

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Касаткіна І.В., Бойко С.М., Вишневський С.Я.

АСПЕКТИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ЖИВЛЕННЯ  
Навчальний посібник

Кривий Ріг

2022

1

УДК 621.31

*Рекомендовано до друку вченою радою Криворізького національного університету 26 квітня 2022р. (протокол № 2)*

Рецензенти:

**Прус В.В.**, доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського (м. Кременчук)

**Юрченко О.М.**, доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України (м. Київ)

**І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, С.Я. Вишневський**

**Т 38** Аспекти якості електроенергії в мережах живлення. Навчальний посібник / І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, С.Я. Вишневський– Кривий Ріг, 2022. – 168 с.

**ISBN ...**

У навчальному посібнику викладено основні питання енергозбереження, містить загальнотеоретичні відомості щодо нормування та корекції якості електроенергії. Значний обсяг матеріалу присвячено методикам покращення якості електроенергії та підвищення енергоефективності електроприводів на промислових підприємствах.

Навчальний посібник є логічним продовженням ряду навчальних посібників авторів та містить їх нові наукові розробки.

Рекомендовано для фахівців, аспірантів та студентів за напрямком 141 – «Енергетика, електротехніка та електромеханіка» та інших споріднених спеціальностей при вивченні дисциплін «Способи поліпшення якості електроенергії в мережах живлення», «Якість електроенергії» та інших.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>5</b>
<b>Розділ 1 Проблемні питання сучасної енергетики.....</b>	<b>6</b>
1.1 Актуальні питання енергетики.....	6
1.2 Накопичувачі енергії. Паливні елементи .....	13
1.3 Smart Grid технології в покращенні якості електроенергії.....	38
Контрольні питання до розділу 1 .....	47
<b>Розділ 2 Світові та вітчизняні стандарти якості електроенергії .....</b>	<b>48</b>
2.1 Актуальність питань якості електроенергії.....	48
2.2 Норми якості електроенергії.....	48
2.3 Показники якості електроенергії.....	49
Контрольні питання до розділу 2.....	68
<b>Розділ 3 Чинники погіршення якості електроенергії на промислових підприємствах.....</b>	<b>69</b>
3.1 Основні чинники погіршення якості електроенергії.....	69
3.2 Поняття електромагнітної сумісності.....	69
3.3 Вплив вищих гармонік на якість електроенергії.....	70
Контрольні питання до розділу 3.....	84
<b>Розділ 4 Контроль та вимірювання якості електроенергії.....</b>	<b>85</b>
4.1 Методики вимірювання показників якості.....	85
4.2 Класична система енергообліку. Структура типової АСКОЕ.....	85
Контрольні питання до розділу 4.....	88
<b>Розділ 5 Математичні методи аналізу якості електроенергії.....</b>	<b>89</b>
5.1 Частотний аналіз несинусоїдних сигналів. Перетворення Фур'є.....	89
5.2 Вейвлет аналіз.....	91

5.3 Сучасні теорії потужності.....	92
Контрольні питання до розділу 5.....	95
<b>Розділ 6 Аспекти компенсації реактивної потужності в системах електропостачання.....</b>	<b>96</b>
6.1 Підходи щодо компенсації реактивної потужності.....	96
6.2 Реактивна потужність: поява, наслідки та вплив на роботу електрообладнання.....	112
6.3 Компенсація реактивної потужності та методика її розрахунку.....	117
6.4 Покращення якості електроенергії засобами навантаження.....	126
6.5 Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії.....	156
Контрольні питання до розділу 6.....	158
<b>Список використаної та рекомендованої для користування літератури.....</b>	<b>159</b>

## ВСТУП

В сучасний час економічних відносин електрична енергія розглядається як товар, за який споживач розраховується у грошовому еквівалентні, а для себе вимагає відповідну якість та кількість електроенергії. Економічний збиток, що обумовлений зниженнями якості електроенергії, має дві складові: електромагнітну та технологічну [1].

Якість електроенергії розглядається у сукупності з електромагнітним впливом системи електропостачання на роботу електричних апаратів, різноманітних приладів та основного електрообладнання. Отже, якість електричної енергії характеризує електромагнітне середовище, у якому працює електричне обладнання.

Компенсація реактивної потужності з кожним роком стає усе більше актуальною у зв'язку з ростом потужності споживання електричної енергії. При нормальних робочих умовах всі споживачі електричної енергії, чий режим супроводжується постійним виникненням електромагнітних полів (електродвигуни, обладнання зварювання, люмінесцентні лампи й багато чого ін.) навантажують мережа як активної, так і реактивної складової повної споживаної потужності.

Невідповідність показників якості електричної енергії стандартним значенням мають негативні наслідки:

- збільшення втрат і споживання електричної енергії у системі електропостачання;
- суттєве зниження надійності основного електрообладнання;
- виникнення порушень у технологічному процесі;
- зменшення обсягу продукції, що виробляється на підприємстві.

Як відзначає автор І.В. Жежеленко у роботі [2] на сучасному етапі розвитку електроенергетики можна чітко виділити дві важливі проблеми – якість електроенергії і надійність електропостачання, що й визначається заданою функцією електроенергетичних систем – постачання споживачам електроенергії у потрібній кількості та відповідної якості.

## **Розділ 1 Проблемні питання сучасної енергетики**

### **1.1 Актуальні питання енергетики**

На мадридській конференції з питань клімату (2019 р.) Генеральний секретар ООН А. Гутерреш сформулював наступні умови запобігання катастрофічним змінам клімату планети [3]:

- до 2030 року скоротити на 45% викиди парникових газів;
- до 2050 року досягти вуглецевого нейтралітету;
- не допустити підвищення середньої глобальної температури більш, ніж на 1.5°C.

Ситуація ускладнюється безперервним зростанням світового енергоспоживання, яке, за оцінками експертів, має збільшитись до 2050 року майже в 1,5 раза. Стає очевидним, що земна цивілізація підійшла до межі, коли її виживання потребує докорінних змін, в першу чергу в енергетичній сфері. На перші ролі виходять безвуглецеві технології, засновані на енергії сонця, вітру та води, а також ядерна енергетика, яка може забезпечити людство енергією протягом декількох тисячоліть.

Технічний і економічний прогрес «зеленої» енергетики (вітрові (ВЕС) і сонячні (СЕС) електростанції, очевидний. Її позитивна роль у вирішенні енергетичних і екологічних проблем не викликає сумнівів. Однак, «зелена» енергетика має низку характеристик, які необхідно брати до уваги при плануванні її широкого використання в електроенергетиці країни. Головний серед них – нестабільність функціонування, обумовлена залежністю від погодних та сезонних коливань. Вночі немає сонця, в штиль–вітру.

Фахівці компанії EDF (Франція) стверджують, що для їхньої країни коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) ВЕС не перевищує 23%, а СЕС - 13%. У зимовий період цей показник знижується до 4-5%. Термін служби ВЕС і СЕС становить 15-20 років. Все це негативно позначається на їхніх техніко-економічних показниках. Досвід Німеччини, де частка «зеленої» енергетики досягла 30%, а внесок АЕС знизився до 12%, також підтверджує ці оцінки: вартість електроенергії зросла на 22% після припинення експлуатації 8

з 15 ядерних енергоблоків. Треба відзначити, що тільки 46% електростанцій Німеччини можна віднести до екологічно чистих. У Франції, де домінує ядерна енергетика, цей показник становить 93% [4].

Ситуація може бути поліпшена за допомогою накопичувачів енергії. Однак, попри значний прогрес, можливості акумулюючих пристроїв залишаються невизначеними. Французи підраховали, що для накопичення 1 ТВт·год електроенергії потрібен акумулятор вагою в мільйон тонн, включаючи 120 тисяч тонн літію. Це значно більше його річного видобутку у світі. Чи надовго вистачить запасів літію - питання, на яке поки що немає відповіді. Існують сумніви в здатності акумуляторів довго зберігати накопичену електроенергію.

Вчені Массачусетського технологічного інституту (МТІ, США) в грудні минулого року опублікували результати досліджень, які практично збіглися з висновками французьких експертів. Автори досліджень стверджують, що при частці «зеленої» енергетики вище 40% виникає важко переборна нестійкість енергосистем, що вимагає паралельного з СЕС і ВЕС використання спеціальних балансуючих потужностей. На думку американських вчених, найбільш розумним є спільне використання ядерних і відновлюваних джерел.

Що стосується ядерної енергетики, то важкі аварії на АЕС «Три Майл Айленд» (США), Чорнобильської (СРСР) і «Фукусіма» (Японія) істотно загальмували процес її розвитку. Радіофобія ускладнює об'єктивну оцінку ролі ядерної енергетики у вирішенні енергетичних та екологічних проблем, реального рівня її потенційної небезпеки. Ні аварія в США, ні аварія в Японії не призвели до небезпечного опромінення людей. На американській АЕС практично був відсутній викид радіонуклідів у довкілля. На японській АЕС подібного викиду уникнути не вдалося, але вже через 8 років забруднені території були дезактивовані й евакуйоване населення повертається в місця до-аварійного проживання.

Чорнобильська трагедія дійсно призвела до загибелі людей через радіаційний фактор. За даними Наукового комітету ООН з дії атомної радіації

(доповідь НКДАР ООН, 2007), кількість людей з небезпечним рівнем опромінення склала 134 людини. З них померло 48. Зафіксовано близько 6 000 порушень функцій щитоподібної залози. На щастя, в цьому випадку ймовірність летальних випадків мала. Інші генетичні та онкологічні наслідки визнані сумнівними.

Ці дані блякнуть перед кількістю жертв природних катаклізмів: землетрусів, лісових пожеж, затоплень, ураганів і т.п., частота і масштаби яких зростають. Тільки один землетрус, що призвів до аварії на АЕС «Фукусіма», забрав життя десятків тисяч людей [5].

Науково-технічний прогрес зупинити неможливо. Практично всі використовувані людством технології: транспорт, енергетика, видобуток копалин, хімічна промисловість, металургія і т. д. – несуть не тільки блага, а й породжують потенційні небезпеки. Автомобільний транспорт, наприклад, вбиває в рік на Землі понад мільйон осіб. Але люди не можуть відмовитися від подібних технологій. Треба навчитися зменшувати їх небезпеку.

В цьому плані ядерна енергетика досягла значного прогресу. Розширення використання активних і пасивних систем безпеки робить практично неможливим важкі аварії на АЕС. А якщо така аварія станеться, викид радіонуклідів у довкілля можна обмежити й навіть запобігти за допомогою спеціальних заходів. Сьогодні основним критерієм безпеки АЕС стало прагнення до виключення необхідності евакуації населення в разі будь-якої аварії.

Провідні країни світу, включаючи Китай, Індію, США, Росію, Францію, Канаду, Великобританію, Японію, Південну Корею, мають намір і далі розвивати ядерну енергетику, збільшують фінансування наукових досліджень в ядерно-енергетичній галузі. Створені та реалізуються проекти АЕС підвищеної безпеки. Розробляються проекти АЕС наступного покоління. У їх числі реактори-розмножувачі на швидких нейтронах. Саме вони повинні стати основою майбутньої ядерної енергетики, оскільки тільки з їх допомогою може бути реалізований величезний енергетичний потенціал урану і торію [6].



Велика увага приділяється розробці й впровадженню модульних реакторів малої потужності. Можливість модульного заводського виготовлення, підвищений рівень безпеки роблять їх привабливими, особливо для малодоступних і віддалених регіонів. Хороші маневрові характеристики сприяють їх використанню для стабілізації роботи енергосистем. Перспективним є застосування ядерної енергії для побутового та промислового теплоспоживання, отримання водню, опріснення води, прямого відновлення заліза та інших технологій, які потребують великої кількості високопотенційної енергії.

Учасники Міжнародної міністерської конференції, що відбулась в листопаді минулого року в США під егідою Білого дому, підтвердили, що ядерна енергетика має відігравати суттєву роль у вирішенні енергетичних і екологічних проблем. Фактично цей висновок підтвердила і Єврокомісія.

За даними Всесвітньої ядерної асоціації, клуб ядерно-енергетичних держав стає дедалі більшим. У період 2015 - 2017 років у світі вводилося близько 10 нових ядерних енергоблоків щорічно. У 2018 році додалося ще 14. У наступні два роки почнеться експлуатація 30 нових енергоблоків сумарною потужністю 33 ГВт (ел.). Всього у світі функціонує 450 енергоблоків АЕС загальною потужністю 392,4 ГВт. У стадії будівництва знаходиться ще 53.

Прогноз розвитку безвуглецевої енергетики зроблений в доповіді «Вартість декарбонізації» Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР, АЯЕ №7299, 2019 р.). Нагадаємо, що ця організація об'єднує 35 розвинених країн, включаючи США, Францію, Німеччину та ін. Представлені в доповіді результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки [7]:

– розвиток світової, екологічно чистої електроенергетики має базуватися на економічно ефективному поєднанні ядерних і відновлюваних енергоресурсів;

– роль викопних видів палива (вугілля, нафта, газ) буде знижуватися, якщо не будуть знайдені методи уловлювання та зберігання вуглецю (поява останніх в період до 2050 року вважається малоюмовірною);

– ключова роль ядерної енергетики– покриття базисної частини електричних навантажень, при цьому її частка на рівні 2050 року має становити 40 - 50%;

– частка «зеленої» електроенергетики не повинна перевищувати 30-40% через ризик втрати стійкості енергосистем;

– зросте роль балансуєчих потужностей, в першу чергу гідроелектростанцій і модульних реакторів малої потужності;

– залишається невизначеною роль накопичувачів електроенергії через високу вартість і обмежені можливості тривалого зберігання електроенергії.

На цьому тлі дисонансом виглядає позиція Мінекоенерго України. Нещодавно очільник цього відомства представив «Концепцію «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року» та повідомив, що вона найближчим часом буде передана Уряду для затвердження. Українська енергетична спільнота не брала участі у підготовці цього документа. Не було і попереднього публічного його обговорення. Доводиться повторювати очевидну істину: келійність в розробці й прийнятті критично важливих для країни рішень неприпустима.

При цьому до 2050 року, за задумом авторів «Концепції ...», припиняє своє існування теплова електроенергетика, більш ніж у два рази скорочується виробництво електроенергії на АЕС. Не кажучи про суто енергетичні проблеми, автори забули, що це веде до звільнення десятків тисяч висококваліфікованих фахівців. Як передбачається вирішувати завдання їх працевлаштування і майбутнє мономіст енергетиків і вугільників?

До введення енергоринку в липні 2019 року, встановлена НКРЕКУ ціна на електроенергію, що виробляється тепловими електростанціями, в три рази перевищувала аналогічний тариф для атомників. У всьому світі теплова генерація дорожча за ядерну. Але не в 3 рази, а не більше, ніж на 60-80%.

Чинна тарифна політика призвела до того, що застарілі теплові енергоблоки, побудовані за проектами 50-60-х років минулого століття, дають чималий прибуток. І це при тому, що їхній КВВП лише близько 30%, а питома витрата умовного палива майже у два рази перевищує передові закордонні показники.

Склалася парадоксальна ситуація. Світ шукає заміну вугільним електростанціям. ООН активізує діяльність щодо введення підвищеного оподаткування на використання цієї технології. А Україна штучно підвищує прибутковість застарілих ТЕС, що мають найгірші у світі техніко-економічні та екологічні показники. Більш того, деякими власниками теплової генерації й нерентабельних вугільних шахт є одні й ті ж особи. Вони зацікавлені в підвищенні ціни на вугілля і ніколи не будуть боротися за скорочення його споживання. Завищені тарифи для теплової генерації дозволяють їм отримувати надприбуток [8].

Встановлені для «зеленої» генерації тарифи багаторазово перевищують тарифи для АЕС і вдвічі світові показники. Висока прибутковість привела до кон'юнктурного і хаотичного зростання сумарної потужності ВЕС і СЕС. Об'єднана енергосистема України вже сьогодні відчуває труднощі у забезпеченні стабільного функціонування, у недостатності балансуємих потужностей.

Ядерна енергетика становить лише близько 20% сумарної потужності українських електростанцій, але дає понад половину споживаної в країні електроенергії. Це унікальне досягнення. Вона є фундаментом, на якому тримається життєздатність України, її сьогодення і майбутнє. Звичайно, техніко-економічні показники нашої ядерної енергетики (тривалість ремонтів, чисельність, особливо центрального апарату і т.д.) ще далекі від кращих світових показників, але це не привід, щоб розхитувати й руйнувати фундамент енергетичної безпеки країни.

Сьогодні в країні діє 15 ядерних енергоблоків. Для 11 з них термін служби продовжений на 10 - 20 років. Існує можливість продовження терміну експлуатації ще на 10 - 20 років. У будь-якому випадку треба бути готовими до

того, що наявні ядерні енергоблоки доведеться зупиняти, починаючи з 30-х років. Необхідні заміщувальні потужності. Потрібно негайно братися до визначення типів майбутніх енергоблоків і їх постачальників. Треба відтворювати будівельно-монтажну індустрію, посилити проектні організації, мобілізувати й розширити можливості національного енергетичного машинобудування. І не треба забувати, що від прийняття рішення про будівництво нових потужностей до їх введення в експлуатацію проходить не менше, ніж 10 років.

Однак, будь-які плани зваляться, якщо не будуть знайдені кошти для їх реалізації. Сьогодні треба визначати варіанти накопичення коштів для нового будівництва. Електроенергетика, в тому числі ядерна, дороге задоволення. Пошук джерел фінансування для будівництва об'єктів, власником яких є держава, завдання не тривіальне і вимагає часу. Інвестор повинен розуміти державну політику в галузі, в яку запрошують вкладати ресурси [9].

Багато десятиліть електроенергетика, енергетичне машинобудування, проектний і будівельно – монтажний комплекси, а також наукове супроводження електроенергетики України були лідерами. В останні три десятиліття було прийнято багато спонтанних, непродуманих, скоростиглих рішень, які привели галузь до нинішнього стану. Відбувається спрацьовування потенціалу галузі, створеного в минулому столітті, оновлення основних фондів практично не відбувалося (з 1990 року введено в експлуатацію три атомні енергоблоки (їх будівництво було розпочато ще у 80-ті роки минулого століття), що замінили три блоки Чорнобильської АЕС, виведені з експлуатації. У тепловій електроенергетиці експлуатуються енергоблоки, наймолодшим з яких майже 40 років.). Галузі властива кадрова чехарда, зниження професіоналізму, перш за все на управлінському рівні.

Готуючись до кардинальної перебудови, треба детально розібратися в стані галузі та оцінити технології, які передбачається покласти в основу її розвитку, а також ризики, пов'язані зі змінами структури генеруючих потужностей. Необхідно, щоб майбутня електроенергетика вирішувала

завдання соціально - економічного розвитку країни, спиралася на обґрунтований баланс різного типу джерел генерації, в першу чергу, «зелених» та ядерних, і розв'язувала екологічні проблеми.

## **1.2 Накопичувачі енергії. Паливні елементи**

### **Системи накопичення енергії**

Ефективне використання світових енергетичних ресурсів залежить не тільки від способів їх використання, а й від методів зберігання виробленої енергії. За прогнозами аналітиків GMT Research обсяг ринку зберігання енергії активно розвивається і вже в 2020 році в 26 разів перевищить показник 2014 року. У 2015 році приблизно 16% від загального обсягу ринку припало на домашні системи зберігання енергії. Це обумовлено тим, що при розміщенні сонячної або вітряної електростанції бажано встановлювати також і систему зберігання енергії, оскільки електроенергія з відновлюваних джерел енергії виробляється нерівномірно протягом дня. Наприклад, сонячна енергія виробляється тільки вдень, але використовуватися вона повинна протягом усього дня. Або видався похмурий день і генерація склала істотно менше, ніж щоденне споживання вашого домогосподарства. Саме для таких випадків і призначені системи зберігання енергії [10].

### **Технології зберігання енергії**

Сьогодні на ринку систем зберігання енергії найбільш поширена літій-іонна технологія. Наприклад, в 2015 році в 95% випадків застосовувалися літій-іонні акумулятори. Вони також широко використовуються на споживчому ринку і на ринку автомобілів, де встановлюються в гібридних або повністю електричних транспортних засобах. Ціни на літій-іонні батареї знижуються, їх безпека підвищується, вони добре себе показують як у системах, де потрібна велика кількість енергії протягом короткого періоду (силові установки), так і в системах, які вимагають меншу кількість енергії протягом більш тривалого періоду. Таким чином літій-іонні акумулятори підходять для зберігання енергії будь-яким споживачам – від великих комунальних підприємств, що займаються

передачею і розподілом енергії до індивідуальних комерційних і житлових об'єктів.

Однак корисність літій-іонної технології необхідно додатково обумовлювати. По-перше, дуже важливо, щоб експлуатаційні характеристики різних типів літій-іонних батарей відповідали поставленим завданням. Наприклад: для великих електростанцій одна модель акумулятора може бути на 80% ефективніше, ніж інша, через здатність АКБ швидко заряджатися і розряджатися. По-друге, в деяких окремих випадках інші технології можуть працювати краще. Зокрема: для управління системою заряду і зберігання енергії в житлових системах свинцево-кислотні батареї можуть виявитися більш ефективними. А для великомасштабних електростанцій лужні батареї є більш економічними, але тільки для коротких періодів заряджання та розряджання (швидше однієї години).

### **Основні характеристики систем зберігання енергії**

Однією з головних характеристик для будь-яких систем зберігання енергії є корисна ємність. Цей параметр системи накопичення енергії залежить від номінальної потужності, допустимої глибини розряду і зменшення ємності акумулятора з плином часу. Наприклад, Adara Power пропонує систему зберігання енергії для домогосподарств номінальною потужністю акумулятора 8,6 кВт·год. При цьому, заявлена максимально допустима глибина розряду для цієї системи складає 75%. Отже, корисна ємність акумуляторів Adara становить 6,45 кВт·год. У той же час прямий конкурент – Tesla – випускає системи зберігання енергії Powerwall, які мають допустиму глибину розряду в 100%. Для них корисна ємність буде дорівнювати номінальній (7 або 10 кВт·год).

Проте, номінальна ємність акумулятора заявлена тільки на перший день їх роботи. З плином часу корисна ємність буде повільно зменшуватися через зношування. Кількість циклів, на яку розрахована система, це характеристика довговічності акумулятора. Термін служби батареї сильно залежить від характеру використання. Наприклад, виробник може оцінити термін життя однієї і тієї ж батареї в 4000 циклів при глибині розряду в 70% або в 3000

циклів при глибині розряду 85%. Клієнти повинні мати доступ до таких даних, однак на практиці ці дані практично неможливо знайти [11].

Знати кількість циклів при різних умовах використання важливо з точки зору максимізації віддачі акумулятора для клієнта. Наприклад, Sonnen дає гарантію на всі свої системи зберігання енергії SonnenBatterie у вигляді «10 000 циклів або 10 років». При використанні такої системи в звичайному режимі ви отримуєте лише близько 3650 циклів за 10 років. Таким чином, щоб наблизитися до 10 000 циклів протягом гарантійного терміну ви повинні здійснювати близько 3 циклів в день, для чого будуть потрібні спеціальні умови. Прикладом може послужити використання системи не тільки для власного споживання, а і для продажу електроенергії в мережу.

#### Бізнес-моделі для систем зберігання енергії

Існує кілька економічних сценаріїв для власників систем зберігання енергії:

– **Автономна домашня електростанція.** В цьому випадку ви використовуєте вашу систему зберігання енергії, щоб зберігати вироблену енергію для своїх потреб і зробити ваш будинок енергонезалежним. Надлишок енергії, що генерується протягом дня, зберігається в системі акумуляторів для споживання в нічний час. Однак для таких систем необхідний додатковий контроль кількості виробленої енергії, також бажано мати резервне джерело живлення. По суті, така система зберігання енергії повинна розраховувати споживання енергії домогосподарством в режимі реального часу для оптимізації виробництва електроенергії. Крім того, система повинна скорочувати генерацію, коли кількість виробленої енергії перевищує обсяг системи зберігання. Такий варіант розміщення є вигідним при бажанні клієнта стати повністю незалежним або в регіонах з високою вартістю електроенергії.

– **Резервна домашня електростанція.** Цей варіант енергосистеми буде цікавий для домогосподарств, розташованих в регіонах, що мають проблеми з поставками енергії. Електростанція виробляє електрику тільки до повного заповнення системи зберігання, після чого вимикається. В результаті на момент

відключення живлення ви маєте завжди повністю заряджену систему акумуляторів, а також можете при необхідності виробляти електроенергію самостійно. В такому випадку вам необхідно розрахувати кількість енергії, необхідну для забезпечення будинку в періоди відключення електрики і встановити відповідні розміри системи зберігання енергії.

– **Мережева домашня електростанція.** В такому випадку ви переслідуєте мету продавати вироблювану енергію вище ціни, по якій ви купуєте її у держави. В умовах України таке рішення є досить вигідним, оскільки держава зобов'язана викупляти у вас електроенергію за «зеленим» тарифом, який прив'язаний до вартості євро. Щоб продавати енергію напряму, вам не знадобиться встановлювати систему зберігання енергії, що дозволяє значно заощадити [12].

### **Феномен від'ємних цін на електроенергію**

Від'ємні ціни на електроенергію є відносно новим явищем на оптових ринках електроенергії. Вперше вони були помічені на німецькому денному ринку в 2007 році і в даний час досить рідкісні, але в 2012 році при формуванні цін на наступний день були 56 годин в 15 різних днів, коли ціни опускалися до негативних значень. Це означає, що постачальники електроенергії повинні були платити споживачам, щоб останні використовували постачаючу їм енергію. Таке явище виникає, коли подачі електроенергії відповідає виключно низький попит і постачальник вирішує, що витрати, пов'язані із завершенням роботи і перезапуском всієї системи живлення, більше, ніж витрати, пов'язані з виплатою зовнішній стороні для використання виробленої електроенергії. Від'ємні ціни на електроенергію вказують на негнучкість існуючого режиму і їх поява відображає необхідність в системах зберігання енергії. Їх присутність повинна стимулювати ринок зберігання енергії: замість того, щоб купувати енергію і потім продавати її, володар системи зберігання енергії може «купити» енергію (за яку йому заплатить постачальник) і потім продати її пізніше, отримуючи, таким чином, подвійну вигоду. При цьому факт установки систем зберігання енергії буде штовхати ціни вгору і досить великий



ринок зберігання енергії сам по собі призведе до зникнення від'ємних цін на електроенергію.

Системи накопичення енергії: побутові та промислові зразки, існуючі і перспективні розробки

Нижче ми пропонуємо огляд світового ринку систем накопичення електроенергії, ми відібрали найбільш передові компанії і технології, щоб представити варіативність можливих рішень і різноманітність наявної технічної бази. При цьому, під час оцінки не враховувались, можливо, прекрасні і навіть революційні ідеї, які зараз або просто неможливо реалізувати з технічних причин, або їх використання не приносить позитивного економічного ефекту. Тут представлені компанії, які вже зараз мають великі можливості і можуть представити готові інноваційні рішення, а їх надійність і перспективність підтверджена «послужним» списками – вже реалізованими проектами [13].

#### *Технологія Powerwall and Powerpack*

Tesla поступово стає одним зі світових лідерів в області створення систем зберігання енергії. На сьогоднішній день Tesla просуває на ринку два різновиди таких систем: Powerwall та Powerpack. Перша може використовуватися в житлових і невеликих офісних приміщеннях, друга – для роботи на підприємствах, вона здатна працювати з великими потужностями і для великої кількості споживачів.

«Домашня» Powerwall має кілька різновидів – 7 кВт (вартість 3 тис. доларів), 10 кВт (вартість 3,5 тис. доларів) і 14 кВт (вартість 5,5 тис. доларів, ємності такого акумулятора вистачить на добу для енергозабезпечення будинку з двома спальнями). Окремо доведеться сплатити близько 1500 – 1600 доларів за установку, інвертори та інші витратні матеріали. Габаритні розміри становлять близько метра в ширину і довжину, товщина – близько 18 см, вага – 100 кг. Підзарядка акумулятора можлива як від вітрогенератора або сонячної батареї, так і від побутової мережі. Powerwall може бути встановлена всередині або зовні будинку, допустима температура експлуатації – від –20 до +43 градусів. Гарантія від виробника – 10 років.

Потужність промислової Powerpack становить 100 кВт, але її конструкція дозволяє легко об'єднувати окремі елементи в великі системи потужністю до 100 МВт, що вистачить для енергозабезпечення великого промислового об'єкта. Приблизна вартість складе 250 доларів за 1 кВт.

### **Технологія ZCell**

Коли австралійська компанія Redflow заявила про початок продажів домашніх потужних акумуляторних батарей з рідким електролітом, багато фахівців не сприйняли цю інформацію серйозно. Втім, перші зразки, що надійшли в продаж в березні 2016 року отримали позитивні відгуки. Поки компанія Redflow орієнтується на внутрішній австралійський ринок користувачів сонячної енергії.

Постійне зниження «зеленого» тарифу на тлі зростаючих цін на енергоносії роблять батареї з рідким електролітом ZCell все більш привабливими для домашнього господарства. Розроблена австралійськими інженерами система збереження енергії заснована на цинк-бромній акумуляторній батареї ємністю 10 кВт. Накопичуючи енергію від сонячних батарей, вона віддає її в моменти пікового навантаження, а так само у вечірньо-нічний час. Серед переваг можна відзначити [14]:

- максимально допустима глибина розряду становить 100%, при цьому розробники стверджують, що повний розряд ніяк не позначається на ємності батареї і її експлуатаційних характеристиках;
- батарея може перебувати розрядженою дуже тривалий час, це ніяк не позначиться на її характеристиках;
- ємність батареї практично не змінюється з часом – гарантія на акумулятор 10 років;
- в батарею вбудована власна система електрозахисту, крім того, існуючий інтерфейс дозволяє контролювати і управляти роботою системи дистанційно, використовуючи Інтернет;

– простота встановлення – система поставляється у вигляді моноблока, який просто необхідно поставити всередині або зовні будинку і підключити до мережі;

– екологічна безпека – всі елементи акумулятора підлягають вторинній переробці;

– за своїми габаритами – це найменша масово випускається батарея з рідким електролітом.

Основні проблеми, на думку фахівців, пов'язані саме з цинк-бромним акумулятором, який дуже ефективний при тривалих циклах накопичення і зберігання енергії, але при цьому не дуже виправданий при коротких циклах заряд-розряд. Крім того, більшість користувачів звикли орієнтуватися на літій-іонні акумулятори, що робить подальшу комерціалізацію ZCell досить проблематичною, особливо за межами Австралії [15].

### **Технологія SonnenCommunity**

Компанія Sonnen – безсумнівний лідер німецького ринку побутових систем зберігання енергії, на сьогоднішній день компанія реалізувала більше 10 тисяч домашніх систем. Sonnen представляє акумуляторні батареї ємністю від 2 до 16 кВт-год, термін служби – не менше 10 тисяч циклів зарядки/розрядки при максимально допустимій глибині розряду близько 80%. Останнім часом компанія виступає не тільки як виробник обладнання, але й позиціонує себе як постачальник послуг на ринку електроенергетики.

У листопаді 2015 року компанія запустила в Німеччині амбітний проект. Платформа SonnenCommunity – це можливість створити віртуальний пул з власників сонячних систем і електричних батарей. Надлишки електроенергії, отриманої сонячними батареями і не використані в побуті, можуть бути розподілені серед учасників віртуальної мережі, наприклад, можуть бути спрямовані на підзарядку акумуляторної системи в іншого власника, а пізніше – реалізовані на оптовому ринку. З огляду на різке падіння цін на «зелену» електроенергію, це дозволить їй виробникам продавати її в реальному часі в момент, коли ціни будуть найбільш сприятливими. До платформи може

підключитися будь-який користувач, який придбав обладнання компанії. Sonnen також використовує нове програмне забезпечення, яке може візуалізувати агреговане зберігання в режимі реального часу.

Фахівці розглядають Sonnen як найбільш реального конкурента Tesla – компанія вже продала близько тисячі систем для домашніх сонячних електростанцій. Правда, вартість зберігання енергії в системах Tesla нижче, але в Sonnen наполягають на своїй перевазі по терміну служби і кількості циклів заряд/розряд.

### **Технологія Smart Towns**

В Японії, де щорічно зводиться близько 1 мільйона нових будинків, з 2020 року обов'язковим стане стандарт Zero Energy Homes (ZEN). Panasonic і інші японські фірми, прямі конкуренти «Гігафабрики» Tesla, вже багато років продають місцевим клієнтам готові рішення для домашніх сонячних електростанцій, в яких система зберігання електроенергії поки пропонується як додаткова опція [16].

Компанія Panasonic реалізує власну програму «розумного» міста, розташованого біля Йокогами. Передбачається, що в межах цього міста всі домашні сонячні електростанції і системи накопичення енергії будуть об'єднані в єдину мережу. Це дозволить не тільки забезпечити енергонезалежність міста, а й в перспективі – вийти на японський оптовий ринок продажу електроенергії.

Panasonic – один з найбільших в світі виробників потужних накопичувальних батарей, великі обсяги виробництва дозволяють компанії реалізовувати продукцію за дуже конкурентною ціною. Smart Towns – молодий, але амбітний проект, в якому Panasonic постарается реалізувати нові підходи в накопиченні і розподілі електричної енергії. При цьому компанія буде спиратися на досвід, набутий недавно в Канаді, де Panasonic реалізувала великий проект «сонячні батареї + акумулятор». Крім того, компанія реалізує кілька проектів по створенню систем зберігання електрики для житлових будинків в Австралії, хоча і зіткнулася там з сильною конкуренцією.