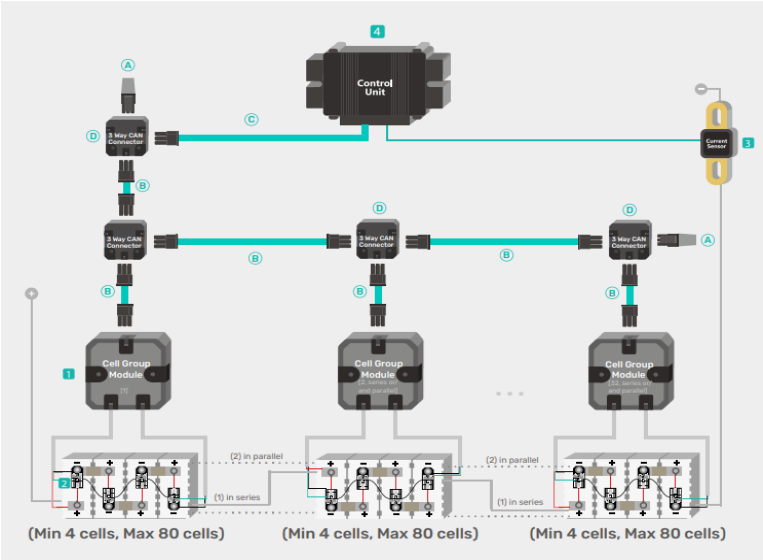


Рис. 1 - Схема підключення обладнання, що пропонує компанія виробника [21]

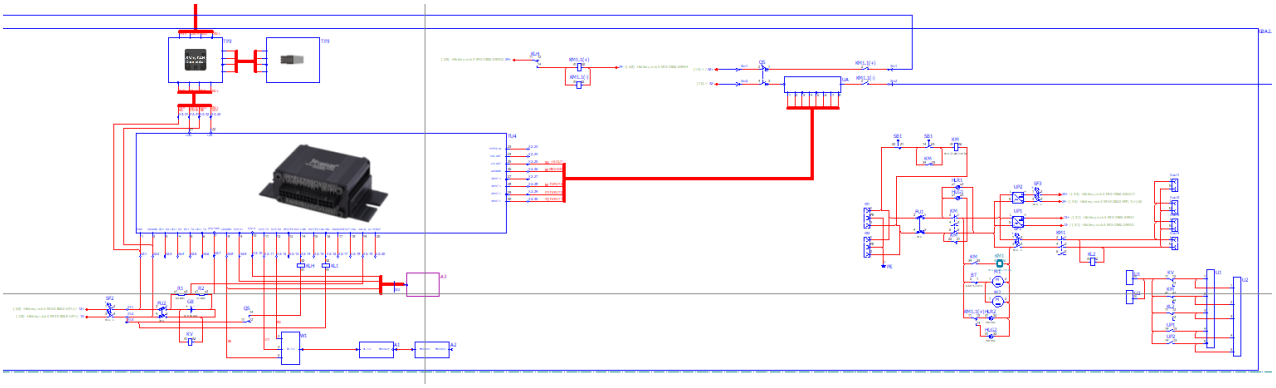


Рис. 2 - Схема силової комірки акумуляторної шафи

Електрична схема підключення акумуляторів та системи моніторингу їх стану виконана відповідно до прийнятої акумуляторної збірки для конфігурації 15S2P і приведена на рис. 3, на якому показано підключення до паралельних акумуляторів пристроїв T1-T15, які в свою чергу проводять моніторинг температури та напруги кожного акумулятора в збірці.

Отриманий сигнал з пристроїв T1-T15 обробляється, використовуючи пристрій TP1 [23]. Зв'язок між всіма модулями від акумуляторних збірок до силового відсіку відбувається за допомогою CAN [24], що дозволяє передавати та отримувати сигнал з мінімальними втратами.

Обробка отриманих даних з акумуляторної шафи відбувається за допомогою модуля G1 BMS Control Unit [25], що знаходиться в силовому відсіку акумуляторної шафи. До даного модулю надходить сигнал з кожної акумуляторної збірки та значення струму, який заряджає чи розряджає акумуляторну шафу. Величина струму заміряється за допомогою шунта, який підключається до модуля G1 BMS Control Unit.

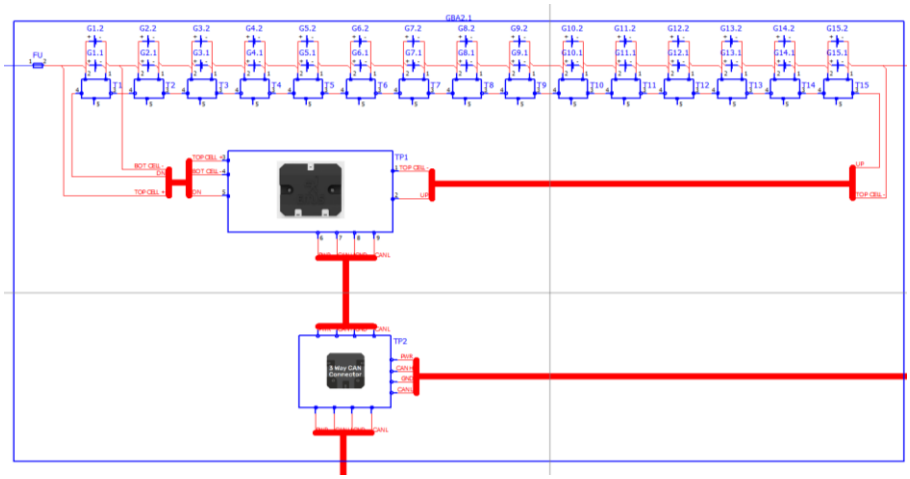


Рис. 3 - Електрична схема акумуляторної збірки

На рис. 2 показано, що до пристрою G1 BMS Control Unit підключено досить багато додаткового обладнання, що пов’язано з додатковими схемам для дистанційного керування та можливістю локального вимкнення обладнання для профілактичних робіт або аварійних ситуацій. Для від’єднання акумуляторної шафи від загальної системи в ручному режимі використовується вимикач навантаження QS, а для дистанційного управляння в схемі передбачено використання 2 силових контакторів KM1.1(+) і KM1.1(–). Оскільки номінальна напруга акумуляторної шафи може бути близько 1000 В постійного струму, з’являється додаткова необхідність в створенні додаткової точки розриву лінії.

Використання розроблених СНЕ для роботи в промислових мережах. Для дослідження впливу СНЕ на роботу електричної мережі промислового типу була розглянута можливість підключення розробленої СНЕ до промислового цеха потужністю 350 кВт. Цех знаходиться на території

підприємства, що живиться від підстанції 110/10 кВ, в подальшому живлення приходить до цехових підстанції 10/0,4 кВ. Одною з умов розробки СНЕ є те, що ця система повинна забезпечити живлення цеху протягом робочої зміни (8 годин) у випадку зникнення живлення з боку 110 кВ підстанції.

Для обґрунтування конфігурації запропонованої СНЕ з електрохімічними накопичувачами енергії була визначена загальну ємність, необхідну для забезпечення електроенергією споживачів протягом зазначеного часу, відповідно до виразу:

$$\boldsymbol{C = \frac{T \cdot P}{U \cdot k \cdot \eta}} \quad , \tag{1}$$

де С – електрична ємність акумуляторної батареї, яка необхідна для забезпечення автономної роботи протягом часу Т (год.) при дотриманні всіх параметрів напруги і струму вихідної системи, А*год; Р – активна потужність навантаження, Вт; η – ККД інвертора, в.о.; U – номінальна напруга акумуляторної збірки, В; k – коефіцієнт напруги, що характеризує величину напруги, яку накопичувач може використати без шкоди для акумуляторів.

Відповідно до проведеного розрахунку електрична ємність, яка необхідна для автономної роботи цеха протягом 8 годин, дорівнює 6232,2 А*год. Для забезпечення надійної роботи розробленої СНЕ була визначена кількість акумуляторних шаф, необхідних для забезпечення розрахованої ємності, за виразом:

$$\boldsymbol{N = \frac{C}{C_{\text{од}}}} \quad , \tag{2}$$

де С – електрична ємність СНЕ, яка потрібна для автономної роботи протягом зазначеного часу, А*год; $C_{\text{од}}$ – електрична ємність однієї акумуляторної шафи, А*год; N – кількість акумуляторних шаф, шт.

Для зручного розміщення та транспортування розробленої СНЕ було прийнято рішення використовувати в якості основи корпусу 12 метровий контейнер, до якого вміщується 18 розроблених акумуляторних шаф (рис. 4).

Відповідно до розрахунків для автономного живлення цеха протягом 8 годин необхідно підключити 2 таких контейнера.

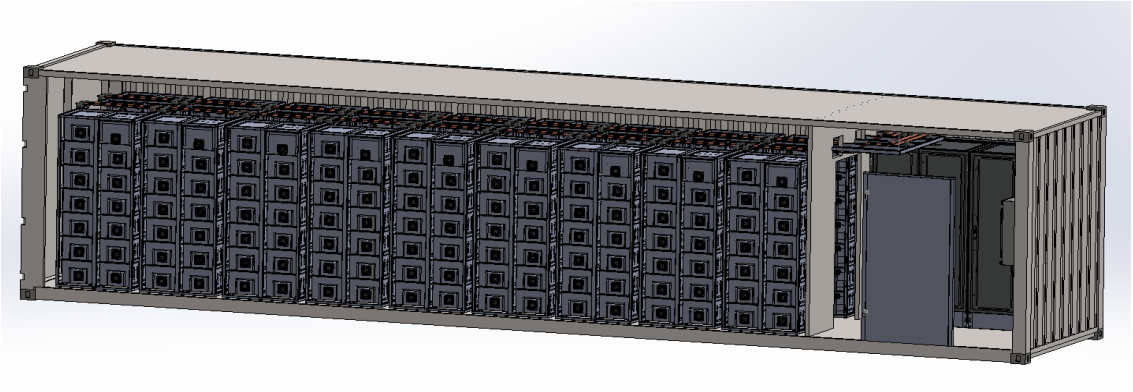


Рис. 4 - Розташування СНЕ в контейнері без бічної стінки

Для визначення впливу розробленої СНЕ на роботу промислової електричної мережі було виконано моделювання режимів роботи в програмному пакеті PowerFactory. Для цього була змодельована електрична мережа підприємства та проведені розрахунки максимального, мінімального та післяаварійного режимів її роботи до та після підключення СНЕ.

Для забезпечення найкращих умов експлуатації досліджуваної електричної мережі було прийнято рішення про встановлення розробленої СНЕ у вузлі 5, який має найбільшу довжину кабельної лінії, яка живить підстанцію 5, яка є найбільш віддаленою від джерела живлення (підстанції 110/10 кВ). Оскільки схема має радіальний тип, то режим роботи мережі є досить простим і не має перетоків між вузлами навантаження. Однак таке явище відбувається лише за умови, що в мережі не використовується система накопичення.

На рис. 5-7 приведені відповідні результати розрахунків параметрів режимів електричної мережі без застосування СНЕ. В післяаварійному режимі розглядався варіант відключення однієї з ліній живлення підстанції 5.

Аналіз отриманих результатів показав, що режим роботи електричної мережі без системи накопичення характеризується досить стабільним рівнем напруги вузлів та перетоків потужності по лініям електропередачі. Однак кожен з вузлів цієї мережі практично не захищений від варіанта аварій на підстанції 110/10 кВ.

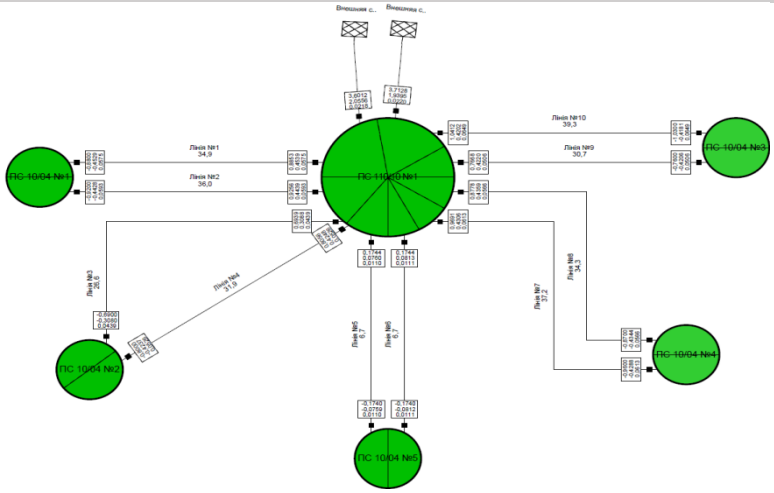


Рис. 5 - Розрахунок параметрів режиму для електричної мережі в режимі максимальних навантажень

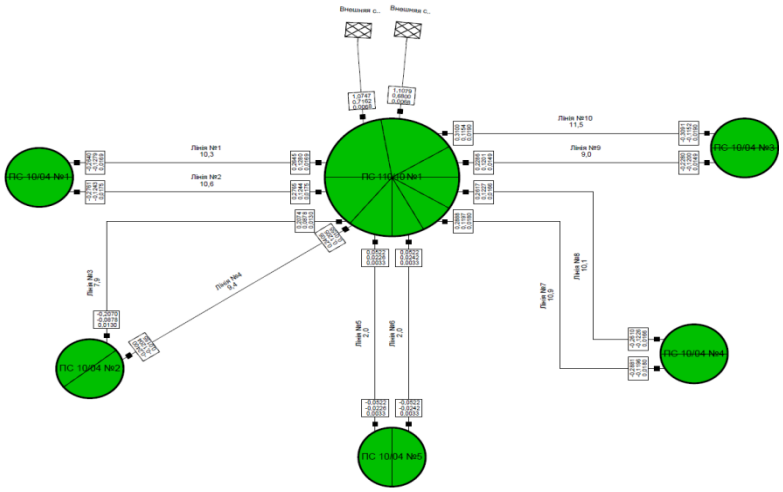


Рис. 6 - Розрахунок параметрів режиму для електричної мережі в режимі мінімальних навантажень

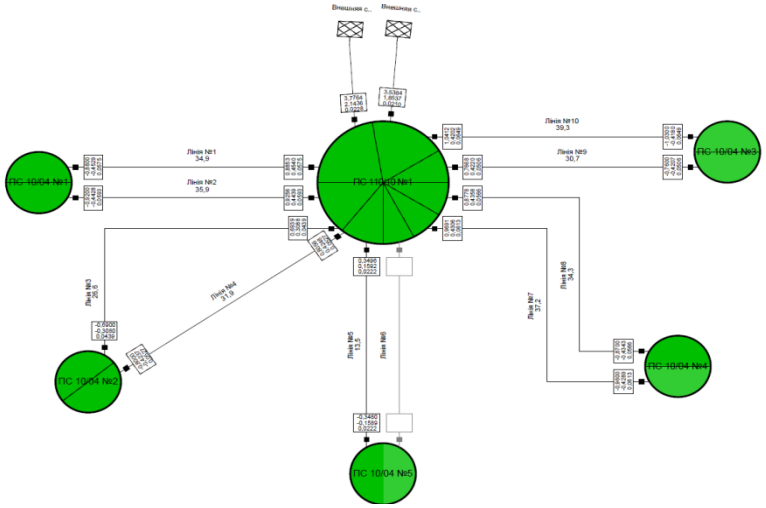


Рис. 7 - Розрахунок параметрів режиму для електричної мережі в післяаварійному режимі роботи

Відповідно до виразу (2) була обґрунтована необхідно використовування двох розроблених електрохімічних накопичувачів, для чого було прийнято рішення щодо їх підключення до двох збірних шин 0,4 кВ підстанції 10/0,4 вузла 5.

На рис. 8 та 9 наведено результати розрахунку параметрів режиму досліджуваної промислової електричної мережі після підключення розробленої СНЕ в режимах максимальних та мінімальних навантажень.

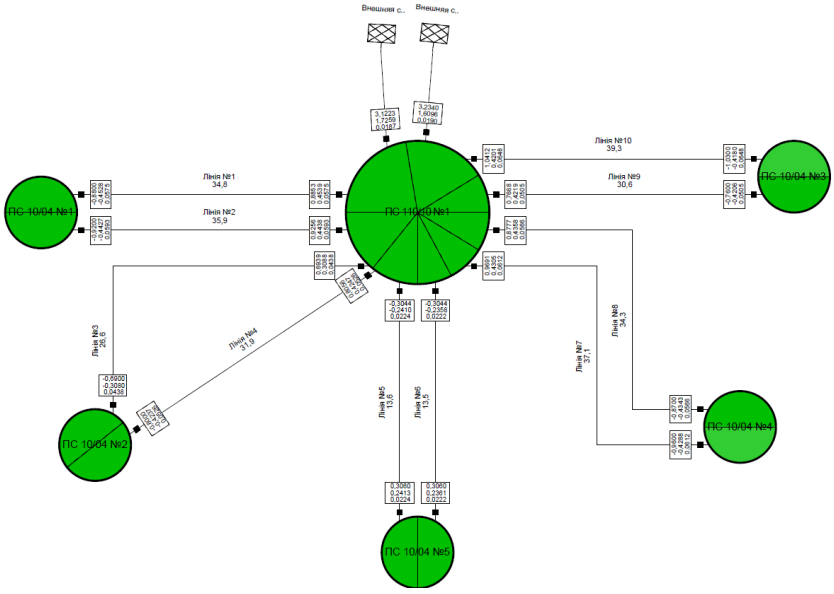


Рис. 8 - Розрахунок параметрів режиму для електричної мережі з СНЕ в режимі максимальних навантажень

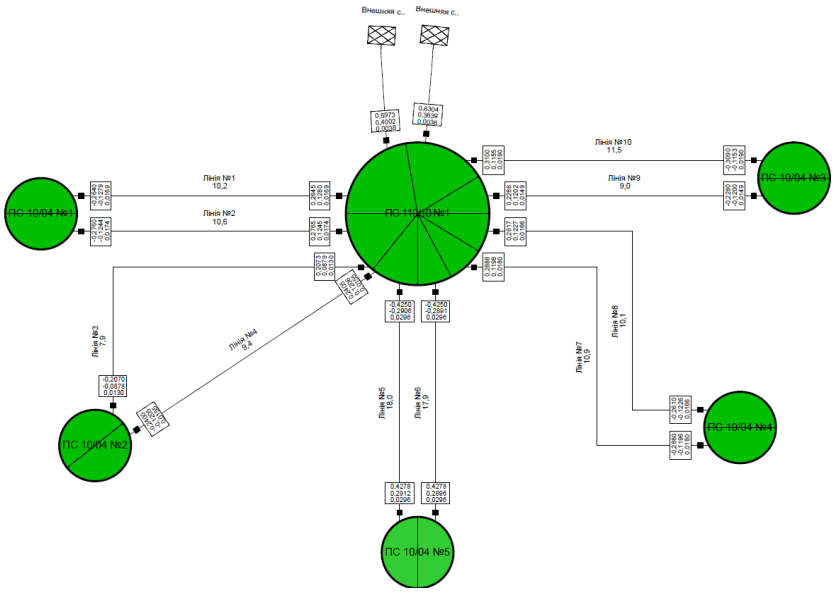


Рис. 9 - Розрахунок параметрів режиму для електричної мережі з СНЕ в режимі мінімальних навантажень

Результати розрахунку підтверджують, що встановлення розробленої СНЕ покращує режим, розвантажуючи електричну мережу та забезпечуючи наявність резерву потужності для автономного режиму роботи.

При розрахунку цих двох режимів враховувалось, що накопичувач працює з максимальним завантаженням. Для зазначених умов роботи накопичувача відповідно до виразу (1) можна отримати час роботи СНЕ:

$$\boldsymbol{T = \frac{C \cdot U \cdot k \cdot \eta}{P}} \quad (3)$$

Запропонована СНЕ передбачає встановлення 8 інверторів потужністю 60 кВт для можливості резервування потужності та зменшення навантаження на кожний з цих інверторів. Виходячи з цього розрахунку, загальна максимальна потужність генерування СНЕ становить 480 кВт. Визначений за виразом (3) час роботи СНЕ в такому режимі становить 3,53 години з урахуванням того, що в схемі використовуються 2 СНЕ.

Беручи до уваги коефіцієнт форми графіка навантаження споживачів промислового підприємства, можна зробити висновок що розроблена СНЕ здатна покрити потреби підприємства для забезпечення технологічного процесу в умовах автономного живлення протягом 8 годин при порушенні електропостачання в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій.

У табл. 5 наведено значення потужності, яка протікає через підстанцію 110/10 кВ у всіх досліджених режимах електричної мережі. Одержані результати розрахунку демонструють, що розроблена СНЕ впливає на режими роботи всієї досліджуваної промислової електричної мережі, а також на режими енергосистеми, до якої підключена мережа.

Таблиця 5.

Перетікання потужності по лініях електропередачі, що забезпечують підключення ПС 110/10 до енергосистеми, МВА

Режим роботи	Без накопичувача		З накопичувачем	
	Ввід 1	Ввід 2	Ввід 1	Ввід 2
Максимальний	3,6012+j2,0556	3,7128+j1,94	3,1223+j1,726	3,234+j1,6096
Мінімальний	1,0747+j0,7162	1,1079+j0,68	0,5973+j0,3639	0,6304+j0,3639
Післяаварійний	3,7764+j2,1436	3,5384+j1,854	–	–

Висновки. З урахуванням поточного стану розвитку енергосистеми України та її потреби у забезпеченні локальними джерелами для автономного живлення споживачів при порушенні електропостачання в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій була розроблена СНЕ з електрохімічними накопичувачами енергії для експлуатації в промислових електричних мережах з різко змінним характером навантаження. Виконаний аналіз впливу розробленої СНЕ на режими роботи промислової електричної мережі показав, що вона здатна покрити потреби навантаження споживачів для забезпечення технологічного процесу підприємства в умовах автономного живлення протягом впродовж робочої зміни. При цьому забезпечується підвищення надійності живлення споживачів та розвантажується живильна електрична мережа. Розроблена система може використовуватись як окреме джерело автономного живлення, так і в поєднанні з джерелами розподіленої генерації, які досить поширюються для промислових електричних мереж, в яких СНЕ забезпечить стабілізацію видачі генерованої потужності до мережі.

Важливою перевагою запропонованої СНЕ є перспектива залучення вітчизняних виробників до виготовлення обладнання, що позитивним чином вплине не лише на впровадження таких систем накопичення, а й сприятиме розвитку економіки країни, що є дуже важливою задачею для сьогодення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.

2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80.

3. Жаркін А. Ф., Попов В. А., Ярмолюк О. С., Наталич В. О. Особливості побудови та використання систем накопичення енергії у розподільних мережах. *Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал*. 2022. № 3. С. 44-52.

4. Sabihuddin S., Kiprakis A., Mueller M. A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies. *Energies*. 2014. № 8. P. 172-216.

5. Савченко Н. Порівняльний аналіз механічних накопичувачів енергії з метою використання у енергетиці. Збірник наукових праць ΛΌГОΣ. 2021. doi: https://doi.org/10.36074/logos-10.09.2021.35.

6. Farhadi M., Member S., Mohammed O. Energy Storage Technologies for High-Power Applications. *IEEE Trans. Ind. Appl*. 2016. № 52. P. 1953-1961.

7. Болотний М. П., Лоєнко Ю. Г., Кармазін О. О. Застосування систем накопичення енергії для задач керування режимами ЕЕС України: стан та перспективи розвитку. *Відновлювана енергетика*. 2022. №3. С. 28-35.

8. Лежнюк П. Д., Буславець О. А., Рубаненко О. О. Балансування потужності та електроенергії в електроенергетичній системі з відновлюваними джерелами енергії критеріальним методом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Енергетика: надійність та енергоефективність* : зб. наук. пр. Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (2). С. 62-70.

9. Довгалюк О. М., Саїдов Ш. Н., Яковенко І. С. Дослідження особливостей використання систем накопичення енергії при роботі трейдерів на енергоринку України. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*: зб. наук. пр. Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 14 (1339) 2019. С. 54-60.

10. Obukhov S., Ibrahim A., Tolba M.A., El-Rifaie A. M. Power balance management of an autonomous hybrid energy system based on the dual-energy storage. *Energies*. 2019. № 12. DOI:10.3390/en12244690.

11. Adewumi O. B., Fotis G., Vita V., Nankoo D., Ekonomou L. The Impact of Distributed Energy Storage on Distribution and Transmission Networks' Power Quality. *Appl. Sci*. 2022. № 12. P. 6466. URL: https://doi.org/10.3390/app12136466.

12. Luo X., Wang J., Wojcik J. D., Wang J., Li D., Draganescu M., Li Y., Miao S. Review of Voltage and Frequency Grid Code Specifications for Electrical Energy Storage Applications. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 5. Pp. 1070. doi: 10.3390/en11051070.

13. Денисюк С. П., Дерев'янко Д. Г. Оцінювання якості електропостачання у локальних системах з джерелами розосередженої генерації: Монографія. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 166 с.

14. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В. Узгодження графіків генерування відновлюваних джерел енергії та електричного навантаження в локальній електричній системі. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2016. № 2. С. 30-37.

15. Савченко Н., Трет'як А. Перспективи застосування механічних накопичувачів при реконструкції або модернізації систем електропостачання будівель. *Збірник наукових праць ΛΌГОΣ*. 2020. С. 124-125. doi: https://doi.org/10.36074/21.02.2020.v1.41

16. Малогулко Ю. В., Повстянко К. О., Затхей М. В. Дослідження генерування вітроелектроустановок з системами накопичення енергії. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. №4. С 9-13.

17. Савченко Н., Трет'як А. Ефективність застосування гібрідних накопичувачів енергії у електричних мережах. *Збірник наукових праць ΛΌГОΣ*. 2020. С. 23-25.

18. Довгалюк О. М., Бондаренко Р. В., Саїдов Ш. Н., Яковенко І. С. Підвищення ефективності роботи електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії при використанні систем накопичення енергії в умовах енергоринку України. Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2019. С. 64-65.

19. Новітні енергетичні технології та їх вплив на функціонування систем енергопостачання : аналіт. доп. / О. М. Суходоля. Київ : НІСД, 2022. 36 с. doi: https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.17.

20. EVE Power CO, Ltd. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/RD-%20LF105_3_2V_105ah.pdf.

21. EMUS G1 BMS – Distributed Grouped. URL: https://emusbms.com/wp-content/uploads/2021/07/EMUS_G1_BMS_–_DISTRIBUTED_GROUPED_v.06.pdf.

22. Characteristics EMUS-G1-User-Manual-v2.9-2. URL: https://emusbms.com/wp-content/uploads/2022/02/EMUS-G1-User-Manual-v2.9-2.pdf.

23. EMUS. Products catalogue. URL: https://emusbms.com/product/g1-can-cell-group-module/.

24. EMUS. Products catalogue. URL: https://emusbms.com/product/c3wc01a-3-way-can-connector/.

25. EMUS. Products catalogue. URL: https://emusbms.com/product/g1-bms-control-unit/.

REFERENCES:

1. Vidnovliuvani dzherela enerhii / Za zah. red. S.O. Kudri. Kyiv. Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU, 2020. 392 s.

2. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentosp-romozhnist». Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 18.08.2017 r. № 605-r. Available at: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80.

3. Zharkin A. F., Popov V. A., Yarmoliuk O. S., Natalych V. O. Osoblyvosti pobudovy ta vykorystannia system nakopychennia enerhii u rozpodilnykh merezhakh. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia : naukovyi zhurnal*. 2022. № 3. S. 44-52.

4. Sabihuddin S., Kiprakis A., Mueller M. A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies. *Energies*. 2014. № 8. P. 172-216.

5. Savchenko N. Porivnialnyi analiz mekhanichnykh nakopychuvachiv enerhii z metoiu vykorystannia u enerhetytsi. *Zbirnyk naukovykh prats ΛΌГОΣ.* 2021. DOI: https://doi.org/10.36074/logos-10.09.2021.35.

6. Farhadi M., Member S., Mohammed O. Energy Storage Technologies for High-Power Applications. *IEEE Trans. Ind. Appl*. 2016. № 52. PP. 1953-1961.

7. Bolotnyi M. P., Loienko Yu. H., Karmazin O. O. Zastosuvannia system nakopychennia enerhii dlia zadach keruvannia rezhymamy EES Ukrainy: stan ta perspektyvy rozvytku. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2022. №3. S. 28-35.

8. Lezhniuk P. D., Buslavets O. A., Rubanenko O. O. Balansuvannia potuzhnosti ta elektroenerhii v elektroe-nerhetychnii systemi z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii kryterialnym metodom. *Visnyk Natsionalnoho tekh-nichnoho universytetu «KhPI». Ser.: Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist* : zb. nauk. pr. Kharkiv: NTU «KhPI». 2021. № 1 (2). S. 62-70.

9. Dovhaliuk O. M., Saidov Sh. N., Yakovenko I. S. Doslidzhennia osoblyvostei

vykorystannia system nakopychennia enerhii pry roboti treideriv na enerhorynku Ukrainy. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist*: zb. nauk. pr. Kharkiv: NTU «KhPI». 2019. № 14 (1339) 2019. S. 54-60.

10. Obukhov S., Ibrahim A., Tolba M. A., El-Rifaie A. M. Power balance management of an autonomous hybrid energy system based on the dual-energy storage. *Energies*. 2019. № 12. doi:10.3390/en12244690.

11. Adewumi O. B., Fotis G., Vita V., Nankoo D., Ekonomou L. The Impact of Distributed Energy Storage on Distribution and Transmission Networks' Power Quality. *Appl. Sci.* 2022. № 12. P. 6466. Available at: https://doi.org/10.3390/app12136466.

12. Luo X., Wang J., Wojcik J. D., Wang J., Li D., Draganescu M., Li Y., Miao S. Review of Voltage and Frequency Grid Code Specifications for Electrical Energy Storage Applications. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 5. Pp. 1070. doi: 10.3390/en11051070.

13. Denysiuk S. P., Derevianko D. H. Otsiniuvannia yakosti elektropostachannia u lokalnykh systemakh z dzherelamy rozoseredzhenoi heneratsii: Monohrafiia. K.: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2019. 166 s.

14. Lezhniuk P. D., Komar V. O., Kravchuk S. V. Uzghodzhennia hrafikiv heneruvannia vidnovliuvanykh dzherel enerhii ta elektrychnoho navantazhennia v lokalnii elektrychnii systemi. *Enerhetyka ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii v APK*. 2016. № 2. S. 30-37.

15. Savchenko N., Tretiak A. Perspektyvy zastosuvannia mekhanichnykh nakopychuvachiv pry rekonstruktsii abo modernizatsii system elektropostachannia budivel. *Zbirnyk naukovykh prats ΛΌΗΟΣ*. 2020. S. 124-125. doi: https://doi.org/10.36074/21.02.2020.v1.41

16. Malohulko Yu. V., Povstianko K. O., Zatkhei M. V. Doslidzhennia heneruvannia vitroelektroustanovok z systemamy nakopychennia enerhii. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. 2022. №4. S 9-13.

17. Savchenko N., Tretiak A. Efektyvnist zastosuvannia hibridnykh nakopychuvachiv enerhii u elektrychnykh merezhakh. *Zbirnyk naukovykh prats ΛΌΗΟΣ*. 2020. S. 23-25.

18. Dovhaliuk O. M., Bondarenko R. V., Saidov Sh. N., Yakovenko I. S. Pidvyshchennia efektyvnosti roboty elektrychnoi merezhi z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii pry vykorystanni system nakopychennia enerhii v umovakh enerhorynku Ukrainy. Zbirnyk naukovykh prats VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi ta navchalno-metodychnoi konferentsii «Enerhetychnyi menedzhment: stan ta perspektyvy rozvytku». Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 2019. S. 64-65.

19. Novitni enerhetychni tekhnolohii ta yikh vplyv na funktsionuvannia system enerhopostachannia : analit. dop. / O. M. Sukhodolia. Kyiv. NISD, 2022. 36 s. doi: https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.17.

20. EVE Power CO, Ltd. Available at: https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/RD-%20LF105_3_2V_105ah.pdf.

21. EMUS G1 BMS – Distributed Grouped. Available at: https://emusbms.com/wp-content/uploads/2021/07/EMUS_G1_BMS_–_DISTRIBUTED_GROUPED_v.06.pdf.

22. Characteristics EMUS-G1-User-Manual-v2.9-2. Available at: https://emusbms.com/wp-content/uploads/2022/02/EMUS-G1-User-Manual-v2.9-2.pdf.

23. EMUS. Products catalogue. Available at: https://emusbms.com/product/g1-can-cell-group-module/.

24. EMUS. Products catalogue. Available at: https://emusbms.com/product/c3wc01a-3-way-can-connector/.

25. EMUS. Products catalogue. Available at: https://emusbms.com/product/g1-bms-control-unit/.

Надійшла до редакції 05.08.2023 р.

.