Low Carbon Ukraine
Policy advice on low-carbon policies for Ukraine

Supported by:
Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety
based on a decision of the German Bundestag

Аналітична записка [PP/01/2018]

Балансування нестійкої генерації з відновлюваних джерел енергії

Д-р Георг Захманн та д-р Франк Майсснер

Берлін, листопад 2018 р.

Implemented by
Berlin Economics

Інформація про проект «Low Carbon Ukraine»

«Low Carbon Ukraine» є проектом, основна мета якого полягає у наданні постійної підтримки українському уряду шляхом здійснення необхідного аналізу та надання програмних пропозицій з метою сприяння переходу до низьковуглецевої економіки. Зокрема, завданням цього проекту є підтримка роботи Віце-прем'єр-міністра, оскільки він координує впровадження Енергетичної стратегії на період до 2035 року.

Цей проект здійснюється в рамках Міжнародної кліматичної ініціативи (IKI) та фінансується Федеральним міністерством довкілля, захисту природи та ядерної безпеки ФРН (BMU) згідно з рішенням Бундестагу ФРН.

Low Carbon Ukraine
c/o BE Berlin Economics GmbH
Schillerstr. 59
D-10627 Berlin
Tel: +49 30 / 20 61 34 64 0
Fax: +49 30 / 20 61 34 64 9
info@berlin-economics.com
www.lowcarbonukraine.com

Дата публікації: 16 листопада 2018

© 2018 BE Berlin Economics GmbH. Всі права захищені.

Резюме

Україна планує істотно підвищити частку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в загальному енергобалансі країни. Така перспектива стимулювала важливі дебати щодо технічної спроможності енергосистеми України впоратись із збільшенням нестійкої вітрової та сонячної генерації електроенергії. У цьому контексті, одне з найважливіших питань полягає у тому, чи зможуть наявні генеруючі потужності балансувати коливання обсягів генерації вітрової та сонячної енергії.

За нашими оцінками, на основі підходу, що ґрунтується на моделі оптимальної диспетчеризації[1], наявна енергосистема України може балансувати коливання до 15 ГВт вітрової та сонячної генерації електроенергії. Зазначена оцінка ґрунтується на спостережуваній гнучкості українських електростанцій (атомних, теплових, великих гідроелектростанцій, гідроакумулюючих та когенераційних станцій). Певну надлишкову генерацію енергії відновлюваними джерелами необхідно скорочувати лише за умови, що частки відновлюваних джерел є дуже високими (від 15 ГВт). Втім, навіть за таких обставин, втрати від скорочення залишаються обмеженими на рівні близько 10%.

У короткостроковій перспективі існуючих потужностей генерації буде достатньо для балансування коливань генерації електроенергії відновлюваними джерелами. Проте, у зв'язку з «старінням» традиційних енергетичних потужностей та потенційним підвищенням попиту на енергоресурси, в середньостроковій та довгостроковій перспективі буде необхідно вжити певних заходів. Крім того, інтегрування ВДЕ потужністю понад 15 ГВт у рамках стратегії декарбонізації вимагатиме створення енергосистеми, яка буде набагато гнучкішою, ніж сьогодні. При здійсненні інвестицій у енергетичні потужності, мережі та підстанції необхідно брати до уваги довгострокову перспективу.

При розробці майбутньої енергетичної системи необхідно врахувати різні технологічні та нетехнологічні варіанти балансування коливань генерації енергії з відновлюваних джерел – такі як, зокрема, зберігання, змінне використання біогазу, балансуючий ринок, посилена транскордонна інтеграція та керування попитом.

[1] Модель оптимальної диспетчеризації (ODM), версія 1.0 від жовтня 2018 р

Зміст

1 Стислий огляд та існуючі виклики 5

2 Моделювання збільшення генерації електроенергії з відновлюваних джерел у рамках моделі оптимальної диспетчеризації (ODM) 7

3 Аналіз потреб щодо балансування енергосистеми України 9

3.1 Надмірні коливання, які не можна достатньо швидко збалансувати 9

3.1.1 Зниження варіативності шляхом використання різних джерел відновлюваної енергії 9

3.1.2 Вибір місця розташування потужностей ВДЕ 10

3.1.3 Маневрування традиційних потужностей 12

3.1.4 Зберігання енергії за допомогою гідроакумуляції 14

3.1.5 Зберігання електроенергії та інші варіанти використання біогазових потужностей 14

3.2 Надлишкова енергія у випадку низького споживання та надмірного відпуску 15

3.2.1 Скорочення відпуску з ВДЕ 16

3.2.2 Експорт надлишкової енергії 17

3.3 Дефіцит енергії у випадку високого споживання та низького відпуску 18

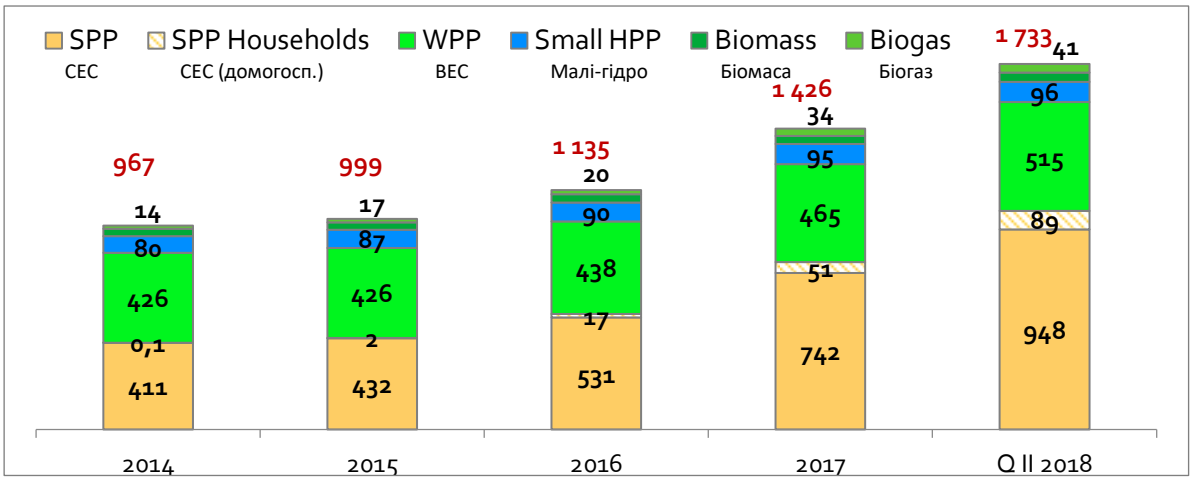
4 Висновки, рекомендації та огляд перспектив 20

5 Джерела 21

1 Стислий огляд та існуючі виклики

Завдяки привабливій схемі «зелених тарифів», зниженню вартості технологій, покращення бізнес-клімату загалом, а також істотному технічному та економічному потенціалу, останнім часом в Україні прискорився процес встановлення об'єктів генерації з відновлюваних джерел енергії. За період з кінця 2016 до кінця другого кварталу 2018 року вітрові потужності зросли на близько 18 %, а потужність сонячної генерації (фотовольтаїка) – на близько 78 %.

Рис. 1: Встановлена потужність джерел відновлюваної енергії за "зеленим тарифом"



Джерело: Держенергоефективності (2018 р.)

У зв'язку з поширенням використання змінних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) – головним чином вітрових та сонячних – постають нові виклики щодо розвитку та управління енергетичною системою. У цьому програмному документі ми розглянемо три виклики:

Виклик 1: Надмірні коливання, що не можуть бути збалансовані достатньо швидко

Основним викликом для збільшення інтеграції ВДЕ до енергетичної системи є короткочасні коливання навантаження, викликані погодними явищами. При аналізі цієї проблеми необхідно оцінити відносний розмір коливань, а також питання того, чи можна збалансувати коливання, та якщо так, то у який спосіб.

Короткочасні коливання ВДЕ, що залежать від погодних чинників, призводять або до підвищення, або до зниження обсягів генерації електроенергії, що за інших рівних умов спричиняє ринковий дисбаланс. Отже, підвищення потужностей ВДЕ та, разом з цим, обсягу генерації електроенергії, може призвести до дисбалансу пропозиції та попиту на електроенергію, а це, в свою чергу, є істотним викликом для енергетичної системи.

Виклик 2: Надлишок електроенергії в разі низьких обсягів споживання та високих обсягів постачання

Надлишок електроенергії виникає в тому разі, якщо обсяг постачання на поточний момент перевищує обсяг попиту[2]. Ймовірність таких ситуацій підвищується, коли встановлено багато потужностей для генерування електроенергії з відновлюваних джерел. Тоді, якщо дме вітер та світить сонце, необхідно підтримувати роботу атомних електростанцій, коли попит є низьким. Це є проблемою, оскільки якщо подавати до системи більше енергії, ніж споживається, це знищить систему.

[2] За умови, що імпорт та експорт не враховуються, та попит дорівнює споживанню.

Виклик 3: Брак електроенергії в разі високих обсягів споживання та низьких обсягів постачання

На відміну від надлишку електроенергії, брак електроенергії виникає в тих випадках, коли попит на електроенергію перевищує пропозицію. Як правило, такі ситуації виникають, якщо, з одного боку, обсяг генерації електроенергії з відновлюваних джерел низький, а з іншого – попит домогосподарств та промислових підприємств залишається високим. Така ситуація може виникнути, коли на заміну все більшій кількості традиційних електростанцій приходять відновлювані джерела енергії[3].

Ми прагнемо відповісти на запитання: **чи дозволяє наявний наразі парк генеруючих потужностей інтегрувати більшу частку нестійких відновлюваних джерел в Україні, та які варіанти балансування слід використовувати?**

Аналіз ґрунтується на наявних даних щодо електричного навантаження за 2017 рік. Незважаючи на зростання потужностей ВДЕ, передбачається, що існуючий парк генеруючих потужностей залишається незмінним. Ми не враховуємо в аналізі потенційні обмеження, викликані технологічними змінами в передачі електроенергії.

Цей програмний документ організовано таким чином: спочатку ми представляємо модель оптимальної диспетчеризації, яку ми використовуємо для аналізу інтеграції джерел відновлюваної енергії до існуючої енергосистеми. Потім ми аналізуємо те, чи мають висвітлені виклики негативний вплив на енергетичний сектор України в короткостроковій перспективі, та якщо так, якою мірою, та які належні рішення можна застосувати для усунення проблем. У останньому розділі представлені підсумкові коментарі та перспективи розвитку.

Ми обговоримо сім варіантів дій, що дозволять впоратись із коливаннями відновлюваних джерел енергії. При цьому окремі варіанти можуть різною мірою вирішити три проблемні питання, що згадуються вище (див. Таблицю 1). Крім того, відображено варіанти довгострокового балансування, що не описані в цьому програмному документі. (Кількість плюсів позначає, якою мірою відповідний варіант може використовуватися для вирішення проблеми).

Таблиця 1: Варіанти балансування та їх зв'язок з викликами

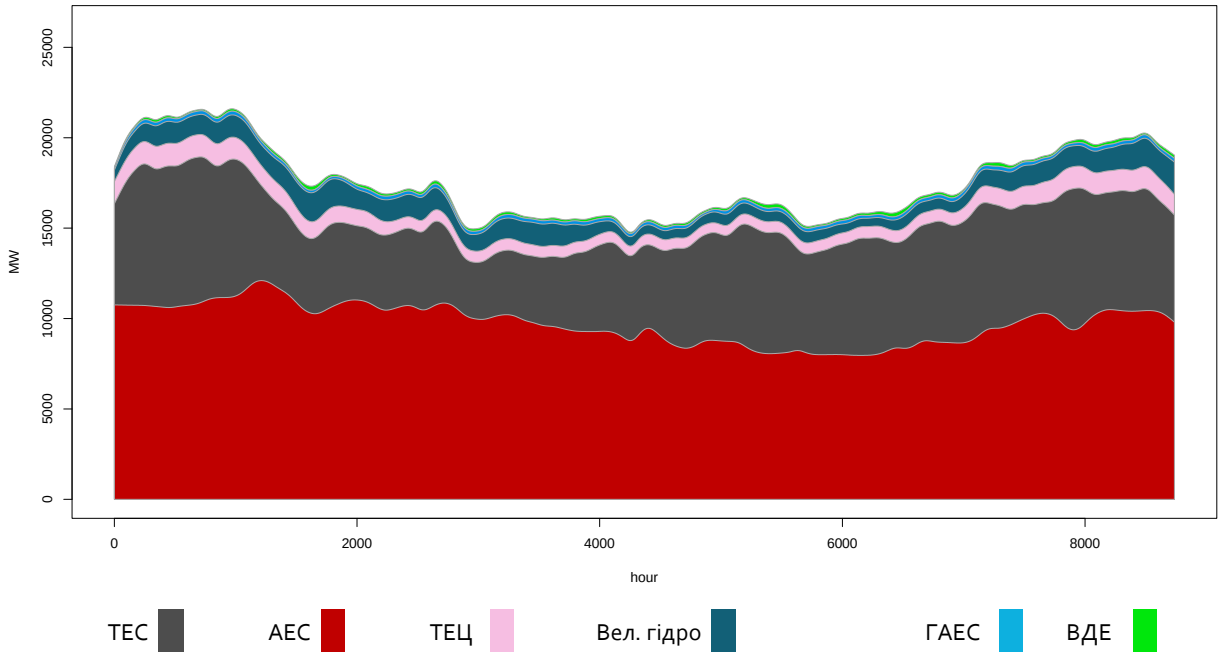
Варіант балансування	Виклик 1 Колив. ВДЕ	Виклик 2 Надл. електроен.	Виклик 3 Брак електренерг.
Оптимізація поєднання вітрової та сонячної генерації	++	++	++
Оптимізація розміщення потужностей ВДЕ	++	+	+
Оптимізоване використання традиційних та біогаз. потужностей	+++	++	++
Зберігання електроенергії за допомогою гідроакумулювання	+++	+++	++
Скорочення електроенергії, отриманої за рахунок ВДЕ		+++	
Експорт надлишкової електроенергії	+	+++	+
Додаткові варіанти балансування (не аналізувалися):			
Регулювання попиту	++	+++	+++
Покращене прогнозування погоди	+++	++	++
Інші технології зберігання (P-t-X, батареї, CAS)	+++	+++	+++

[3] Так, наприклад, це може відбутися, коли коефіцієнт навантаження традиційних енергоустановок (наприклад, кількість годин роботи на рік) знизиться при постачанні дешевшої енергії з ВДЕ. У тому разі, якщо ціни за години, протягом яких ще вимагається робота традиційних енергоустановок, надто низькі для покриття постійних витрат традиційних енергоустановок, останні можуть виходити з ринку.

2 Моделювання збільшення генерації електроенергії з відновлюваних джерел у рамках моделі оптимальної диспетчеризації (ODM)

Ми ставимо за мету проаналізувати наслідки збільшення генерації електроенергії з ВДЕ для традиційних енергоустановок. Це включає аналіз впливу на сукупний обсяг генерації електроенергії, незалежно від того, чи призводять коливання ВДЕ до надлишку або браку електроенергії, та чи можуть вони бути збалансовані енергосистемою. Для надання вичерпної відповіді на це запитання необхідно, як мінімум, проаналізувати щогодинні зміни електричного навантаження та внесок відновлюваних джерел до сукупного обсягу генерації електроенергії. Оптимізація ґрунтується на погодинних показниках електричного навантаження в Україні за 2017 рік (див. Рис. 2).

Рис. 2: Електричне навантаження в Україні в 2017 році



Джерело: Власна презентація на основі даних «Укренерго»

Для надання відповіді на це запитання ми розробляємо модель оптимізації, що дозволяє мінімізувати сукупні маржинальні (змінні) витрати на генерацію електроенергії. Застосовується модель оптимізації для трьох різних сценаріїв щодо ВДЕ:

Таблиця 2: Сценарії генерації електроенергії з ВДЕ для моделі ODM V1.0

Сценарій	Одиниці виміру	Сценарій I	Сценарій II	Сценарій III
Встановлена потужність	ГВт	5	10	15
Теоретичний обсяг генерації електроенергії з ВДЕ	ТВт*год.	12	24	35

Джерело: власна презентація

Оптимізація ґрунтується на показниках електричного навантаження в Україні за 2017 рік. Ці дані окремо відображають потужність теплових та ядерних електростанцій, теплоелектроцентралей (когенераційних станцій), великих гідроелектростанцій, гідроакумулюючих електростанцій, а

також імпорт та експорт. Крім того, дані відображають сукупний обсяг виробництва електроенергії вітрогенераторами, фотовольтаїчними установками та малими гідроелектростанціями (ВДЕ).

Заходи з оптимізації дозволяють мінімізувати щорічні сукупні та накопичені витрати на генерацію електроенергії шляхом оптимізації погодинного розподілу наявних потужностей атомних, теплових та великих гідроелектростанцій, а також використання гідроакумулювання енергії, відповідно до технічних обмежень для кожного типу генерації електроенергії. Генерація електроенергії теплоелектроцентралями (когенераційними станціями) великою мірою залежить від попиту на теплову енергію. Тому вважається, що генерація електроенергії такого типу залежить від зовнішніх чинників, а імпорт і експорт не враховуються[4].

Генерація електроенергії ВДЕ також залежить від зовнішніх чинників. У першій версії моделі, електричне навантаження ВДЕ за 2017 рік просто збільшується на фіксований коефіцієнт, відповідно до трьох сценаріїв. Тому, якщо протягом певного часу в 2017 році не дув вітер та не світило сонце, генерація вітрової та сонячної енергії у цей час дорівнюватиме нулю за всіма сценаріями. Поточна версія моделі не враховує ані витрати на регулювання відпуску електроенергії, ані обмеження на передачу, ані потреби в технічному обслуговуванні.

Основне обмеження моделі полягає в тому, що сукупний обсяг генерації електроенергії повинен дорівнювати траєкторії споживання, яка залежить від зовнішніх чинників, у кожен момент часу.

Різні обмеження щодо потужностей для різних варіантів генерації електроенергії (ядерних, теплових, гідроакумулюючих установок та великих гідроелектростанцій) визначені на основі спостережуваних рішень щодо диспетчеризації в 2017 році. Два обмеження лімітують генерацію електроенергії для кожної незалежної змінної: вищі та нижчі межі навантаження, а також вищі та нижчі межі щогодинних коливань. Тоді як перший тип обмеження забезпечує використання потужностей у тих же межах, в яких вони використовувались у дійсності (2017), другий забезпечує, щоб зміни щогодинного електричного навантаження були обмежені реалістичними значеннями. Значення верхньої та нижньої межі навантаження визначаються межами навантаження 2017 року. Для змін, які пов'язані з щогодинними коливаннями, ми не враховуємо 88 годин з найвищими коливаннями (дивіться Таблицю 3). Для відтворення річної сезонності, ми обмежуємо обсяги генерації електроенергії великими гідроелектростанціями фактичними щомісячними кумулятивними показниками 2017 року.

Таблиця 3: Обмеження граничних значень незалежних змінних для моделей ODM V1.0 able 4:

Незалежна змінна	Мін. навантаження	Макс. навантаження	99% квантиль погодинно	
			зменшення	підвищення
Атомні електростанції	7,500 мВт	13,000 МВт	130 МВт	120 МВт
Теплові електростанції	2,300 мВт	10,000 МВт	960 МВт	760 МВт
Великі гідроелектростанції	0	380-1,000 ГВт*год накопичується за місяць, залежно від місяця	900 МВт	860 МВт
		1,800-3,100 МВт змінюється в середньому за 24 години, залежно від місяця		
ГАЕС	0	1,300 МВт	-	-

[4] Наразі транскордонна передача не підтримує міжнародну торгівлю як відповідний варіант балансування.

3 Аналіз потреб щодо балансування енергосистеми України

3.1 Надмірні коливання, які не можна достатньо швидко збалансувати

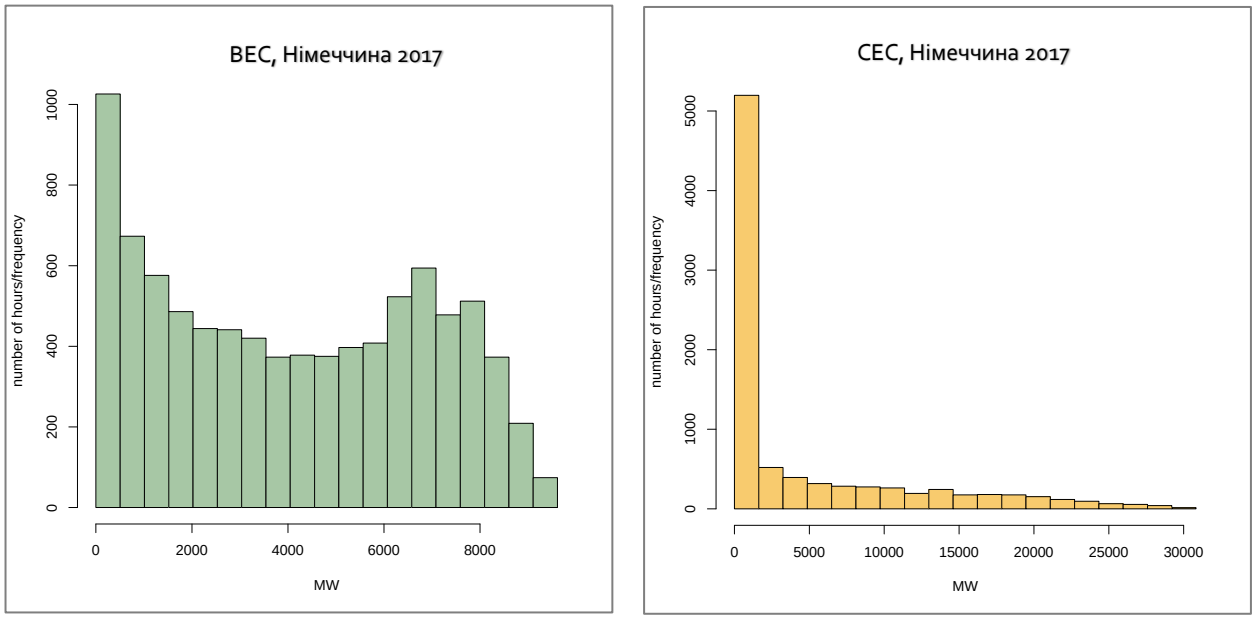
Зниження варіативності шляхом використання різних джерел відновлюваної енергії Рис. 3: Гістограма електричного навантаження вітрогенераторів та фотовольтаїчних установок у Німеччині в 2017 роціНижче наведено гістограми, що відображають генерацію електроенергії з ВДЕ в Німеччині та в Україні. Вони демонструють, що різні типи ВДЕ певною мірою можуть взаємно балансувати коливання генерації електроенергії.

Частка годин з низьким обсягом генерації електроенергії є більшою у сонячної, ніж у вітрової генерації (див. Рис. 3 із даними Німеччини за 2017 рік). Крім того, фотовольтаїчним установкам властиві більші коливання, пов'язані зі змінним рівнем сонячного випромінювання протягом дня. Варіаційний коефіцієнт[5] фотовольтаїчних установок протягом 24 годин становить 1,5, а у період з 6.00 до 19.00 він становить 0,94, тоді як варіаційний коефіцієнт вітрових установок дорівнює 0,67.

Об'єднання різних технологій ВДЕ знижує варіативність електричного навантаження. Варіаційний коефіцієнт для сукупної генерації електроенергії вітру та сонця за 24 години в Німеччині становить 0,8 та, таким чином, приблизно на 80% нижчий, ніж коефіцієнт для сонячної генерації окремо в тому ж часовому інтервалі, але дещо вищий, ніж окремо у вітрових ВДЕ. Протягом світлового дня (з 6.00 до 19.00) варіаційний коефіцієнт для сонячної та вітрової генерації разом становить 0,61, що свідчить про зниження коливань.

Крім того, рівень коливань для більшої комбінації технологій ВДЕ – ВЕС, СЕС, малих гідроелектростанцій та біогазу (див. Рис.4) є ще нижчим. У такому разі Україна демонструє варіаційний коефіцієнт 0,7, тоді як Німеччина – 0,48 у 2017 році.

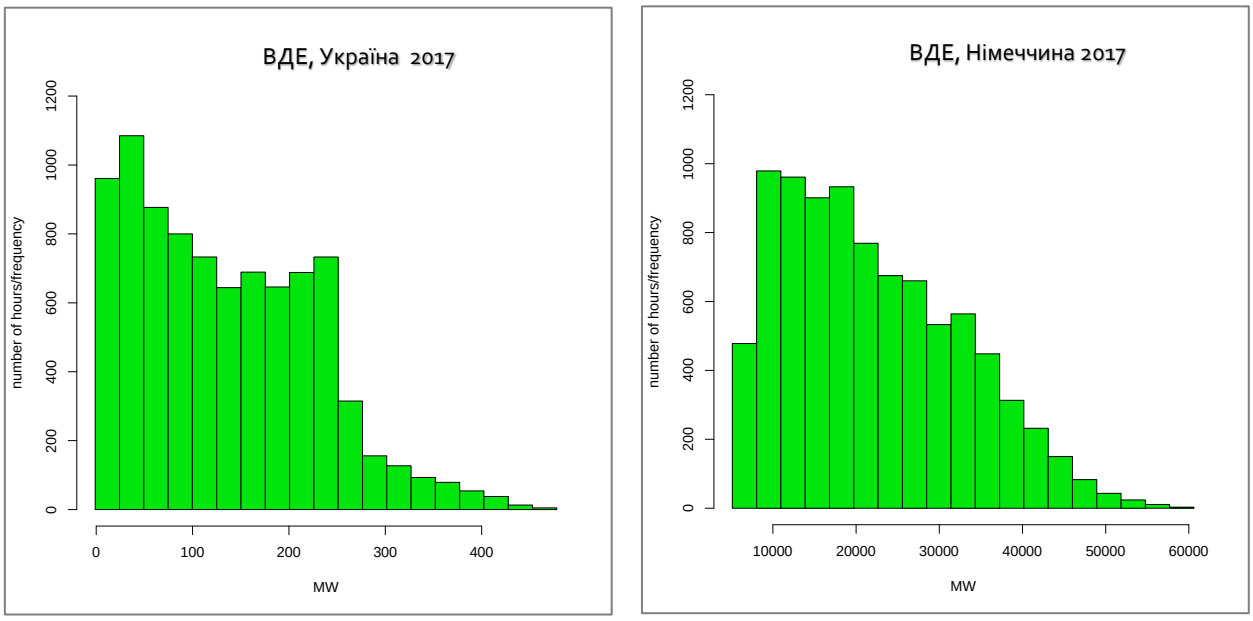
Рис. 3: Гістограма електричного навантаження вітрогенераторів та фотовольтаїчних установок у Німеччині в 2017 році



Джерело: Власна презентація

[5] Вимірюється за допомогою варіаційного коефіцієнту: стандартне відхилення електричного навантаження ділиться на середнє електричне навантаження.

Рис. 4: Гістограма електричних навантажень ВДЕ в Україні та Німеччині в 2017 році



Джерело: Власна презентація

Результат: Генерація вітрової та сонячної енергії загалом не залежать одна від одної. Вдало обране поєднання двох технологій генерації електроенергії знижує потреби в балансуванні.

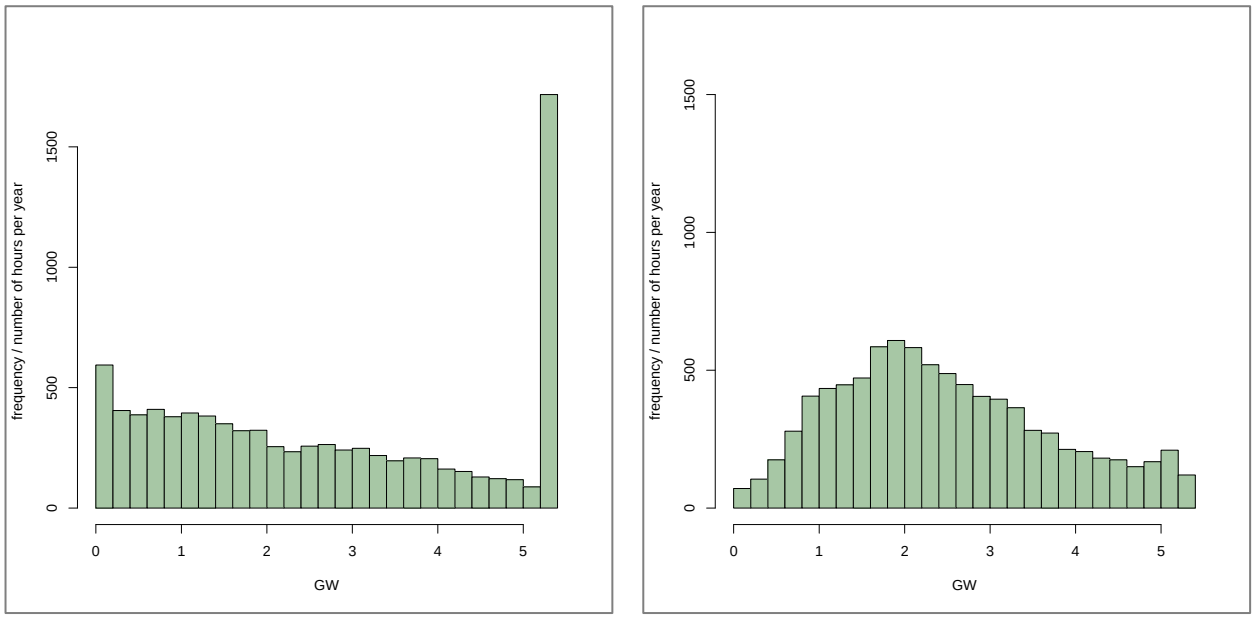
3.1.1 Вибір місця розташування потужностей ВДЕ

Генерація електроенергії нестійкими ВДЕ залежить від поточного рівня сонячного випромінювання та швидкості вітру в певному місці. Чим більш територіально широко розташовані по країні вітрові та сонячні установки, тим менш нестабільним буде загальний обсяг виробленої ними електроенергії (це явище має назву "географічне усереднення"). Оскільки Україна має площу близько 603,000 км² та розташована в п'яти різних кліматичних зонах, в країні є достатня кількість неоднорідних місць для розвитку потужностей відновлюваних джерел енергії. Використання цих відмінностей дозволяє балансувати коливанння генерації відновлюваної енергії виключно шляхом вибору місця для надання дозволу на розміщення електростанцій на основі ВДЕ.

На Рис. 5 представлені гістограми для двох різних сценаріїв розподілу вітроенергетичних установок. Тоді як за першого сценарію вітрогенератори потужністю 5,3 ГВ розташовані лише в одному регіоні (з максимальною сукупною річною швидкістю вітру та, отже, і обсягом генерації електроенергії), за другого сценарію та сама встановлена потужність розподілена між 25 різними місцями розташування в Україні (вибір ґрунтується на визначенні регіонів, наданому у дослідженні Макаровського та Зінича (2013). Як показано в Таблиці 4, генерація електроенергії у точці з «найкращими» вітровими ресурсами дозволяє виробити на 2 ТВт*год на рік більше (+10 %), ніж у разі розподілу установок між багатьма різними місцями розташування, в яких часто буває не така вітряна погода. Проте вищий обсяг генерації електроенергії відповідає вищому рівню коливань навантажень, тобто перепадів навантаження в різні години (3,1 ГВ проти 1,8 ГВ), при цьому тривалість відсутності генерації електроенергії є вищою (586 проти 2 годин) та

тривалість генерації в обсязі, нижчому за 10 % від встановлених потужностей, також є вищою (1 241 проти 282 годин).[6]

Рис. 5: Гістограма двох сценаріїв розподілу ВЕС – у найкращому місці розташування (зліва) та при однорідному розподілі (справа)



Джерело: власна презентація

Таблиця 5: Порівняння принципів розподілу місць розташування вітроенергетичних установок в Україні

Розподіл енергетичних установок		Концентрація	Рівномірний розподіл
Щорічна генерація електроенергії	ТВт*год.	23	21
Максимальний погодинний перепад навантаження	ГВт	3.1	1.8
Тривалість нульового рівня генерації електроенергії	годин	586	2
Тривалість навантаження < 530 МВт	годин	1,241	282

Джерело: власна презентація

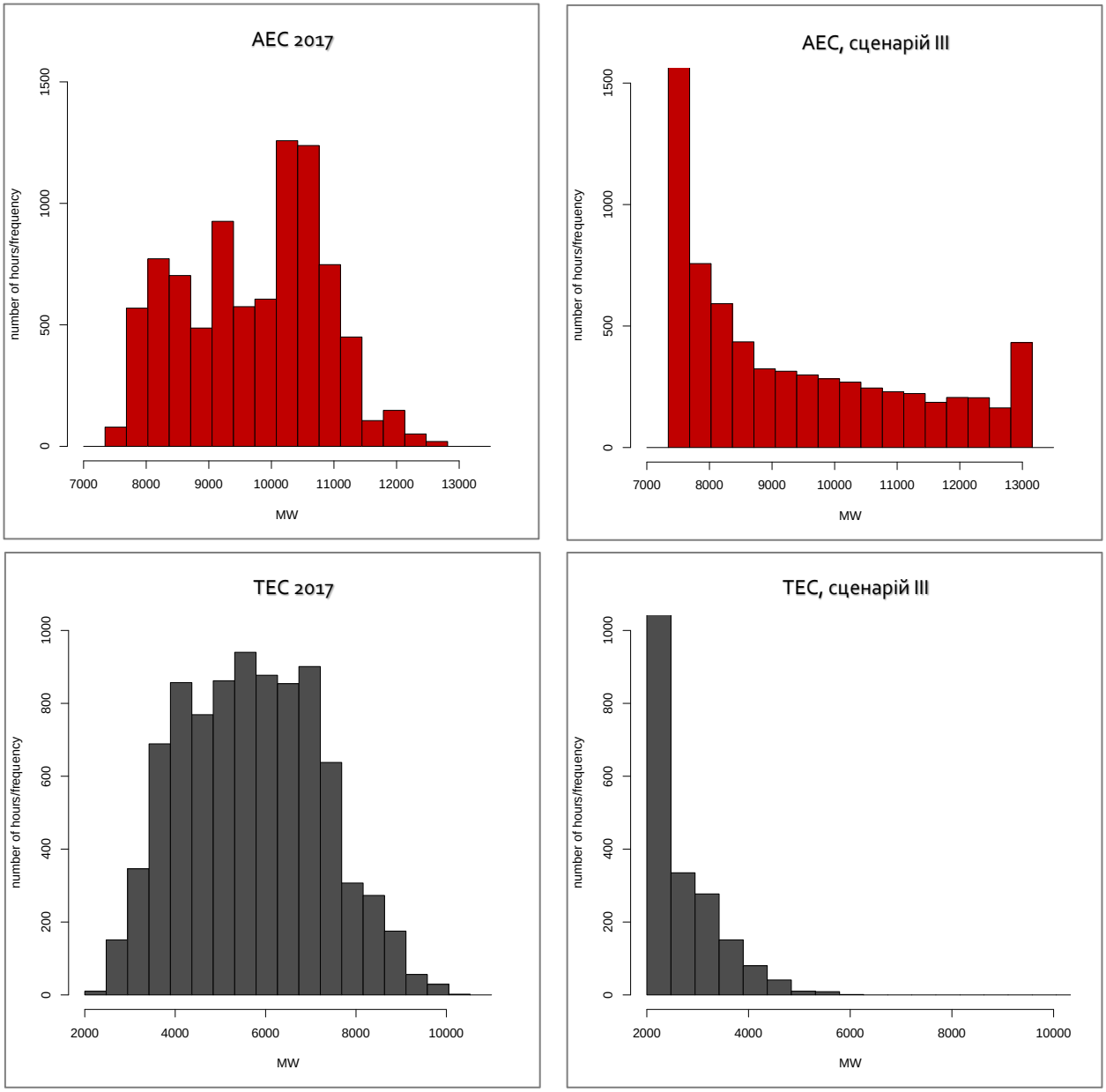
Результати: При розміщенні джерел відновлюваної енергії, що залежать від погодних умов, в різних точках на території України знижується потреба в застосуванні інших варіантів балансування. Органи, відповідальні за надання дозволів на розміщення енергетичних установок, повинні стимулювати більш широке розташування енергетичних установок по всій території країни, оскільки в іншому випадку інвестори можуть просто сконцентрувати всі установки в найбільш сонячних/вітряних регіонах.

[6] У версії 1.0 Моделі оптимальної диспетчеризації не розглядаються ані різні місця розташування ВДЕ, ані диференціювання вітру та сонця. Інтеграція буде розглянута у версії 2.0

3.1.2 Маневрування традиційних потужностей

Ми намагалися визначити чи можуть, і якщо можуть, то до якої межі, атомні та теплові потужності збалансовувати коливання ВДЕ. Як зазначено вище, ми вважаємо, що обидва типи генерації використовуються у тих самих діапазонах навантаження, які окреслено для 2017-го року. Тим не менш, щогодинні зміни навантажень обмежені в діапазоні від 1% до 99% процентилю дійсної реалізації (наприклад, ми вирішили, що 175 годин, в які фіксуються найбільш крайні показники, – це занадто сильне відхилення, тож ми не брали їх до уваги). На Рис. 6 подано гістограми навантаження потужності для АЕС та ТЕС у 2017 році (ліва частина малюнку) та результат оптимізації згідно із сценарієм під номером III. Окрім цього, на Рис. 7 зображені щогодинні зміни потужностей навантаження для обох типів генерації у 2017 році (ліворуч) та реалізація сценарію під номером III (праворуч).

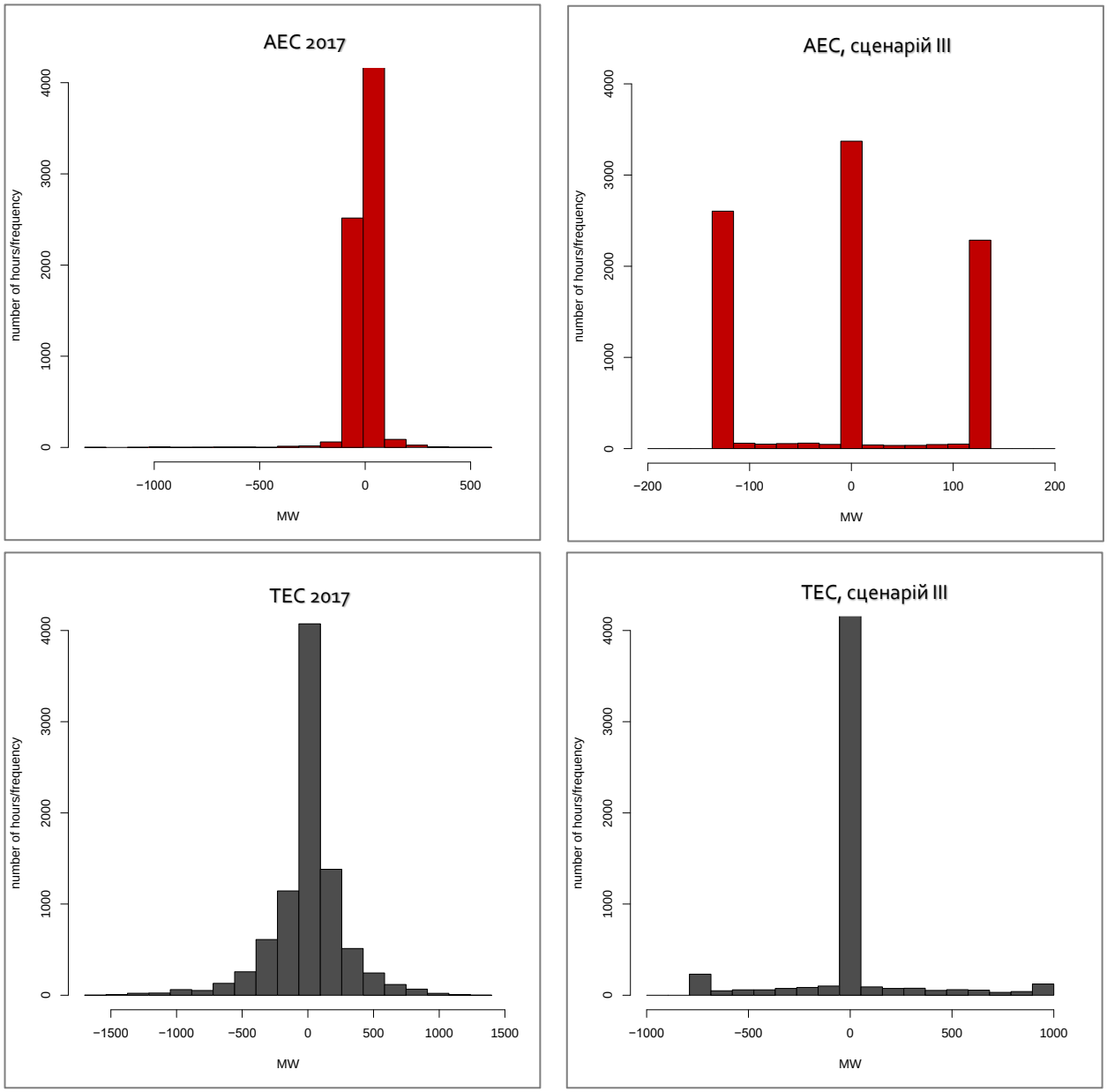
Рис. 6: Гістограма потужностей навантаження для АЕС та ТЕС у 2017 році (ліворуч) та сценарій III (праворуч)



Джерело: Власна презентація на основі ODM V1.0

Графіки показують, що через зростання потреби у балансуванні за допомогою більш повної інтеграції потужностей відновлюваних джерел енергії (тут у сценарії III ~14 ГВт), потужності АЕС та ТЕС набагато частіше працюють у верхніх та нижніх межах. Більшою мірою це стосується потужностей АЕС, бо, як ми припускаємо, генерація енергії АЕС коштує менше, ніж у випадку із ТЕС. Більше того, за умови оптимізаційного підходу, щогодинні зміни навантаження для АЕС та ТЕС менш однорідні, ніж у 2017 році. Це є серйозним свідченням на користь того, що зміни навантаження у 2017 році були спричинені не потребою балансування, а іншими технологічними потребами.

Рис. 7: Гістограма щогодинних коливань навантаження для АЕС та ТЕС у 2017 році (ліворуч) та сценарій III (праворуч)



Джерело: Власна презентація на основі ODM V1.0

Результати: Завдяки маневруванню наявних потужностей АЕС та ТЕС зміни навантаження, які відбуваються внаслідок коливань ВЕС та СЕС, можна збалансувати. Ми можемо продемонструвати, що без адаптації щогодинних коливань, так само як без змін діапазону потужності навантаження для АЕС та ТЕС, 15 ГВт відновлюваних джерел енергії не може бути інтегровано до енергосистеми.

3.1.3 Зберігання енергії за допомогою гідроакумуляції

Зберігання енергії за допомогою гідроакумуляції уможливлює балансування відновлюваної генерації протягом необмеженого періоду часу у межах встановленого об'єму потужностей гідроакумулюючих станцій та встановленого навантаження для ГАЕС певної потужності. Перевагою гідроакумулюючих станцій є дуже швидка реакція на перемінні потреби в електроенергії, а недоліком – зниження ефективності на приблизно 30% для повного циклу закачування води та потім її скидання задля генерації електроенергії.

Потужності гідроакумулюючих станцій в Україні досягли позначки у приблизно 1.3 ГВт (Mishra, 2017), у той час як обсяги генерації енергії за допомогою гідроакумуляції склали приблизно 1.5 ТВт*год у 2017 році. Аналіз кореляції цих показників із генерацією енергії за допомогою відновлюваних джерел енергії демонструє, що ці потужності не використовувалися значною мірою задля збалансовування коливань енергії, яка виробляється за допомогою ВДЕ[7]. Однією з причин, чому генерація енергії за допомогою ВДЕ не потребувала балансування, може бути в цілому низький обсяг генерації у 2017 році.

Ми представляємо свою оцінку – на основі оптимізаційної моделі – щодо того, як використовувалися б потужності гідроакумулюючих станцій згідно із різними сценаріями. У сценаріях I і II (представляють відповідно 12 та 24 ТВт відновлюваної енергії) використання генерації за допомогою гідроакумуляції лишається обмеженим. Зі зростанням потужностей ВДЕ використання гідроакумулюючих станцій також зростає. Згідно зі сценарієм III генерація енергії за допомогою гідроакумуляції досягає позначки у 2.8 ТВт на рік. Крім того, кореляція між генерацією енергії за допомогою ВДЕ та за допомогою гідроакумуляції досягає найвищої позначки 0.44 у сценарії III (див. Таблицю 5).

Таблиця 6: Дані щодо використання гідроакумулюючих станцій та генерації за допомогою гідроакумуляції у різних сценаріях

		Дійсна потужн. навантаж. 2017	Сценар. I	Сценар. II	Сценар. III
Генерація енергії за допомогою ВДЕ	ТВт*год	1.2	12	24	32
Генерація енергії за допомогою гідроакумуляції	ТВт*год	1.5	0.00	0.6	2.8
Кореляція між генерацією енергії за допомогою гідроакумуляції та ВДЕ		-0.23	-	0.24	0.44

Джерело: Власна презентація на основі ODM V1.0

Результат: Зі збільшенням використання ВДЕ, гідроакумулюючі станції більше залучатимуться для балансування коливань потужностей відновлюваних джерел енергії.

3.1.4 Зберігання електроенергії та маневруючі варіанти використання біогазових потужностей

Наразі біогаз – це найменш залежне від погодних умов джерело відновлюваної енергії. Зазвичай, біогазові установки працюють на постійній основі. Біогазові установки працюють приблизно 7.800 годин на рік, таким чином їх коефіцієнт використання сягає 90% (Rohrig *et al.*, 2011). Тому, з

[7] Генерація енергії за допомогою гідроакумуляції вважається відтоком складських потужностей та позначається негативними числами. Тут ми представляємо кореляції, зображаючи генерацію енергії за допомогою гідроакумуляції як позитивну одиницю.

одного боку, генерація енергії за допомогою біогазових установок не потребує балансування. З іншого боку, біогазові установки можна використати для балансування різноманітних відновлюваних джерел енергії, зокрема, вітрових та сонячних фотоелектричних. Балансування за допомогою біогазу дозволяє задовольнити конкретні потреби генерації. Досягти цього можна або за допомогою гнучких концепцій вироблення біогазу, або за допомогою зберігання біогазу (Dzene and Romagnoli, 2015). Виконання першого можна забезпечити за допомогою впливу на процес анаеробної ферментації «[...] шляхом зміни субстратної композиції та норми заповнення, або шляхом суттєвої зміни конфігурації біогазової установки» (Dzene and Romagnoli, 2015).

Ми хочемо проаналізувати, чи може зберігання на основі біогазу виступати альтернативою для зберігання надлишку енергії у короткостроковій перспективі.

Біомаса (біогаз) забезпечила близько 200 ГВт*год генерації електроенергії в Україні у 2017 році. Це складає приблизно 20% від усієї генерації енергії за допомогою ВДЕ. Лише 40 МВт встановленої потужності працює згідно зі схемами "зеленого тарифу". Враховуючи зростання обсягів використання вітрових та сонячних фотоелектричних станцій – як відображено у сценаріях II та III – потужності генерації на біомасі мають значною мірою зрости, аби збалансувати вітрові та сонячні коливання за допомогою зберігання. Інакше потужності зберігання мають бути величезними.

Таким чином, можливість балансування за допомогою біогазу є досить обмеженою у короткостроковій перспективі. Тим не менш, біоенергетичний сектор України має великий потенціал для подальшого розвитку. Особливо генерація біогазу, яка пропонує помірковані ціни та переваги для навколишнього середовища, у порівнянні із рідким біопаливом (першого та другого покоління). Крім того, агросектор України забезпечує біогазову генерацію сировиною, надаючи значний обсяг рослинних та тваринних відходів.

Балансувальні можливості біогазу слід взяти до уваги у подальшому розвитку біопаливного сектору. Відповідно, у схемах розвитку цього напряму необхідно розрізняти ті установки, що забезпечують балансування енергії за допомогою складських потужностей, та решту. Подібні схеми підтримки можна інтегрувати до розвитку балансуючого ринку.

Більше того, виробництво біогазу можна інтегрувати до сектору природного газу. Враховуючи, що це потребує високих початкових інвестицій, воно може виступати лише у якості довгострокового рішення. В ідеалі виробництво біогазу має перебувати у місцях із високою концентрацією біогазової сировини, оскільки це зменшує витрати на транспортування. Потенційно, біогаз може виступити у якості заміни природному газу та використовуватися для експорту, електро- чи теплогенерації в Україні. Включення біогазових потужностей до енергосистеми збільшує її можливості балансування.

Результат: Враховуючи потреби у високих початкових інвестиціях, зберігання на основі біогазу – це не найкраща опція для балансування генерації енергії за допомогою ВДЕ у короткостроковій перспективі. Тим не менш, завдяки збільшенню частки генерації енергії за допомогою біогазу та генерації на біомасі, балансування ВДЕ за допомогою біогазу та біомаси може відігравати більш значну роль.

3.2 Надлишкова енергія у випадку низького споживання та надмірного відпуску

Поняття "надлишкова енергія" змальовує ситуацію, коли енергопостачання перевищує попит на електроенергію. В принципі, цю проблему можна вирішити або шляхом зменшення обсягів відпуску, або збільшення попиту. У практичному плані цього можна досягти шляхом тимчасового скорочення ВДЕ, що викликають коливання, або експорту надлишкової електроенергії.

3.2.1 Скорочення відпуску з ВДЕ

Скорочення означає зменшення обсягів генерації енергії до рівня, нижчого за можливий у запропонованих умовах. Зазвичай, потреба у скороченні пов'язана із випадками високої генерації ВДЕ, низького попиту на електроенергію та неспроможності зменшити навантаження традиційних потужностей чи зберігання енергії за допомогою гідроакумуляції.

Обсяги скорочень суттєво відрізняються в залежності від країни, регіону і навіть індивідуальних електростанцій. Через це значна частка відновлюваних джерел енергії не має гострої потреби у скороченні. Навіть якщо велика кількість різноманітних потужностей ВДЕ, інтегрована до енергосистеми, сприяє, у теорії, необхідності скорочення, але краща інтеграція до енергосистеми, належний режим регуляції та поліпшення прогнозування зменшує кількість скорочень у енергосистемі.

Китай – це країна із найбільшим обсягом генерації енергії за допомогою відновлюваних джерел. Однак, частка ВДЕ у загальному виробництві енергії там є досить помірною – близько 25%. Наприклад, на вітрову енергію припадає лише 3%. Тим не менш, відбувається значне скорочення відпуску у вітровому секторі виробництва енергії. Як зазначається у журналі Brookings (2018), Китаєві довелося скоротити відпуск 49.7 ТВт*год вітрової енергії у 2016 році, що становить 20% усього обсягу генерації енергії за допомогою вітру.

Нещодавній аналіз свідчить про скорочення обсягів вітрової генерації енергії в Англії та Німеччині (Joos & Staffell, 2018). Відповідно, прибережні вітропарки в Англії зазнали скорочення обсягом в середньому між 0% та 0.63%. Для Німеччини середні показники скорочень сягають 2.98 % (Joos & Staffell, 2018).

Аналіз ефекту скорочень має розрізнятися на макро- та мікрорівнях. У той час, як опція скорочень відпуску сприяє гнучкості енергосистеми та підвищує рівень свободи для операторів системи, вона так само зменшує прибутки для виробників енергії. На мікрорівні скорочення є загалом економічно невигідним, за умови відсутності компенсації за втрачені прибутки.

Економічна вигода на макрорівні залежить від обсягів скорочень, витрат на генерацію для всіх джерел, витрат на розширення енергосистеми та регуляцію.

Таблиця 7: Втрати за умови скорочення згідно із різними сценаріями ВДЕ представляє абсолютні та відносні втрати через скорочення для трьох сценаріїв ВДЕ[8]. У сценарії I скорочення дорівнює нулю, сценарій II передбачає невеликі втрати близько 1% генерації енергії за допомогою ВДЕ, у той час як сценарій III оцінює втрати у близько 10%. Як зазначається далі у сценарії II, протягом близько 50% годин роботи генерація енергії перевищує встановлений з-зовні запит на енергію (див Рис. 8: Скорочення відновлюваної енергії – 31 ТВт*год (розраховані для зростання потужності навантаження на годину).). Частка відносних втрат за умови скорочення (10%), згідно із Joos and Staffell (2018), дорівнює середнім втратам у шотландському секторі вітрової генерації енергії протягом 2012-2016 років. Однак, встановлена потужність (вітрової енергії) вдвічі перевищує числа, запропоновані для України у цьому сценарії.

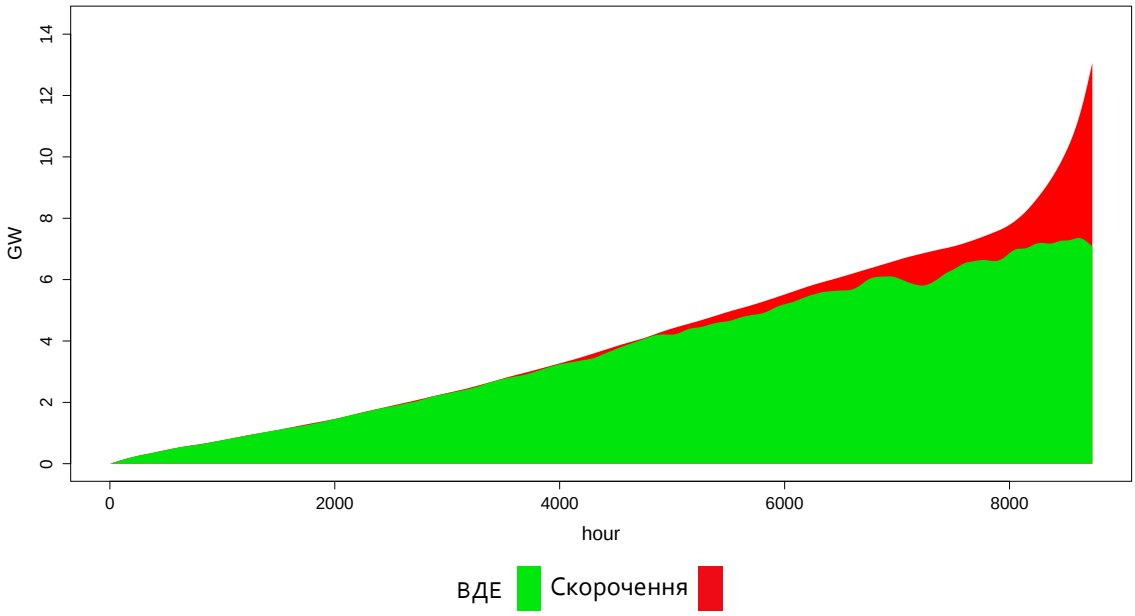
Таблиця 7: Втрати за умови скорочення згідно із різними сценаріями ВДЕ

		Сценарій I	Сценарій II	Сценарій III
Встановлена потужність	ГВт	5	10	15
Теоретична генерація енергії за допомогою ВДЕ	ТВт*год	12	24	35
Дійсна генерація енергії за допомогою ВДЕ	ТВт*год	12	24	32
Скорочення	ТВт*год	0.00	0.30	3
Відносні втрати через скорочення	%	0.0%	1.3%	10%

[8] Дані укладено на основі нашої оптимізаційної моделі версія 1.0, жовтень 2017.

Джерело: Власна презентація на основі ODM V1.0

Рис. 8: Скорочення відновлюваної енергії – 31 ТВт*год (розраховані для зростання потужності навантаження на годину)



Джерело: Власна презентація на основі ODM V1.0

Результат: Навіть за умови, що ані структура, ані маневровість наявних електростанцій (окрім ВДЕ) не зміниться, втрати через скорочення відпуску з ВДЕ задля уникнення виробництва надлишкової енергії не перевищуватиме 10%, згідно із наведеними сценаріями. Втрати за умови скорочень залишаються у помірних межах, до потужності в 15 ГВт для ВДЕ, та можуть і надалі скорочуватися шляхом адаптації генерації енергії з АЕС, ТЕС та великих гідроелектростанцій.

3.2.2 Експорт надлишкової енергії

Згідно із Energiewende team (2015), міжнародна торгівля (імпорт та експорт) енергією є досить обмеженою опцією для балансування енергії. В основному, через те, що "[...] подання тендерних заявок щодо часових рамок для експорту та імпорту (наприклад, на багато днів завчасно, не на день наперед чи протягом одного дня) відбуваються занадто довго, аби забезпечити функціонування балансування". У Німеччині заборонено використовувати імпорт електроенергії на ринках балансування (там само).

Враховуючи той факт, що енергосистема України лише частково підготовлена для міжнародного енергобалансування, а також описані вище методологічні виклики, то експорт у випадку утворення надлишкової енергії залишається досить обмеженою опцією у короткостроковий період. Однак, у довгостроковій перспективі європейському енергоринку доведеться мати справу зі зростанням коливань по всьому континенту. Міжнародний обмін енергією уможливить балансування коливань у широкомасштабних регіонах у майбутньому. З економічної перспективи, така опція є бажанішою за розвиток потужностей зберігання електроенергії (батарей).

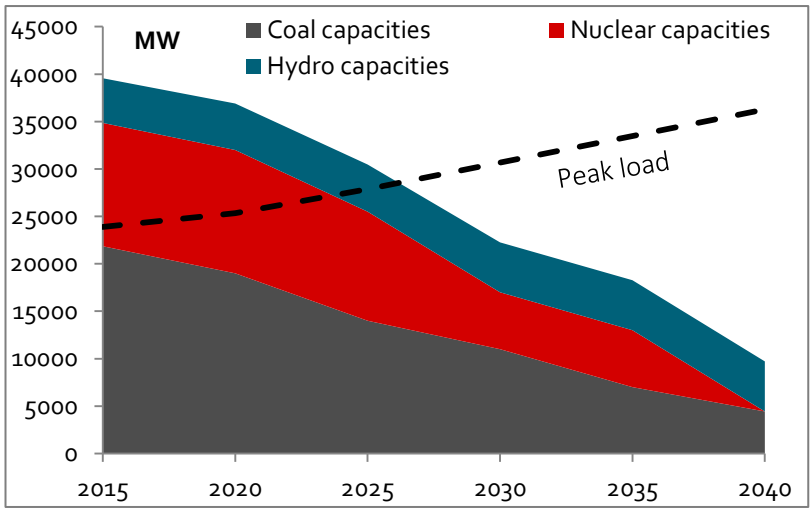
Результат: Подальша інтеграція енергосистеми України до системи ЄС підвищує можливість потенційної компенсації надлишку енергії за допомогою експорту.

3.3 Дефіцит енергії у випадку високого споживання та низького відпуску

Перш за все, ми хочемо проаналізувати, чи є, і якщо є, то якою мірою, ризик дефіциту енергії є критичним для енергосистеми України у коротко-, середньо- та довгостроковій перспективі. Дефіцит – це така ситуація, коли попит на електроенергію перевищує обсяги пропозиції. Ми хотіли б наголосити на відмінності між структурним та тимчасовим дефіцитом енергії. У той час як перший є результатом нестачі потужностей, друга зазвичай спричинюється коливаннями перш за все відновлюваних потужностей, які не вдається збалансувати за допомогою традиційних електростанцій .

Ми хочемо проаналізувати, чи є структурний дефіцит енергії ризикованим для України. Як описано вище, енергетичні потужності ТЕС та АЕС складають кістяк енергосистеми України. Наявні потужності наразі перевищують максимальні навантаження, визначені попитом на електроенергію, більше ніж на 30% (див. Рис. 9). У короткостроковій перспективі наявні потужності здатні покрити пікові навантаження.

Рис. 9: Графік прогнозу потужностей для України

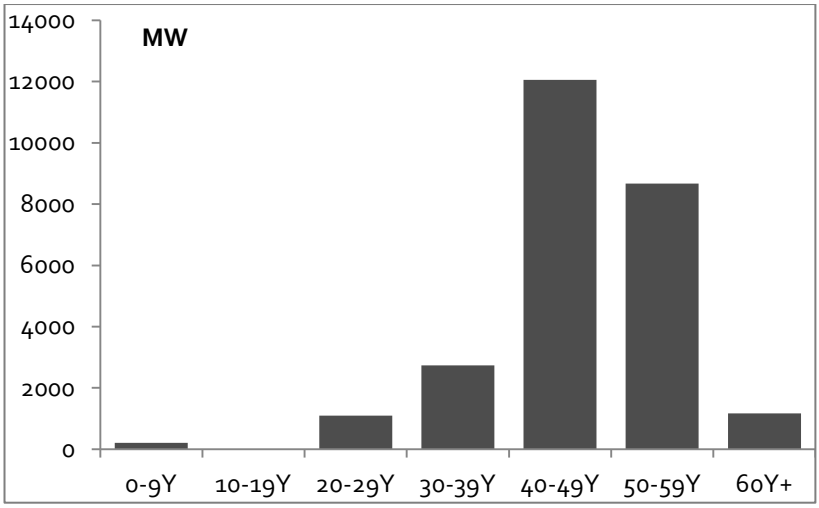


Джерело: Енергетична стратегія України до 2035, Савицький (2016) та базовий сценарій «Укренерго»

Однак, збільшення попиту (позначено вищими піковими навантаженнями) та зменшення придатних до використання традиційних енергетичних потужностей призведе до дисбалансу виробництва та попиту на енергію, починаючи із середини наступного десятиліття. Основною причиною цього дисбалансу є вікова структура потужностей ТЕС та АЕС, а також, меншою мірою, збільшення попиту на енергію.

Рис. 10 зображає структуру потужностей наявних ТЕС та АЕС в Україні в залежності від їх віку, на малюнку відображено близько 30% встановлених потужностей 2017 року. Середній вік представлених потужностей складає 47 років, задля порівняння – середні показники віку для електростанцій в Німеччині складають 27 років для станцій із кам'яним вугіллям і 30 для бурого вугілля, у США цей показник складає 39 років. Вік 85% встановлених ТЕС та ТЕЦ потужностей в Україні сягає понад 40 років. Таким чином, значна частина потужностей вже досягла межі реального строку експлуатації вугільних електростанцій, яка становить 40-45 років (Markewitz, Robinius and Stolten, 2018).

Рис. 10: Структура потужностей ТЕС та АЕС в залежності від віку



Джерело: Національний план дій щодо скорочення викидів; передбачається 40%ефективність генерації

Зазвичай, строк експлуатації електростанцій можна подовжити. Однак, чим більший вік цих потужностей, тим більше вони потребують коштів на утримання та проведення модернізації. Більше того, чим більший вік, тим більший ризик несподіваного виходу станції з ладу, що своєю чергою збільшує ризики дефіциту електроенергії.

Результат: Наявна кількість встановлених потужностей АЕС, ТЕС та великих гідроелектростанцій в Україні уможливлює належне забезпечення енергією, аби покрити пікові навантаження. Починаючи із середини наступного десятиліття, зростання попиту на енергію, так само як зниження обсягу енергетичних потужностей, обумовлене старінням електростанцій, підвищить ризики дефіциту електроенергії. Ці обставини необхідно врахувати при розробці нової енергетичної стратегії.

4 Висновки, рекомендації та огляд перспектив

Ми вважаємо що, *окрім потенційних проблем внаслідок дефіциту енергетичних потужностей чи відсутності ринку балансування енергії*, до енергосистеми України можна інтегрувати ВДЕ у межах до 15 ГВт встановлених потужностей. На нашу думку, надлишок чи дефіцит енергії не становлять ризиків у короткостроковій перспективі. Приблизно до 2025 року енергосистема України має бути здатна балансувати коливання відновлюваних джерел енергії або за допомогою наявних електростанцій, або шляхом скорочень.

Однак, Україні слід зосередитися на соціально-економічному, політичному та технологічному розвитку, що вплинуть на енергетичний сектор країни у майбутньому. Навіть якщо наразі забезпечення енергією є більш-менш стабільним, воно напряму залежить від «обраного шляху». Мається на увазі, що довгострокове використання основного капіталу в енергетичному секторі (електростанції, підстанції, мережі) може завадити майбутньому розвитку. Також у довгостроковій перспективі цей ризик неправильно обраного шляху може досить дорого коштувати.

Викладені нижче тренди створюють певні проблеми для енергетичного сектору України.

Зростання попиту на електроенергію та підвищення пікових навантажень, так само як структурні зміни в сфері попиту на електроенергію

Як описано вище, досить значний вік більшості електростанцій загрожує енергопостачанню в Україні. У той же час економічний підйом сприяє зростанню попиту на електроенергію та пікових навантажень. Більше того, структура попиту на електроенергію може змінюватися, зокрема, завдяки зростанню попиту на електротранспорт, розвитку «розумних» будинків та автоматизованого виробництва.

Технологічний прогрес потужностей відновлюваних джерел енергії

Завдяки технологічному прогресу витрати на генерацію енергії за допомогою відновлюваних джерел енергії суттєво зменшилися протягом останніх кількох років – і досить ймовірним є їхнє подальше зменшення у майбутньому. Більше того, нові технологічні розробки (такі як технологія «енергія-газ») продовжуватимуть пропонувати ще кращі рішення для того, аби забезпечити балансування енергії. Таким чином, наразі будівництво нових електростанцій на викопному паливі може стати на заваді розвитку більш ефективних з економічного боку відновлюваних джерел енергії у майбутньому.

Потреби у подальшій декарбонізації у генерації енергії

Не можна оминути того, що спроби міжнародної спільноти сприяти активнішому використанню стратегій скорочення викидів парникових газів в наступні десятиліття лише зростатимуть, особливо якщо викиди вуглецю продовжуватимуть збільшуватися. Ефективна підготовка до такого розвитку подій передбачає розвиток бачення різноманітних стратегій скорочення викидів в країні та аналіз макроекономічних витрат, що знадобляться для втілення їх у життя. Передчасне відкидання можливих опцій із метою зосередитися на викопно-паливних енергетичних потужностях дещо звужує простір діяльності та може призвести до використання другорядних за ефективністю варіантів.

Окрім зосередження на сфері енергетичної безпеки країни, відповідальні органи в Україні мають взяти до уваги довгострокові перспективи в енергетичній політиці. Це передбачає врахування усього обсягу соціо-економічних, політичних та технологічних змін, які можуть вплинути на енергетичний сектор в країні.

5 Джерела

Brookings (2018) 'Fixing wind curtailment with electric power system reform in China'. Available at: https://www.brookings.edu/research/fixing-wind-curtailment-with-electric-power-system-reform-in-china/.

Dzene, I. and Romagnoli, F. (2015) 'Assessment of the Potential for Balancing Wind Power Supply with Biogas Plants in Latvia', *Energy Procedia*, 72, pp. 250–255. doi: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.036.

Energywende team (2015) 'How is Germany integrating and balancing renewable energy today?' Available at: https://energytransition.org/2015/02/how-germany-integrates-renewable-energy/.

Joos, M. and Staffell, I. (2018) 'Short-term integration costs of variable renewable energy: Wind curtailment and balancing in Britain and Germany', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 86, pp. 45–65. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.009.

Makarovskiy, Y. and Zinych, V. (2013) 'WIND ENERGY POTENTIAL ASSESSMENT OF UKRAINE', *EEA technical report* .

Markewitz, P., Robinius, M. and Stolten, D. (2018) 'The Future of Fossil Fired Power Plants in Germany—A Lifetime Analysise', *Energies*, 11.

Mishra, P. M. (2017) *A COMPARISON ON DEVELOPMENT OF PUMPED STORAGE HYDROPOWER IN EUROPE AND ASIA*.

Rohrig, K. *et al.* (2011) *Flexible Stromproduktion aus Biogas und Biomethan*. Available at: https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2011/2011_Flexible_Stromproduktion_aus_Biogas_und_Biomethan.pdf.

SAEE (2018) *Ukraine: Energy efficency and renewable energy*. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine.

Savitsky, O. (2016) *Towards the energy transition in Ukraine*. Available at: http://www.succow-stiftung.de/tl_files/pdfs_downloads/MDF Working Paper/MDF Paper_ Energy_transition_UA_Oleg Savitsky.pdf.