



## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕКОНОМІЧНА БЕЗПЕКА

УДК 338.28:338.49:621.3.05  
JEL Classification: L94, Q40, Q42, Q49

DOI: 10.37332/2309-1533.2023.1.19

Пуцентейло П.Р.,  
д-р екон. наук, професор, професор кафедри  
бізнес-аналітики та інноваційного інжинірингу,  
Західноукраїнський національний університет,  
м. Тернопіль

### КОНЦЕПЦІЯ SMART GRID: ТЕХНОЛОГІЧНІ, ОРГАНІЗАЦІЙНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СФЕРИ

Putsenteilo P.R.,  
dr.sc.(econ.), professor, professor at the department  
of business analytics and innovative engineering,  
West Ukrainian National University, Ternopil

### THE CONCEPT OF SMART GRID: TECHNOLOGICAL, ORGANIZATIONAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF THE ENERGY SECTOR

**Постановка проблеми.** З початку XXI століття у світі з'являється безліч можливостей модернізувати традиційні технологічні процеси завдяки розробці та впровадженню нововведень у галузях цифрової сфери. На даний момент в енергопостачанні існує проблема технологічного обмеження в електричній мережі під час споживання пікової потужності, котра негативно впливає і відразу позначається на всіх споживачах електроенергії. Наразі українська енергетична галузь перебуває у процесі «енергетичного переходу», пов'язаного з розвитком концепції інформаційних систем, цифровізацією процесів виробництва, розподілу та споживання енергії під назвою Smart Grid (розумних електроенергетичних мереж). Smart Grid є складною енергосистемою, що об'єднує постачальників електроенергії, енергооб'єкти та споживачів в єдину «інтелектуальну» енергомережу. Вона передбачає використання нових цифрових технологій, багатотарифних лічильників та приладів розподілу електроенергії, що забезпечують надійність та прозорість процесів виробництва, передачі, розподілу та споживання енергії.

Ключову роль у реалізації концепції Smart Grid відіграють організаційні та технологічні аспекти. Організаційна складність пов'язана з інтересами великої кількості різних зацікавлених сторін та їх цілями, тоді як технологічна складність передбачає виробництво компонентів, технічну реалізацію мереж, надійність, безпеку та конфіденційність. Недостатність стандартизованих механізмів стимулювання інвестицій у програми підвищення якості електроенергії, а також перспективи розвитку привертають підвищену увагу до результатів застосування технології Smart Grid.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Поняття Smart Grid офіційно запроваджено ще у 2003 році, після публікації статті М. Берра під назвою «Попит надійності керуватиме інвестиціями» [1]. Майкл Берр виділив переважні ефекти розвитку Smart Grid, такі як: поєднання енергосистеми з системами комунікацій для формування комплексної інформаційно-взаємної системи в online форматі, створення широкого спектра перетворень у системі обліку, оптимізацію ресурсного сектора, зростання економічної та якісної ефективності енергоспоживання.

Світовій енергетичній сфері притаманними є перебудова та розширення мережевих структур на основі нових «інтелектуальних» технологій – Smart Grid, Smart Metering, систем управління попитом (DR) та пристроїв зберігання енергії (ESD), а також інших технологічних інструментів, що підвищують гнучкість енергосистеми [2].

Дослідження концепції Smart Grid є перспективним вектором наукових пошуків. Аналіз літературних джерел свідчить про те, що концепція Smart Grid усе більше цікавить вітчизняну науку як з погляду інноваційного прориву, так і на тлі енергетичного тероризму з боку російського агресора. Питанням впровадження Smart Grid в енергетичній сфері присвятили праці вітчизняні вчені: І. В. Блінов, С. А. Бондаренко [3], В. П. Горбулін [4], С. П. Денисюк [5; 6], В. В. Каплун [7], О. В. Кириленко [4], М. М. Кулик [4], В. Е. Лір, Д. І. Олійник [8] та ін.

Саме розвиток інтелектуальних Smart Grid технологій в електричних мережах, оснащення споживачів інтелектуальним обліком дозволить реалізувати право, передбачене Законом України «Про ринок електричної енергії» [9], на управління своїм попитом і впливу на власні рахунки за спожиту електричну енергію [3, с. 107].

Основна особливість формування Smart Grid полягає у створенні інтегрованої системи, що має єдину мережеву інфраструктуру, яка технологічно та інформаційно пов'язує всі джерела енергії і всіх споживачів [4, с. 8-9]. Так, Д. І. Олійник [8] вивчає міжнародний досвід високотехнологічного економічного розвитку формування Smart Grid на основі впровадження глобальних відкритих стандартів функціональної сумісності та параметрів якості електроенергії.

С. П. Денисюк [2] аналізує особливості реалізації політики підвищення інтелектуального рівня електроенергетичних систем на основі передових світових практик. Технологічна складова частина досліджуваного питання розкрита у роботі [5], де авторами наводиться перелік систем та допоміжних підсистем функціонування Smart Grid. Низка авторів [4; 6; 7; 10; 11] звертають увагу на можливості оптимізації Smart Grid на різних технологічних рівнях: макро-, мезо-, мікро- та нано-.

Проте, незважаючи на пошук інтересу до цієї проблеми, безліч аспектів застосування Smart Grid залишається недостатньо дослідженими та потребують подальшого опрацювання.

**Постановка завдання.** Мета статті – обґрунтувати концепцію застосування Smart Grid з погляду технологічних, організаційних і економічних аспектів розвитку в енергетичній сфері, окреслити особливості їх використання в сучасних умовах та на перспективу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Енергетична система країни виконує такі функції: генерація електрики; передача електричної енергії на відстань; розподіл електричної енергії.

Поштовхом до активного розвитку концепцій Smart Grid постала низка викликів, що назріли в енергетичній галузі, а саме:

- початок масштабного застосування генеруючих установок на основі відновлюваних джерел енергії (енергія вітру, сонця, геотермальних вод, гідроресурсів), яким властива мінливість вироблення електроенергії як за часом (доба), так і за потужністю;

- нестійкий графік генерації ускладнив регулювання вироблення потужності відповідно до графіку навантажень споживачів. Це призвело до зниження ефективності роботи існуючих традиційних електричних станцій, яким необхідно часто перебувати в резерві для енергосистеми;

- вагомий внесок зробило обмеження потенціалу підвищення ефективності існуючої технологічної бази енергетики, яка практично досягла піку можливості підвищення продуктивності обладнання;

- введення в роботу малих установок розподіленої генерації з збоку споживачів (домогосподарства, малий бізнес) змушує змінювати роботу електричних мереж, напрям руху електроенергії від виробників до споживачів та навпаки;

- диверсифікація джерел генерування електроенергії зумовлює потребу у встановленні нових інтелектуальних пристроїв обліку потужності з боку споживачів (smart-лічильники) з двосторонньою дією та інноваційними засобами комунікації;

- широке впровадження smart-лічильників електричної енергії відкриває нові можливості регулювання навантажень шляхом залучення до цього кінцевих споживачів, що вимагає інтенсивного розвитку ІТ-платформ взаємодії енергосистеми зі споживачем.

Визначення концепції Smart Grid відображено в табл. 1.

Smart Grid поєднує в собі переваги інформаційних технологій та передових комунікацій для доставки інформації в режимі реального часу та забезпечення майже миттєвого балансу попиту та пропозиції в електричній мережі. Інакше кажучи, Smart Grid є автоматизованою системою, елементами якої є електричні мережі, виробники електроенергії та споживачі. Ця система дозволяє в режимі реального часу відстежувати та контролювати режими роботи всіх учасників процесу.

Впровадження інтелектуальних технологій дозволить зменшити вартість електроенергії, покращити якість та надійність електропостачання, скоротити втрати в електричних мережах, створювати достатній резерв потужності для кінцевих користувачів.

Суть електроенергетичної системи, побудованої на принципах Smart Grid, полягає в тому, що вона передає не тільки енергію, а й інформацію, яка так чи інакше зачіпає інтереси споживача. Для споживача, оснащеного персональним комп'ютером або смартфоном, підключеними до інтернету, зручність полягає в тому, що, окрім електроенергії, він отримує додатково низку можливостей щодо взаємодії з обслуговуючою енергетичною компанією, зокрема, більш гнучкий вибір тарифів, планування свого енергоспоживання і, як наслідок, зниження витрат.

Таблиця 1

Технологічні та економічні визначення концепції Smart Grid

Визначення Smart Grid	Джерело
Smart Grid – це електрична мережа, що містить різноманітні оперативні та енергоощадні заходи, включаючи розумні лічильники, розумних споживачів, поновлювані джерела енергії та ресурси забезпечення енергоефективності. Електронне керування параметрами електроенергії, керування її виробництвом і розподілом є важливими аспектами розумної енергосистеми.	[12]
Smart Grid – це електричні мережі, що задовольняють вимоги щодо енергоефективного і економічного функціонування енергосистеми за рахунок скоординованого управління, за допомогою сучасних двосторонніх комунікацій між елементами електричних мереж, електричними станціями, акумулюючими джерелами та споживачами.	[13]
Smart Grid – це сукупність організаційних змін, нова модель процесів, рішень у галузі інформаційних технологій, у галузі автоматизованих систем управління технологічними процесами та диспетчерського управління.	[14]
Smart Grid – це модернізована мережа, яка забезпечує двонаправлені потоки енергії та використовує можливості двостороннього зв'язку та управління, що створює умови для появи нових функцій та додатків. На відміну від сьогоденної мережі, яка в основному постачає електроенергію одностороннім потоком від генератора до розетки споживача, інтелектуальна мережа дозволить забезпечити двосторонній потік як електроенергії, так і інформації.	[15]
Smart Grid – це електроенергетична система, яка використовує технології обміну інформацією та управління, розподілені обчислення та пов'язані з ними датчики та виконавчі механізми для таких цілей, як: – інтеграція користувачів мережі та інших зацікавлених сторін; – забезпечення ефективних, стійких, економічних та безпечних поставок електроенергії.	[16]
Smart Grid – це система доставки електроенергії від генерування енергії до споживачів, котра інтегрована з комунікаційними та інформаційними технологіями, що забезпечує покращену прозорість функціонування енергосистеми, якісне обслуговування замовників та надає екологічні переваги поряд з традиційними.	[17]
Smart Grid – це інтелектуальна енергосистема, котра є концепцією повністю інтегрованої, саморегулюючої та самовідновлюваної електроенергетичної системи, що має мережну топологію і пов'язує всі генеруючі джерела (включаючи альтернативні), магістральні та розподільні мережі, усі види споживачів електричної енергії, які керовані пристроями та відповідними системами у режимі реального часу.	[18]
Smart Grid – це електрична мережа, яка може інтелектуально інтегрувати дії всіх підключених до неї користувачів – генераторів, споживачів і тих, хто робить і те, і інше – для ефективного забезпечення стабільного, економічного та безпечного постачання електроенергії.	[19]
Smart Grid – це сучасна цифрова двостороння система подачі енергії, здатна до самовідновлення, адаптивності та стійкості з передбаченням для прогнозування за різних сценаріїв невизначеностей. Вона оснащена для забезпечення сумісності з існуючими та майбутніми стандартами компонентами, пристроями та системами, які стійкі до кібератак.	[20]
Smart Grid відноситься до комп'ютерних технологій дистанційного керування та автоматизації, які дозволяють підвищити ефективність використання енергії для споживачів. Smart Grid базується на технології цифрового управління, моніторинг та телекомунікації для забезпечення двонаправленого потоку енергії та інформації різним зацікавленим сторонам в енергетичному ланцюжку, включаючи електростанцію, комерційних, промислових користувачів та домогосподарства.	[21]
Smart Grid – це розумна електрична/енергетична мережа, інтелектуальна мережа, мережа майбутнього, міжмережа або внутрішня енергетична мережа, є вдосконаленням енергетичної мережі ХХ-го століття. Традиційні електромережі зазвичай використовуються для передачі електроенергії від кількох центральних генераторів до великої кількості користувачів або клієнтів. На відміну від цього, Smart Grid використовує двосторонні потоки електроенергії та інформації для створення автоматизованої та розподіленої вдосконаленої мережі доставки енергії.	[22]
Smart Grid – це інтелектуальна мережа, здатна зберігати, спілкуватися та приймати рішення.	[12]
Smart Grid перетворює поточну мережу на таку, яка функціонує більш спільно та органічно.	[23]
Термін «Smart Grid» визначає мережу, що самовідновлюється, котра оснащена методами динамічної оптимізації, які використовують вимірювання в реальному часі для мінімізації втрат у мережі, підтримки рівня напруги, підвищення надійності та покращення управління активами. Оперативні дані, зібрані розумною мережею та її підсистеми дозволять системним операторам швидко визначати найкращу стратегію захисту від атак, уразливостей і т. д., спричинених різними непередбаченими обставинами.	[24]

*Джерело: побудовано автором на основі вказаних джерел*

Отже, Smart Grid – це модернізовані мережі електропостачання, які використовують інформаційні, комунікаційні мережі та технології для збору інформації про енерговиробництво та

енергоспоживання, що дозволяє автоматично підвищувати ефективність, надійність, економічний зиск, а також стійкість виробництва та розподілення електроенергії між виробниками і споживачами.

Визначення Smart Grid на законодавчому рівні відбулося в США у 2007 році. Прийнятий Закон врегулював розвиток енергетики США і відобразив такі заходи [25]:

1. Необхідність використання Smart Grid з метою підвищення надійності та ефективності генерації електроенергії.

2. Впровадження «розумних» технологій для обліку вимірювань, що проводяться, і можливості комунікації про процеси в енергетичній мережі.

3. Оптимізація проведених операцій та споживання ресурсів із забезпеченням повної інформаційної безпеки.

4. Надання клієнтам інформації про обсяги споживання ресурсів у режимі реального часу.

5. Можливість безперервного керування балансом попиту та пропозиції електроенергії.

Цілями створення інтелектуальної мережі є такі:

– збільшення використання цифрових технологій і контролю для забезпечення надійності, безпеки та ефективності електричної мережі;

– динамічна оптимізація операцій у мережі із забезпеченням повної інформаційної захищеності;

– розвиток та інтеграція розподіленої генерації, що передбачає й відновлювані джерела енергії;

– керування попитом, що зумовлює підвищення енергоефективності споживачів;

– використання інтелектуальних технологій для моніторингу стану енергетичної мережі та управління нею;

– інтеграція «розумних» приладів обліку та пристроїв споживача;

– розгортання та інтеграція технологій зберігання електроенергії та зняття піків навантаження;

– надання споживачам своєчасної інформації та можливостей управління;

– розробка стандартів взаємодії «розумних» приладів та обладнання, підключеного до мережі, включаючи інфраструктуру управління мережею (Plug&Play);

– ідентифікація та зниження нерозумних та зайвих бар'єрів, що перешкоджають розвитку технологій, практик та послуг у галузі Smart Grid.

Ідея інтелектуалізації електроенергетики полягає у формуванні цифрового електромережевого комплексу, створенні єдиної технічної та інформаційної інфраструктури виробників та споживачів. Інтелектуальна енергосистема забезпечує двосторонній обмін інформацією між енергосистемою та споживачем:

1) надає споживачам кращий вибір постачальників електроенергії, а інформація, що генерується мережею, робить можливим участь споживачів в оптимізації роботи системи. Smart Grid дозволяє управляти попитом та реагувати на попит шляхом включення інтелектуальних приладів, інтелектуальних лічильників, мікрогенерації електроенергії, збереження і накопичення електроенергії, корекції споживчих навантажень, надання споживачам інформації про обсяги споживання електроенергії та розміри тарифів. Споживачі отримують інформацію та стимули для перегляду структури їх споживання з метою нівелювання поточних обмежень у роботі енергосистеми та підвищення ефективності;

2) дозволяє підключати та експлуатувати електрогенератори різних технологій та потужностей, а також пристосування для зберігання та переривчастої генерації, тим самим значно знижує вплив усієї системи електропостачання на навколишнє середовище. Дає можливість мікрогенераторам працювати за принципом «включай та працюй», що підвищує гнучкість електромереж;

3) оптимізує та ефективно управляє активами за допомогою оперативної системи доставки (працює автономно, регулює потужність) відповідно до потреб;

4) стабільно працює в умовах кібератак, стихійних лих та надає електроенергію споживачам з підвищеним рівнем безпеки та надійності;

5) відкриває доступ до нових ринків шляхом збільшення сукупної пропозиції, шляхів передачі, допоміжних послуг та ініціатив. Зростає роль споживачів у ланцюжку постачання енергії, вони перетворюються з чистих споживачів електроенергії на часткових споживачів та часткових виробників.

Технологічні рішення Smart Grid можна поділити на такі основні напрямки:

– вимірювальні прилади та пристрої, включаючи насамперед інтелектуальні лічильники та інтелектуальні датчики;

– покращені методи управління;

– передові технології та компоненти електричної мережі: гнучкі системи передачі змінного струму, надпровідні кабелі, напівпровідники, силова електроніка, накопичувачі;

– інтегровані інтерфейси та методи підтримки прийняття рішень;

– інтегровані засоби зв'язку.

Реалізація національних стратегій розвитку технологій Smart Grid та інтелектуального обліку в різних країнах світу має низку ключових цілей. Для енергетичних компаній ключовими цілями розвитку технологій Smart Grid є:

- зниження втрат енергії;
- підвищення своєчасності та повноти оплати спожитих енергоресурсів;
- керування нерівномірністю графіків електричних навантажень;
- підвищення ефективності управління активами енергетичних компаній;
- підвищення якості інтеграції об'єктів відновлюваної та розподіленої генерації до енергосистеми;

- підвищення надійності енергосистеми у разі виникнення аварійних ситуацій;
- підвищення візуалізації роботи об'єктів енергетичної інфраструктури.

Ключовими завданнями при впровадженні технологій Smart Grid є:

- покращення доступу споживачів до енергетичної інфраструктури;
- підвищення надійності електропостачання всіх категорій споживачів;
- підвищення якості енергоресурсів;
- створення сучасного інтерфейсу взаємодії споживачів енергії та її постачальників;
- можливість для споживача бути повноправним учасником енергетичного ринку;
- розширені можливості споживачів щодо управління енергоспоживанням та зниження рівня оплати за спожиті енергоресурси.

Регулюючі органи у сфері енергетики прагнуть досягти наступних цілей за рахунок розвитку технологій Smart Grid:

- підвищення рівня задоволеності споживачів енергії за якістю та вартістю енергопостачання;
- забезпечення стабільного економічного стану підприємств енергетики;
- забезпечення модернізації основних фондів енергетики без значного підвищення тарифів.

У рамках концепції Smart Grid для досягнення максимального ефекту від їх застосування виділяють такі унікальні функціональні властивості:

- самовідновлення в екстрених ситуаціях. Для забезпечення надійного та якісного енергопостачання необхідно підтримувати належний технічний стан усіх елементів енергосистеми на певному рівні, зосереджуючи увагу на керування превентивним аварійним відновленням [26].

У рамках енергосистеми, що самовідновлюється, передбачається, що максимально можливі аварійно-технічні відмови устаткування траплятимуться досить рідко за рахунок збору даних та інтелектуальних пристроїв, що реалізують спеціальні методи та алгоритми прийняття рішень. Отримані з пристроїв показники дозволять забезпечити проведення повної діагностики стану устаткування, оцінити ймовірність відмови або аварії, спрогнозувати можливі збої у роботі, сформулювати алгоритм необхідних дій персоналу за різних сценаріїв [27].

Отже, Smart Grid забезпечує інтеграцію різних пристроїв електроенергетики для досягнення стабільності усієї галузі та підтримки надійності всього енергетичного обладнання;

- моделювання процесів активної споживчої поведінки. В енергосистемі на основі Smart Grid з'являється можливість створювати умови, за яких кінцевий користувач може регулювати обсяг купівлі електроенергії в залежності від вартості електроенергії та обсягів постачання в певний період часу. Ця властивість енергосистеми в основному спрямована на згладжування піків енергоспоживання, що призведе до мінімізації витрат енергокомпаній на експлуатаційні витрати, зокрема використання неефективних енергоблоків з високою питомою витратою палива [24; 28].

Проблему пікового споживання електроенергії можна регулювати за допомогою онлайн-додатків, які надають комунальні підприємства або постачальники енергії. За їх допомогою споживачі можуть контролювати власне споживання енергії. Крім того, споживачі із власними джерелами генерації зможуть діяти як продавці, продаючи надлишки електроенергії кінцевим споживачам [28];

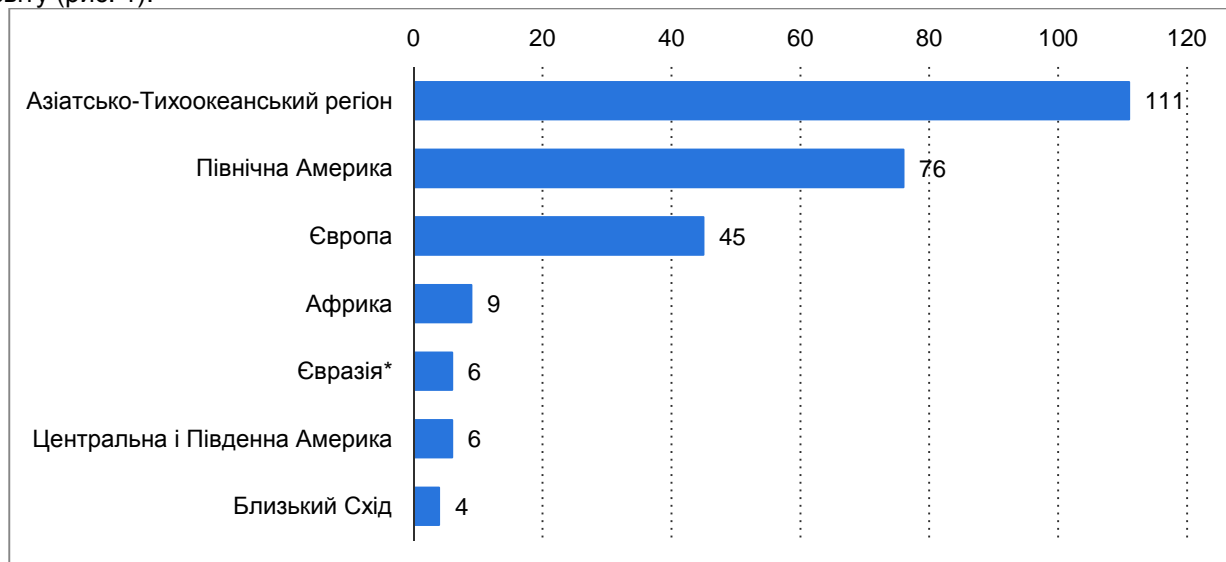
- стійкість до негативних впливів. Ця властивість передбачає наявність спеціальних методів забезпечення стабільності та гнучкості всіх елементів енергосистеми, завчасного попередження та запобігання аваріям, відновлення системи відповідно до вимог енергетичної безпеки. Для забезпечення стійкості будуть використовуватися такі пристрої, як автоматичні вимикачі, інтелектуальні системи моніторингу стану обладнання, які адаптуватимуться до умов мінливого навколишнього середовища, і відображатимуть зовнішні загрози. Таким чином, система енергопостачання на основі Smart Grid допоможе стримувати, запобігати та виявляти шкідливі впливи на енергетичну мережу та інші елементи [29];

- розширення ринку електроенергії та потужності для кінцевого споживача. Вільний доступ до ринків електроенергії, потужності окремих споживачів, які мають власне джерело генерації за рахунок збільшення потужності електричних мереж, а також розвиток розподіленої енергетики сприятиме поширенню конкурентного середовища на ринках та оптимізації роботи електроенергетичних компаній [24];

- оптимізація управління активами. Використання інформації, одержаної з обладнання та датчиків, а також баз даних компанії, дозволить оптимізувати режими роботи енергосистеми; покращити роботу обладнання, що суттєво вплине на зниження технологічних, організаційних і економічних витрат [24; 30].

Технологія Smart Grid отримала розвиток у країнах Європи, США, Китаї, Кореї та інших технологічно розвинених країнах [31]. Існує значна кількість пілотних проєктів, де спільне використання технологій «розумних ліфтів», «розумних будинків», «розумних лічильників», використання вітрової, а також сонячної енергії у спільному використанні з «розумними будинками» дає споживачеві значний зиск при оплаті послуг за рахунок енергопостачання. Електропостачальні організації також отримують позитивний ефект з допомогою згладжування графіка пікових навантажень і зниження втрат електроенергії.

Розвиток Smart Grid характеризують інвестиції, котрі були вкладені в їх розвиток за регіонами світу (рис. 1).



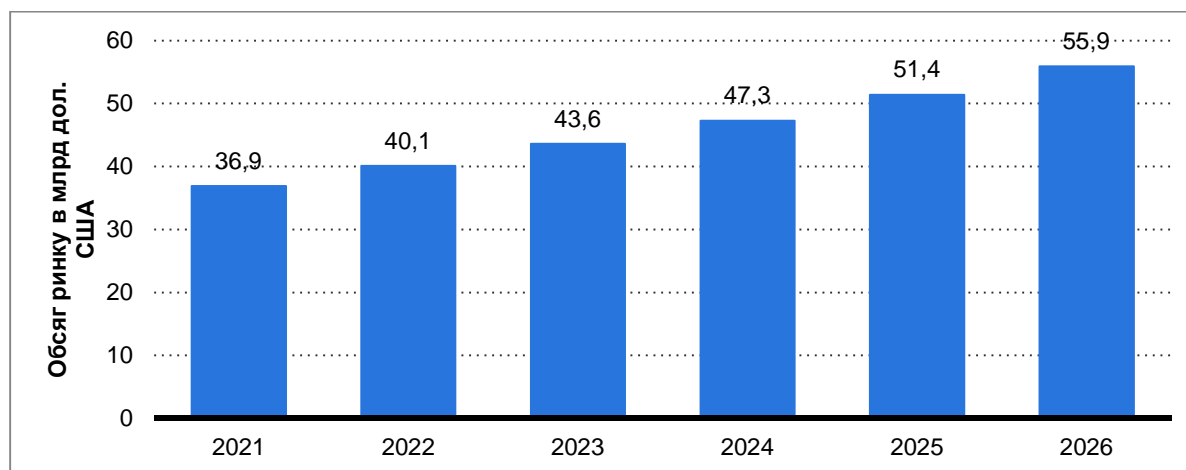
**Рис. 1. Інвестиції в Smart Grid у світі в 2020 році, за регіонами, млрд дол. США**

\* країни Центральної Азії та Кавказу

Джерело: [32]

Так, у 2020 році інвестиції в електромережі по всьому світу перевищили 250 млрд дол. США, лише на Азіатсько-Тихоокеанський регіон припало понад 43 % інвестицій у цей сектор. Далі йде Північна Америка з інвестиціями в 76 млрд дол. Тим часом інвестиції в Євразію та Близький Схід разом становили близько 10 млрд дол.

Про розвиток світового ринку технологій Smart Grid інформує рис. 2.



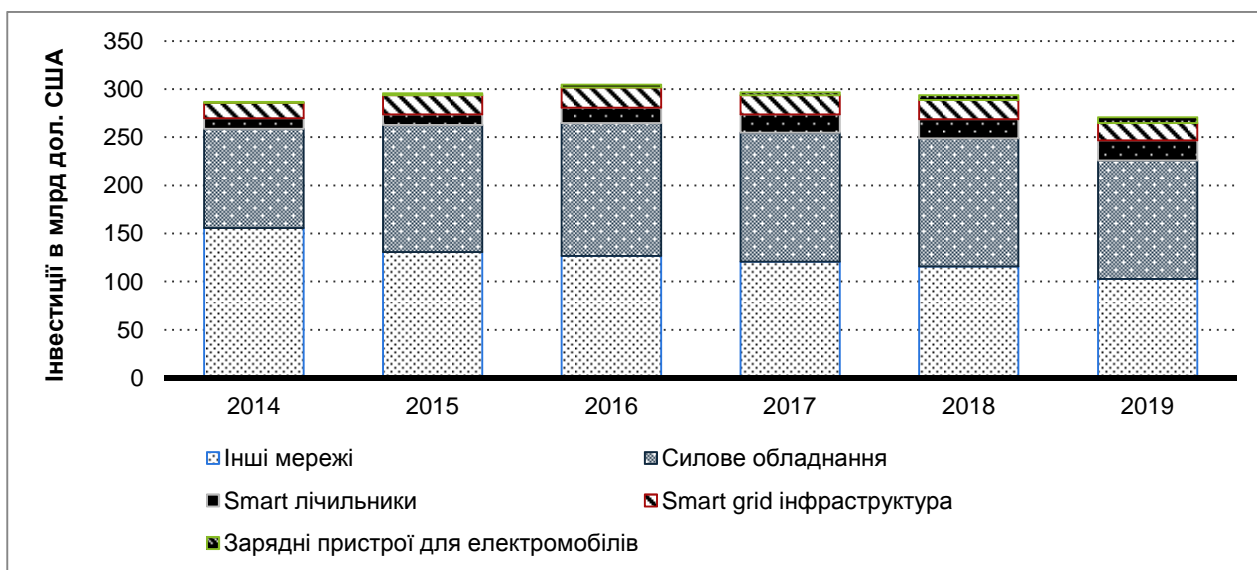
**Рис. 2. Обсяг світового ринку технологій Smart Grid впродовж 2021–2026 рр., млрд дол. США**

Джерело: [32]

Згідно прогнозних даних, протягом 2021–2026 років буде спостерігатися зростання обсягу світового ринку технологій Smart Grid, відповідно з 36,9 до 55,9 млрд дол. США.

Щорічні інвестиції в Smart Grid у світі протягом 2014–2019 рр. відображено на рис. 3.

Можна очікувати, що інвестиції в Smart Grid будуть зростати в майбутньому, оскільки це важлива складова боротьби зі зміною клімату та покращення стійкості та ефективності енергетичного сектору.



**Рис. 3. Щорічні інвестиції в Smart Grid у світі впродовж 2014–2019 рр. за технологічними сферами, млрд дол. США**

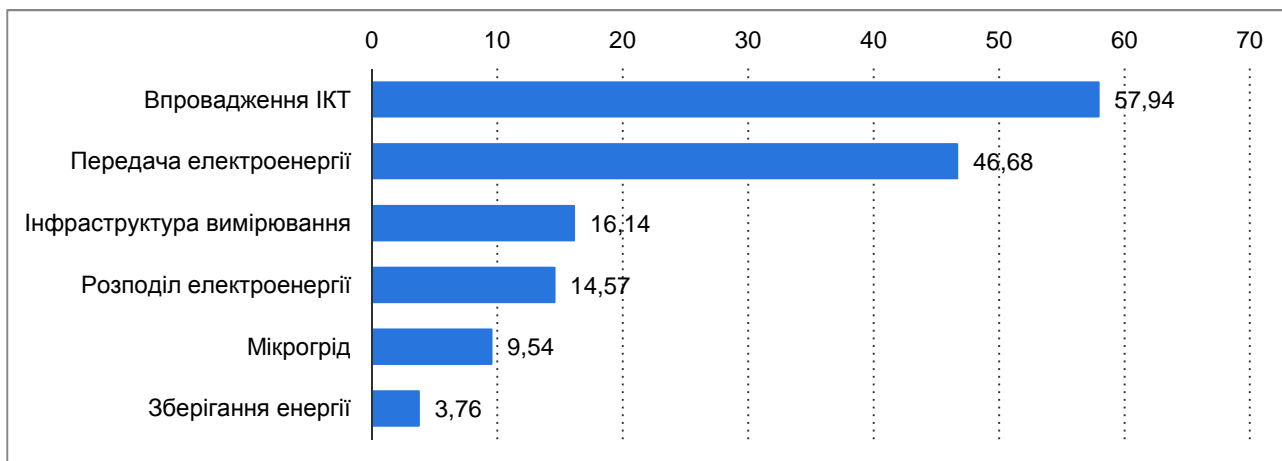
Джерело: [32]

Інвестиції в Smart Grid – це інвестиції в сучасні технології та інфраструктуру, які дозволяють забезпечувати стабільний та ефективний рух електроенергії між виробниками та споживачами. Ці інвестиції можуть включати в себе наступні елементи:

- встановлення Smart лічильників електроенергії, які дозволяють споживачам бачити свій споживання електроенергії та керувати ним для зменшення витрат;
- розвиток систем моніторингу та керування електромережами, які дозволяють підтримувати стабільну роботу мережі та запобігати перебоєм в постачанні електроенергії;
- впровадження технологій зберігання електроенергії, таких як батареї, що дозволяють забезпечити електроенергією споживачів у ті години, коли виробництва електроенергії не вистачає для задоволення потреб споживачів.
- розвиток мереж зарядних станцій для електромобілів, що дозволяє споживачам заряджати свої транспортні засоби та робити перехід до електричного транспорту більш доступним та зручним.

Зростання інвестицій в Smart Grid є важливим для забезпечення стійкого та ефективного енергетичного сектору, що дозволяє покращити якість життя населення, зменшити викиди в атмосферу та сприяти розвитку нових технологій та інновацій.

У 2020 році внаслідок зростання інвестицій та посиленого розвитку технологій відбулося збільшення доходу в енергетичній сфері. Це відображає загальне зростання інтересу до технологій Smart Grid, що дає можливість електричним компаніям краще керувати енергосистемами та забезпечувати стабільність енергопостачання (рис. 4).



**Рис. 4. Дохід світового ринку постачання та управління електроенергією у 2020 році за сегментами, млрд доларів США**

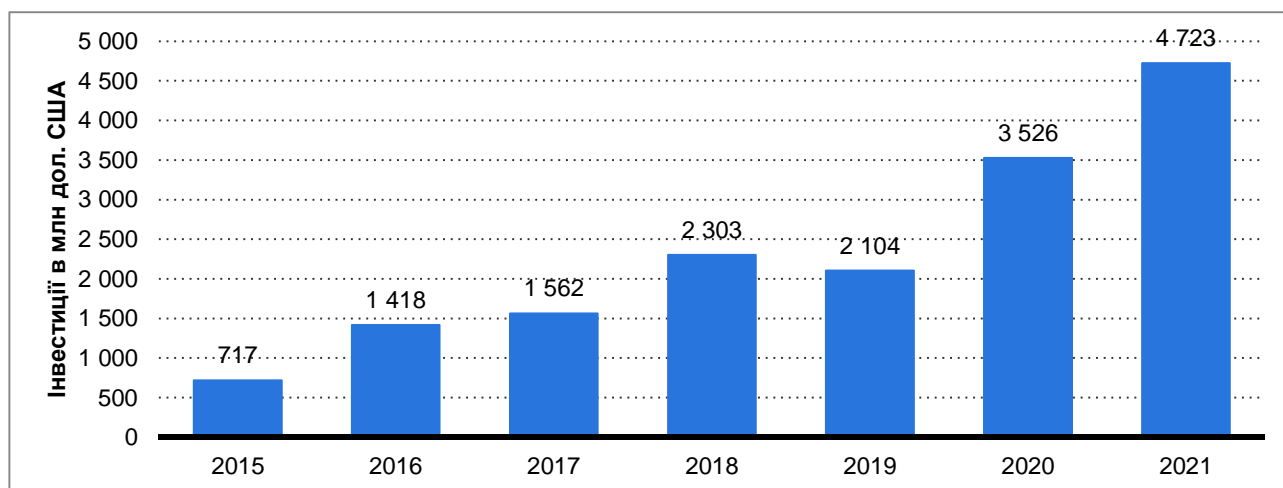
Джерело: [32]

Згідно даних рис. 4, найбільш прибутковими секторами світового ринку постачання та управління електроенергією у 2020 році були: технології з упровадження інформаційно-комп'ютерних технологій в енергетичних мережах (57,9 млрд дол. США); безпосередньо розвиток технологій передавання електроенергії (46,6 млрд дол. США).

Інвестиції в Smart Grid є важливим елементом розвитку сучасної енергетики, оскільки вони дозволяють оптимізувати виробництво та споживання електроенергії. Серед головних причин, які підштовхують до інвестування в Smart Grid, можна виділити такі:

- забезпечення стійкості енергетичної системи: розумні електромережі дозволяють підтримувати баланс між виробництвом та споживанням електроенергії, що робить систему менш вразливою до збоїв та аварій;
- підвищення ефективності: Smart Grid дозволяють підвищити ефективність виробництва та розподілу електроенергії, що знижує витрати на її виробництво та споживання;
- розвиток відновлюваної енергетики: Smart Grid сприяють розвитку автономних джерел електроживлення.

Автономне джерело живлення – це джерело електричної енергії, яке потрібне для роботи схем та пристроїв, не пов'язаних з лініями електропередавання. Розвиток автономних джерел електроживлення є важливим елементом розвитку сучасної енергетики, оскільки вони дозволяють забезпечувати споживачів електроенергією в умовах відсутності підключення до централізованої електричної мережі. До автономних джерел електроживлення можна віднести: сонячні панелі, вітрові турбіни, генератори на біопаливі, газі та дизельному пальному. Інвестиції в автономні джерела електроживлення у світі протягом 2015–2021 рр. відображено на рис. 5.



**Рис. 5. Інвестиції в автономні джерела електроживлення у світі впродовж 2015–2021 рр., млн дол. США**

Джерело: [32]

Інвестиції в автономні джерела електроживлення протягом 2015–2021 рр. зросли відповідно з 717 млн дол. США до 4723 млн дол. США, або у 6,5 рази, однак це все відбувалося нерівномірно. Найбільш істотний приріст спостерігався упродовж 2015–2016 років (701 млн дол. США), 2017–2018 років (741 млн дол. США), 2019–2020 років (1422 млн дол. США) та 2020–2021 років (1197 млн дол. США). Це свідчить про зростання інтересу інвесторів до автономних джерел електроживлення та перспективи розвитку енергетики на перспективу.

Розвиток автономних джерел електроживлення сприяє зниженню витрат на енергоспоживання та покращенню стійкості енергетичної системи, тому цей напрямок розвитку енергетики має великий потенціал в майбутньому.

Прогнозуючи розвиток електроенергетики, Департамент енергетики США сформулював таке бачення Smart Grid у майбутньому: «Мережа 2030 – повністю автоматизована розподільча мережа, що забезпечує паралельний потік електрики та інформації від електростанції до споживачів, включаючи всі проміжні точки» [33]. Таким чином, розподільна мережа майбутнього – це інтелектуальна мережа, яка поєднує в собі комплексні інструменти контролю та моніторингу, інформаційні технології та засоби комунікації, що забезпечують значно більш високу продуктивність енергомережі та дозволяють генеруючим, збутовим та комунальним компаніям надавати населенню енергію високої якості.

Технічні засоби Smart Grid відіграють вирішальну роль в реалізації цієї технології на практиці. Технічні засоби можна розділити на такі основні групи [34; 35]:



1. Пристрої регулювання (компенсації) реактивної потужності та напруги, що підключаються до мереж паралельно;
2. Пристрої регулювання параметрів мережі (опір мережі), що підключаються до мережі послідовно;
3. Пристрої, що поєднують функції перших двох груп, – пристрої поздовжньо-поперечного включення;
4. Пристрої обмеження струму короткого замикання;
5. Накопичувачі електричної енергії;
6. Перетворювачі струму (змінний струм у постійний та постійний струм у змінний);
7. Кабельні лінії електропередачі постійного та змінного струму на базі високотемпературних надпровідників;
8. Інформаційні технології;
9. Програмні засоби.

Перші чотири групи пристроїв відносять до технології FACTS, що передає певну сукупність пристроїв, які встановлюються в електричній мережі та призначені для стабілізації напруги, підвищення керованості, оптимізації поточкорозподілу, зниження втрат, демпфування низькочастотних коливань, підвищення статичної та динамічної стійкості, а в результаті – підвищення пропускної спроможності мережі та зниження втрат. Істотну роль у всьому різноманітті пристроїв FACTS відіграє силова електроніка на основі різних модифікацій перетворювачів напруги, що використовують керовані напівпровідникові вентиля [36; 37]. Тобто, FACTS є пристроями є базового елементу архітектури Smart Grid, що визначає її функціональні можливості.

Для розвитку існуючої електроенергетичної системи та її функціонування на більш якісному рівні доцільним є впровадження інформаційно-комунікаційних технологій у сфері постачання електроенергії та моніторингу електричної мережі. Нова модернізована електроенергетична система повинна задовольняти вимогам щодо енергоефективного та більш економічного функціонування за рахунок скоординованого управління. Також за допомогою комунікацій повинна відбуватися взаємодія між електростанціями, компаніями, що займаються транспортуванням і розподілом електроенергії, та споживачами [38, с. 87-88].

Можливий підхід до розвитку концепції Smart Grid в Україні має враховувати такі положення:

– проблема розвитку вітчизняної електроенергетики виходить за межі галузевої програми та розглядається як національна інноваційна програма у взаємодії з іншими національними проектами та програмами;

– основна стратегічна мета розвитку галузі – принципова, якісна зміна та розвиток інтелектуально-технологічного потенціалу вітчизняної електроенергетики, що відповідає світовим тенденціям соціального та технологічного розвитку;

– технологічна платформа на базі концепції Smart Grid як елемент інноваційної інфраструктури, котрий має забезпечити формування довгострокового вектора розвитку, пов'язати наукові дослідження та розробки, бізнес-проекти, суспільні та державні інтереси;

– ідеологія та концептуальна основа Smart Grid повинні забезпечити наступність розвитку електроенергетики та визначатися рівнем наявного організаційно-економічного, технологічного та ресурсного (у широкому розумінні) потенціалу та досяжності.

Враховуючи наслідки ракетних обстрілів енергетичних об'єктів в Україні та їх катастрофічну руйнацію, слід активно впроваджувати малі автономні джерела генерації електроенергії (генератори, СЕС, ВЕС).

Енергетична система нового типу відрізнятиметься більшим ступенем інтелектуальності та взаємозв'язком між елементами в режимі реального часу, а також пріоритетом на чисті та стійкі технології [39]. Традиційні учасники, крім виконання традиційних функцій, будуть змушені пропонувати споживачам додаткову цінність:

– власники Smart Grid розширюють функціональне поле діяльності і впроваджують технології, що дають змогу гнучко задіяти свої активи (наприклад, перенаправляти потоки електричної енергії у разі виникнення пікових навантажень чи аварії на певній ділянці);

– традиційні генератори, крім забезпечення базового навантаження, тепер звертають увагу на різні способи зниження піків і вирівнювання загального профілю споживання своїх клієнтів з метою оптимізації витрат.

У той же час система нового типу включає до свого складу:

– споживачів (які відіграють активну роль – «просьюмери», мають технічну можливість не тільки керувати власним споживанням, а й здійснювати видачу власних надлишків електричної енергії у загальну мережу);

– нових гравців;

– мікромережі (які одночасно взаємодіють із традиційними мережами та забезпечують їх заміну; енергоперехід та створення Smart Grid розпочалося у провідних країнах світу в суперечливих

умовах, оскільки енергокомпанії спочатку не підтримували розвиток відновлювальних та альтернативних джерел енергії, коли низка споживачів відключається від єдиної мережі);

– накопичувачі (дозволяють згладжувати профілі навантаження за рахунок заміщення вибору електроенергії з мережі на витрати раніше накопиченої електричної енергії);

– управління попитом (основною метою є зниження піків споживання в денний час);

– розподілені джерела генерації (знижують навантаження на традиційні генеруючі установки).

Важливим елементом концепції Smart Grid є хмарні обчислення Cloud Computing, які забезпечують віддалене сховище даних, автоматичні оновлення, скорочення витрат на обслуговування ІТ-систем за рахунок економії енергії, фінансових ресурсів та робочої сили. Перспективним напрямом є можливості інтеграції технологій блокчейн у Smart Grid. Блокчейн дозволить забезпечити стійку тенденцію до децентралізації, концепції якої мають кілька схожих найменувань, таких як «мікромережа» («micro-grid»), «енергетичний хаб» («energy hub»), «наномережа» («nanogrid»), «мезомережа» («mesogrid»), «енергетичний Інтернет» («energy Internet»), «комунальна енергомережа» («community energy network»), «соціальна енергомережа» («social energy network»), «однорангова енергомережа» («peer-to-peer (P2P) energy network») і «віртуальна електростанція» («virtual power plant (VPP)») [10; 11; 27; 31; 40; 41].

Електроенергетика переходить до ефективної, гнучкої та сталої системи на основі цифрової трансформації та інтелектуалізації найважливіших процесів [40]. Головними вимогами такого переходу є інтеграція інформаційних систем різних платформ та технологій, створення єдиного інформаційного простору, в межах якого системи управління отримують можливість своєчасно обмінюватись довіреними даними. Єдиний інформаційний простір виробників та споживачів формується на основі наскрізної передачі первинних оцифрованих технологічних даних, створення єдиної цифрової платформи взаємодії зі споживачами, впровадження інтелектуальних систем обліку електроенергії, створення нових сервісів клієнтів. Результатом таких змін має стати забезпечення можливості клієнта отримати дистанційно будь-яку послугу у сфері електропостачання у цифровому форматі.

Розвиток та впровадження цифрових технологій сприяють появі нових властивостей систем електропостачання. Основними є:

1) розумне управління попитом;

2) поява невеликих розподілених ресурсів електроенергії, у тому числі на основі відновлюваних джерел енергії;

3) використання інтелектуальної зарядки для електромобілів.

*Управління попитом (demand responds).* Це механізм, який дозволяє споживачам електроенергії реагувати на параметри системи для забезпечення надійного енергопостачання при мінімальних витратах. Цифрові технології обліку, управління та зв'язку дозволяють споживачеві безперервно контролювати використання енергії своїми приладами та обладнанням, передавати ці дані постачальнику електроенергії та отримувати від нього інформацію для оптимізації власного попиту відповідно до наявної в енергосистемі пропозиції. У години, коли електропостачання обмежено або мережі перевантажені, підключені пристрої, такі як інтелектуальні електричні обігрівачі та кондиціонери, промислові котли та інтелектуальні побутові прилади, можуть автоматично відключатися або працювати при нижчому навантаженні, причому робити це таким чином, щоб не впливати на комфорт та умови роботи споживача [20; 24; 41].

*Розвиток невеликих розподілених енергоресурсів (distributed generation)* дозволяє знижувати втрати при передачі та розподілі енергії, гнучкіше реагувати на зміну попиту, тобто підвищувати надійність енергопостачання. До розподілених (малих) джерел енергії відносять сукупність технологій, представлених мікроустановками, що дозволяють генерувати енергію поруч із місцем її споживання, наприклад, домашні сонячні фотоелектричні системи [11; 21; 27; 42]. Поширення цифрових технологій дає можливість споживачам мати власне виробництво та/або технології зберігання електроенергії, продавати та/або купувати її як у окремого продавця, так і в енергосистемі.

*Інтелектуальна зарядка для електромобілів (smart charging)* дає змогу підключеним електромобілям заряджатися відповідно до цінкових та/або інших керуючих сигналів в енергосистемі. Наприклад, споживати енергію, коли є виробництво дешевої електрики, або перебувати в режимі очікування, коли мережа перевантажена. Якщо є можливість спрямованої зарядки акумуляторної батареї, крім інтелектуальної зарядки, електромобілі можуть забезпечити більш високу гнучкість системи, шляхом продажу електроенергії оператору мережі або використовувати її для задоволення потреб у власному будинку (Vehicle-to-grid). Цей двосторонній обмін енергією дає низку економічних, екологічних та експлуатаційних переваг [35; 39; 43].

Отже, в умовах дедалі зростання кількості різномірних пристроїв, власників та операторів в Smart Grid їх координацію, а також автоматизацію торгівлі може допомогти вирішити технологія розподіленого реєстру (blockchain).

Таким чином, концепція Smart Grid передбачає 3 основних вектори розвитку електроенергетики:

1. Проектування та використання модернізованих, нових та проривних (критичних) технологій, що забезпечать ефективність та керованість електромережі, розробка та подальше застосування технологій моніторингу електромереж.

2. Розробка нових систем енергоменеджменту, а також принципів інформаційної взаємодії об'єктів енергетики, у тому числі інформаційної хмари, забезпечення їх захисту від кіберзлочинців.

3. Розробка принципів залучення індивідуальних та колективних споживачів до управління енергоспоживанням.

На основі цих трьох напрямків формуються організаційні, техніко-економічні, а також соціальні ефекти, що обґрунтовують необхідність розвитку Smart Grid.

**Висновки з проведеного дослідження.** Таким чином, Smart Grid – це модернізовані електричні мережі, в яких використовуються інноваційні комунікаційні технології для збирання інформації про виробництво та споживання енергії, що автоматично підвищує ефективність, надійність, економічну вигоду та стійкість виробництва та розподілу електроенергії.

Smart Grid – це термін, що означає інтелектуальну мережу, яка розширює за допомогою цифрових технологій розподільну та транспортну системи для оптимізації поточних операцій та відкриття нових ринків для альтернативної енергетики.

Smart Grid є системою, котра здатна здійснювати самомоніторинг та надавати звіти як про будь-якого учасника мережі (його стан, потреби тощо), так і повну інформацію про вироблену та передану електроенергію в будь-якому розрізі: ефективності, втрат чи економічної вигоди. Smart Grid також підвищує надійність мережі, забезпечуючи непомітне для споживача перемикавання на інше джерело у разі відмови основного. Оскільки надійність окремих мереж електропостачання вже досягає 99,97 %, впровадження Smart Grid здатне гарантувати безперебійне електропостачання в режимі 24/7. З погляду загальної економіки, Smart Grid сприяє появі нових ринків, гравців та послуг. Завдяки сучасним технологіям Smart Grid можна застосовувати як у масштабах підприємств, так і для звичайних домашніх електричних пристроїв, наприклад, холодильника або пральної машини. Відповідно, всі пристрої, що входять до складу Smart Grid, повинні бути оснащені технічними засобами, що здійснюють інформаційну взаємодію.

## Література

1. Burr M. Reliability demands drive automation investments. *Public Utilities Fortnightly. Technology Corridor department*. 2003. Nov. 1. URL: <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor> (дата звернення: 25.01.2023).

2. World Energy Issues Monitor 2017. Exposing the new energy realities, World Energy Council. URL: <https://www.worldenergy.org/publications/2017/world-energy-issuesmonitor-2017/> (дата звернення: 26.01.2023).

3. Бондаренко С. А., Зеркіна О. О. Smart Grid як основа інноваційних перетворень на ринку електричної енергії України в умовах євроінтеграційних процесів. *Бізнес Інформ*. 2019. № 4. С. 105-114.

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

5. Денисюк С. П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. № 1(35). С. 7-21.

6. Денисюк С. П., Соколовський П. В. Аналіз функціонування гнучкої генерації на етапі переходу до інтелектуальних мереж Smart Grid. *Електрифікація транспорту*. 2018. № 15. С. 31-42.

7. Каплун В. В., Козирський В. В. Smart Grid як інноваційна платформа розвитку електроенергетичних систем. *Праці Таєрійського державного агротехнологічного університету*. 2011. Вип. 11. Т. 4. С. 35-46.

8. Олійник Д. І. Міжнародний досвід високотехнологічного економічного розвитку на основі побудови SMART GRID. *Стратегічні пріоритети*. 2017. № 3. С. 87-96.

9. Про ринок електричної енергії : Закон України від 23.11.2018 р. № 2628-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (дата звернення: 24.01.2023).

10. Farhangi H. The path of the smart grid. *IEEE power and energy magazine*. 2009. № 8.1. P. 18-28.

11. Ruofei M. Smart grid communication: Its challenges and opportunities. *IEEE transactions on Smart Grid*. 2013. № 4.1. P. 36-46.

12. Розумна енергосистема. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B7%D1%83%D0%BC%D0%BD%D0%B0\\_%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B7%D1%83%D0%BC%D0%BD%D0%B0_%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0) (дата звернення: 25.01.2023).

13. The European Technology Platform Smart Grids. Smart grids: strategic deployment document for Europe's electricity networks of the future n.d. URL: [http://www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids\\_SDD\\_FINAL\\_APRIL2010.pdf](http://www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids_SDD_FINAL_APRIL2010.pdf) (дата звернення: 28.01.2023).
14. A systems view of the modern grid. NETL Modern Grid Initiative. URL: [https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/ASystemsViewoftheModernGrid\\_Final\\_v2\\_0.pdf](https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/ASystemsViewoftheModernGrid_Final_v2_0.pdf) (дата звернення: 28.01.2023).
15. Smart Grid Communications. The National Institute of Standards and Technology. URL: <https://www.nist.gov/programs-projects/smart-grid-communications-0> (дата звернення: 28.01.2023).
16. Smart energy and smart grids. International Electrotechnical Commission. URL: <https://www.iec.ch/energies/smart-energy> (дата звернення: 28.01.2023).
17. 2020 Smart Grid System Report. United States Department of Energy. URL: <https://www.energy.gov/oe/articles/2020-smart-grid-system-report> (дата звернення: 28.01.2023).
18. About IEEE Smart Grid. IEEE. URL: <https://smartgrid.ieee.org/about-ieee-smart-grid> (дата звернення: 28.01.2023).
19. Strategic Research Agenda for Europe's Electricity Networks of the Future. European Commission. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fe6d8afe-ed43-404a-b6c5-1c61da261cfc> (дата звернення: 30.01.2023).
20. Dileep G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*. 2020. Volume 146. P. 2589-2625.
21. Sorini A., Staroswiecki E. Cybersecurity for the Smart Grid. *The Power Grid*. 2017. № 3. P. 233-252.
22. Fang X. Smart grid – The new and improved power grid. A survey. *IEEE communications surveys & tutorials*. 2011. № 14.4. P. 944-980.
23. Litos Strategic Communication. The smart grid: an introduction. Washington D.C., 2008. URL: <https://www.litoss.com/the-smart-grid-an-introduction/> (дата звернення: 30.01.2023).
24. Momoh J. Smart grid: fundamentals of design and analysis. John Wiley & Sons, 2012. 233 p.
25. Energy Independence and Security. Act of 2007. URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/pdf/PLAW-110publ140.pdf> (дата звернення: 31.01.2023).
26. Hassan R., Radman Gh. Survey on smart grid. *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon)*. 2010. P. 210-213.
27. Bayindir R. Smart grid technologies and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016. № 66. P. 499-516.
28. Blumsack S., Fernandez A. Ready or not, here comes the smart grid! *Energy*. 2012. № 37.1. P. 61-68.
29. Metke A., Ekl R. Security technology for smart grid networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2010. № 1.1. P. 99-107.
30. Kabalci Y. A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. № 57. P. 302-318.
31. Sarker E. Progress on the demand side management in smart grid and optimization approaches. *International Journal of Energy Research*. 2021. № 45.1. P. 36-64.
32. Smart grids worldwide. Digital & Trends. Statista. URL: <https://www.statista.com/study/111848/smart-grids-worldwide/> (дата звернення: 02.02.2023).
33. United States Department of Energy. Storage Innovations 2030. URL: <https://www.energy.gov/oe/storage-innovations-2030> (дата звернення: 03.02.2023).
34. McLean A., Bulkeley H., Crang M. Negotiating the urban smart grid: Socio-technical experimentation in the city of Austin. *Urban Studies*. 2016. № 53.15. P. 3246-3263.
35. Butt O., Zulqarnain M., Butt T. Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021. № 12.1. P. 687-695.
36. Mierlo Van J. Beyond the state of the art of electric vehicles: A fact-based paper of the current and prospective electric vehicle technologies. *World Electric Vehicle Journal*. 2021. № 12.1. URL: <https://www.mdpi.com/2032-6653/12/1/20> (дата звернення: 03.02.2023).
37. Rohrig K. Powering the 21st century by wind energy – Options, facts, figures. *Applied Physics Reviews*. 2019. № 6.3. URL: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/74784709/1-libre.pdf?1637157412=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPowering\\_the\\_21st\\_century\\_by\\_wind\\_energy](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/74784709/1-libre.pdf?1637157412=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPowering_the_21st_century_by_wind_energy) (дата звернення: 03.02.2023).
38. Биконя О. С. Формування інтелектуальної енергосистеми України. *Економіка і прогнозування*. 2014. № 1. С. 87-96.
39. Nardelli P. Models for the modern power grid. *The European Physical Journal Special Topics*. 2014. № 223. P. 2423-2437.

40. Gomis-Bellmunt O. Steady-state impedance mapping in grids with power electronics: What is grid strength in modern power systems? *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. № 136. P. 107635:1-107635:10.
41. Tuballa M., Abundo M. A review of the development of Smart Grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. № 59. P. 710-725.
42. Khalilpour K., Vassallo A. Community energy networks with storage: modeling frameworks for distributed generation. Singapore: Springer, 2016. 191 p.
43. Sachan S., Deb S., Singh S. Different charging infrastructures along with smart charging strategies for electric vehicles. *Sustainable Cities and Society*. 2020. № 60. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670720302250?via%3Dihub> (дата звернення: 03.02.2023).

## References

1. Burr, M. (2003), Reliability demands drive automation investments. *Public Utilities Fortnightly. Technology Corridor department*, Nov. 1, available at: <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor> (access date January 25, 2023).
2. World Energy Issues Monitor 2017. Exposing the new energy realities, World Energy Council, available at: <https://www.worldenergy.org/publications/2017/world-energy-issuesmonitor-2017/> (access date January 26, 2023).
3. Bondarenko, S.A. and Zerkina, O.O. (2019), "Smart Grid as the basis of innovative transformations in the electric energy market of Ukraine in the context of European integration processes", *Biznes Inform*, no. 4, pp. 105-114.
4. Kulyk, M.M., Horbulin, V.P. and Kyrylenko, O.V. (2017), *Kontseptualni pidkhody do rozvytku enerhetyky Ukrainy (analytychni materialy)* [Conceptual approaches to the development of the energy industry of Ukraine (analytical materials)], Instytut zahalnoi enerhetyky NAN Ukrainy, Kyiv, Ukraine, 78 p.
5. Denysiuk, S.P. (2014), "Technological guidelines for the implementation of the Smart Grid concept in electric power systems", *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, no. 1(35), pp. 7-21.
6. Denysiuk, S.P. and Sokolovskyi, P.V. (2018), "Analysis of the operation of flexible generation at the stage of transition to Smart Grid intelligent networks", *Elektryfikatsiia transportu*, no. 15, pp. 31-42.
7. Kaplun, V.V. and Kozyrskyi, V.V. (2011), "Smart Grid as an innovative platform for the development of electric power systems", *Pratsi Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu*, Iss. 11, Vol. 4, pp. 35-46.
8. Oliinyk, D.I. (2017), "International experience of high-tech economic development based on the construction of SMART GRID", *Stratehichni priorityety*, no. 3, pp. 87-96.
9. The Verkhovna Rada of Ukraine (2018), Law of Ukraine "About the electricity market" dated 23.11.2008 no. 2628-VIII, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (access date January 24, 2023).
10. Farhangi, H. (2009), "The path of the smart grid", *IEEE power and energy magazine*, no. 8.1, pp. 18-28.
11. Ruofei, M. (2013), "Smart grid communication: Its challenges and opportunities", *IEEE transactions on Smart Grid*, no. 4.1, pp. 36-46.
12. "Smart energy system", available at: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B7%D1%83%D0%BC%D0%BD%D0%B0\\_%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B7%D1%83%D0%BC%D0%BD%D0%B0_%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0) (access date January 25, 2023).
13. The European Technology Platform Smart Grids". Smart grids: strategic deployment document for Europe's electricity networks of the future n.d., available at: [http://www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids\\_SDD\\_FINAL\\_APRIL2010.pdf](http://www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids_SDD_FINAL_APRIL2010.pdf) (access date January 28, 2023).
14. A systems view of the modern grid. NETL Modern Grid Initiative, available at: [https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/ASystemsViewoftheModernGrid\\_Final\\_v2\\_0.pdf](https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/ASystemsViewoftheModernGrid_Final_v2_0.pdf) (access date January 28, 2023).
15. Smart Grid Communications, The National Institute of Standards and Technology, available at: <https://www.nist.gov/programs-projects/smart-grid-communications-0> (access date January 28, 2023).
16. Smart energy and smart grids, International Electrotechnical Commission, available at: <https://www.iec.ch/energies/smart-energy> (access date January 28, 2023).
17. 2020 Smart Grid System Report. United States Department of Energy, available at: <https://www.energy.gov/oe/articles/2020-smart-grid-system-report> (access date January 28, 2023).
18. About IEEE Smart Grid, IEEE, available at: <https://smartgrid.ieee.org/about-ieee-smart-grid> (access date January 28, 2023).
19. Strategic Research Agenda for Europe's Electricity Networks of the Future, European

Commission, available at: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fe6d8afe-ed43-404a-b6c5-1c61da261cfc> (access date January 30, 2023).

20. Dileep, G. (2020), "A survey on smart grid technologies and applications", *Renewable Energy*, Vol. 146, pp. 2589-2625.

21. Sorini, A. and Staroswiecki, E. (2017), "Cybersecurity for the Smart Grid", *The Power Grid*, no. 3, pp. 233-252.

22. Fang, X. (2011), "Smart grid – The new and improved power grid. A survey", *IEEE communications surveys & tutorials*, no. 14.4, pp. 944-980.

23. Litos Strategic Communication (2008), *The smart grid: an introduction*, Washington D.C., USA, available at: <https://www.litosc.com/the-smart-grid-an-introduction/> (access date January 30, 2023).

24. Momoh, J. (2012), *Smart grid: fundamentals of design and analysis*. John Wiley & Sons, USA, 233 p.

25. Energy Independence and Security. Act of 2007, available at: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/pdf/PLAW-110publ140.pdf> (access date January 31, 2023).

26. Hassan, R. and Radman, Gh. (2010), "Survey on smart grid", *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon)*, pp. 210-213.

27. Bayindir, R. (2016), "Smart grid technologies and applications", *Renewable and sustainable energy reviews*, no. 66, pp. 499-516.

28. Blumsack, S. and Fernandez, A. (2012), "Ready or not, here comes the smart grid!", *Energy*, no. 37.1, pp. 61-68.

29. Metke, A. and Ekl, R. (2010), "Security technology for smart grid networks", *IEEE Transactions on Smart Grid*, no. 1.1, pp. 99-107.

30. Kabalci, Y. (2016), "A survey on smart metering and smart grid communication", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 57, pp. 302-318.

31. Sarker, E. (2021), "Progress on the demand side management in smart grid and optimization approaches", *International Journal of Energy Research*, no. 45.1, pp. 36-64.

32. Smart grids worldwide. Digital & Trends. Statista, available at: <https://www.statista.com/study/111848/smart-grids-worldwide/> (access date February 02, 2023).

33. United States Department of Energy. Storage Innovations 2030, available at: <https://www.energy.gov/oe/storage-innovations-2030> (access date February 03, 2023).

34. McLean, A., Bulkeley, H. and Crang, M. (2016), "Negotiating the urban smart grid: Socio-technical experimentation in the city of Austin", *Urban Studies*, no. 53.15, pp. 3246-3263.

35. Butt, O., Zulqarnain, M. and Butt, T. (2021), "Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network", *Ain Shams Engineering Journal*, no. 12.1, pp. 687-695.

36. Mierlo, Van J. (2021), "Beyond the state of the art of electric vehicles: A fact-based paper of the current and prospective electric vehicle technologies", *World Electric Vehicle Journal*, no. 12.1, available at: <https://www.mdpi.com/2032-6653/12/1/20> (access date February 03, 2023).

37. Rohrig, K. (2019), "Powering the 21st century by wind energy – Options, facts, figures", *Applied Physics Reviews*, no. 6.3, available at: [https://d1wqtxs1xzle7.cloudfront.net/74784709/1-libre.pdf?1637157412=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPowering\\_the\\_21st\\_century\\_by\\_wind\\_energy](https://d1wqtxs1xzle7.cloudfront.net/74784709/1-libre.pdf?1637157412=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPowering_the_21st_century_by_wind_energy) (access date February 03, 2023).

38. Bykonja, O.S. (2014), "Formation of the intelligent energy system of Ukraine", *Ekonomika i prohnouzuvannia*, no. 1, pp. 87-96.

39. Nardelli, P. (2014), "Models for the modern power grid", *The European Physical Journal Special Topics*, no. 223, pp. 2423-2437.

40. Gomis-Bellmunt, O. (2022), "Steady-state impedance mapping in grids with power electronics: What is grid strength in modern power systems?", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, no. 136, pp. 107635:1-107635:10.

41. Tuballa, M. and Abundo, M. (2016), "A review of the development of Smart Grid technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 59, pp.710-725.

42. Khalilpour, K. and Vassallo, A. (2016), *Community energy networks with storage: modeling frameworks for distributed generation*, Springer, Singapore, 191 p.

43. Sachan, S., Deb, S. and Singh, S. (2020), "Different charging infrastructures along with smart charging strategies for electric vehicles", *Sustainable Cities and Society*, no. 60, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670720302250?via%3Dihub> (access date February 03, 2023).