

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної форми
здобуття вищої освіти

Миколаїв

2026

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 17.03.2026, протокол № 6

Укладачі:

Садовий Олексій Степанович - кандидат технічних наук, доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Мартиненко Володимир Олександрович - кандидат технічних наук, доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки;

Рецензенти:

Іванов Г. О. – доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін, кандидат технічних наук, доцент;

Рябенський В.М. – завідувач кафедри програмована електроніка, електротехніка і телекомунікації професор, доктр. тех. наук, Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова.

© Миколаївський національний аграрний університет, 2026

ЗМІСТ

Лекція 1. Структура курсу. Класифікація нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії. Термінологія й основні поняття дисципліни	6
Лекція 2. Використання відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії в комбінованих енергосистемах. Основні переваги та недоліки. Досяжні обсяги	10
Лекція 3. Вплив обсягів впровадження відновлюваних джерел енергії на потреби в маневрових потужностях об'єднаної енергосистеми	16
Лекція 4. Засоби підвищення надійності енергопостачання з нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії. Прогнозування як засіб забезпечення надійності	23
Лекція 5. Особливості прогнозування сонячної та вітрової енергії. Приклади прогнозування та досяжна точність	30
Лекція 6. Етапи та методи побудови атласів енергетичного потенціалу. Методологія розрахунку вітрового потенціалу. Залежність ефективності використання енергії відновлюваних джерел від кліматичних і географічних особливостей територій	39
Лекція 7. Основні характеристики та питомі енергетичні показники енергії вітру та сонячної радіації в різних кліматичних зонах світу та України	47
Лекція 8. Можливості сумісного використання вітрової та сонячної енергії. Застосування акумуляторів енергії як один із заходів підвищення надійності та стабільності енергопостачання	56
Лекція 9. Комплексне використання різнотипних ВДЕ. Можливості поєднання в одній енергосистемі	64

Лекція 10. Воднева енергетика, методи отримання водню із застосуванням відновлюваних джерел енергії. Оптимізація параметрів системи отримання водню	71
Лекція 11. Класифікація гібридних систем. Використання відновлюваних джерел енергії в гібридній енергосистемі	81
Лекція 12. Обмеження щодо рівнів впровадження вітрових та сонячних електростанцій до об'єднаної енергосистеми. Методи розрахунку досяжних рівнів впровадження	90
Лекція 13. Математичне моделювання комбінованої енергосистеми на базі вітрових електростанцій	99
Лекція 14. Особливості моделювання комбінованої енергосистеми, до якої входять сонячні електростанції	106
Лекція 15. Оптимізація комбінованих енергосистем з мінливими відновлюваними джерелами та з використанням акумуляування енергії	114
Лекція 16. Системи акумуляування енергії відновлюваних джерел. Комбіновані енергетичні системи на основі відновлюваних джерел з комплексним використання систем акумуляування енергії	122
Лекція 17. Фактори впливу відновлюваної енергетики на стійкість енергосистеми	132
Лекція 18. Моделі спільної роботи теплових та вітро-сонячних електростанцій. Вітро-дизельні та фото-дизельні електростанції	141
Список літератури	152

ВСТУП

Конспект лекцій з дисципліни «Альтернативні джерела енергії» підготовлено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 (денна форма).

Актуальність дисципліни зумовлена тим, що сучасне суспільство стикається з енергетичними та екологічними викликами: традиційні джерела енергії є обмеженими, а зростання споживання та вплив викидів (зокрема CO₂) підсилюють потребу в розвитку відновлюваних і нетрадиційних джерел.

Матеріал конспекту структуровано у вигляді 18 лекцій, які послідовно охоплюють: класифікацію ВДЕ та термінологію; застосування ВДЕ в комбінованих/гібридних енергосистемах; вплив ВДЕ на потребу в маневрових потужностях і надійність електропостачання; прогнозування сонячної та вітрової енергії; оцінювання енергетичного потенціалу (атласи потенціалу, клімато-географічні чинники); сумісне використання вітрової та сонячної енергії й акумулювання; водневу енергетику; обмеження рівнів інтеграції ВЕС/СЕС до ОЕС; математичне моделювання та оптимізацію комбінованих систем; вплив ВДЕ на стійкість енергосистеми; моделі спільної роботи теплових і вітро-сонячних електростанцій (вітро-дизельні та фото-дизельні схеми).

У конспекті подано базові визначення та підходи, зокрема поняття енергетичних ресурсів, первинної енергії, відновлюваних джерел енергії, а також категорії валового, технічного та економічного потенціалу ВДЕ. Для самоперевірки наприкінці щонайменше окремих тем наведено контрольні питання (приклад - після матеріалу Лекції 1).

Конспект призначений для систематизації лекційного матеріалу та підтримки самостійної роботи здобувачів під час вивчення тем альтернативної енергетики й інтеграції ВДЕ в енергосистеми.

Лекція 1

Тема: «Структура курсу. Класифікація нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії. Термінологія й основні поняття дисципліни»

План

1. Роль енергії в житті людства та історичні етапи освоєння джерел енергії
2. Основні поняття та термінологія дисципліни
3. Класифікація енергетичних ресурсів
4. Традиційні джерела енергії
5. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії
6. Альтернативні види палива
7. Вторинні енергетичні ресурси
8. Перспективи розвитку альтернативної енергетики

1. Роль енергії в житті людства та історичні етапи освоєння джерел енергії

Історія розвитку суспільства нерозривно пов'язана з історією енергетики. Першими джерелами енергії для людини були відновлювані ресурси – мускульна сила тварин, енергія вітру, річок та припливів. Значно пізніше людство почало використовувати запаси накопиченої природою енергії вугілля, нафти і газу, а згодом – енергію ядерного палива. Ці джерела називають традиційними джерелами енергії (ТДЕ) або первинними енергоресурсами (ПЕР).

Перехід від традиційного до альтернативного виду енергоресурсу відбувається тоді, коли постачання домінуючого типу енергії супроводжується зменшенням ресурсу та швидким зростанням цін на енергоносії. Наприклад, у пізньому середньовіччі вугілля стало альтернативою деревині через виснаження лісових ресурсів. У XIX столітті нафта замінила китовий жир після виснаження популяції китів.

2. Основні поняття та термінологія дисципліни

Енергетичні ресурси (джерела енергії) – це матеріальні об'єкти, в яких зосереджена енергія, придатна для практичного використання людиною.

Первинна енергія – це енергія, яка знаходиться у природних джерелах і може бути перетворена на електричну, теплову, механічну та хімічну енергію. Первинні енергоресурси – це природні ресурси, які не переробляли і не перетворювали.

Існує п'ять основних джерел енергії:

- сонячне випромінювання;
- рух та взаємне притягання Сонця, Землі і Місяця;
- теплова енергія ядра Землі, хімічних реакцій і радіоактивного розпаду в її надрах;
- ядерні реакції;
- хімічні реакції різноманітних речовин.

Перші три джерела є відновлюваними, два останніх – невідновлюваними.

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) – це потоки енергії, що постійно або періодично діють в природі. Всі енергетичні потоки ВДЕ поділяються на дві основні групи: пряма енергія сонячного випромінювання та її вторинні прояви (енергія вітру, гідроенергія, теплова енергія оточуючого середовища, енергія біомаси).

Валовий потенціал ВДЕ – середньорічна кількість енергії, що міститься у даному виді ВДЕ при повному її перетворенні у корисну енергію.

Технічний потенціал ВДЕ – частина валового потенціалу, перетворення якого у корисну енергію можливе при сучасному рівні розвитку технічних засобів та при дотриманні вимог захисту навколишнього середовища.

Економічний потенціал ВДЕ – частина технічного потенціалу, перетворення якого у корисну енергію економічно доцільно при поточному рівні цін на паливо, енергію, обладнання та послуги.

3. Класифікація енергетичних ресурсів

Енергетичні ресурси Землі, за класифікацією Світової енергетичної ради, поділяються на 16 видів та групуються за двома критеріями:

- за рівнем і масштабом освоєння: традиційні та нетрадиційні;
- за природою енергоутворення: відновлювані та невідновлювані.

Невідновлювані традиційні:

1. Вугілля (включаючи лігніт)
2. Сира нафта і природний газовий конденсат
3. Важкі нафти, горючі сланці, бітум
4. Природний газ
5. Ядерна енергія

Відновлювані традиційні: 6. Торф 7. Дрова 8. Гідроенергія 9. Енергія мускульної сили тварин та людей

Відновлювані нетрадиційні: 10. Біомаса (за винятком дров) 11. Сонячна енергія 12. Геотермальна енергія 13. Вітрова енергія 14. Енергія припливів 15. Енергія хвиль 16. Теплова енергія океану

4. Традиційні джерела енергії

До традиційних енергоресурсів належать всі джерела енергії, які є первинними джерелами сучасної енергетики: вугілля, нафта, природний газ, горючі сланці, ядерна енергія, а також торф, дрова, гідроенергія великих водотоків.

Категорії традиційних чи нетрадиційних ресурсів визначаються історично, мають географічні відмінності і характеризують не самі ресурси, а розвиток та розповсюдження технологій їх використання.

5. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії

До нетрадиційних енергоресурсів належать всі види відновлюваних джерел енергії: біомаса (за виключенням дров), сонячна енергія, геотермальна енергія, вітрова енергія, енергія припливів, хвиль, малих водотоків. Також до нетрадиційних відносять природний газ малих родовищ, попутний нафтовий газ, промислові гази, метан вугільних родовищ.

Вітроенергетика – сукупність засобів перетворення енергії вітру в електричну енергію. Вітроустановки поділяють на три групи: малої (до 100 кВт), середньої (до 1 МВт) і великої (понад 1 МВт) потужності.

Сонячна енергетика – основана на перетворенні прямого сонячного випромінювання на теплову та електричну енергію. Поділяється на теплоенергетику, теплоелектроенергетику та фотоенергетику.

Гідроенергетика використовує потенціальну та кінетичну енергію води. За нормативами ООН до малої гідроенергетики відносять ГЕС потужністю до 30 МВт: мікро-ГЕС (до 100 кВт), міні-ГЕС (до 1 МВт), малі ГЕС (від 1 до 30 МВт).

Геотермальна енергія – енергія тепла Землі. Основним джерелом є постійний потік теплоти з розжарених надр, який перетворюється геотермальними станціями у теплову та електричну енергію.

Біомаса – сукупність організмів в екологічній системі. Основну частину становить фітобіомаса (97–99%), частка зообіомаси – 1–3%. Спалювання становить близько 80% від загальносвітових обсягів використання біомаси.

Теплові насоси використовують низькопотенційну теплову енергію навколишнього середовища (води, ґрунту, повітря) та теплові відходи промислових підприємств. Цей напрям більше відноситься до енергозбереження.

6. Альтернативні види палива

Альтернативне паливо – паливо, яке можна використовувати замість основних палив у теплових установках. Застосування зумовлене економічними, ресурсними та екологічними чинниками.

Синтетичне паливо з вугілля. Створення промислової технології отримання рідких палив на базі запасів вугілля має велике значення. Розроблені процеси швидкісного піролізу, гідрогенізації і термічного розчинення значно розширяють масштаби комплексної переробки вугілля.

Горючі сланці видобуваються та переробляються у Росії, КНР, Бразилії, США, Марокко, Австралії. Переробка передбачає термічний розклад з отриманням синтетичних палив та побічних продуктів – сірки, аміаку, коксу.

Бітумінозні породи – комплексна органо-мінеральна сировина, яка при термічному впливі виділяє органічну складову (замінник нафти), а мінеральні залишки є сировиною для будівельної індустрії.

Спиртові палива (метанол, етанол) використовуються як компоненти моторних палив. В екологічному відношенні вони більш прийнятні, ніж синтетичний бензин. Бразилія є другим за величиною в світі виробником етанолу після США.

Воднева енергетика. Водень здатний замінити викопне паливо в авіації, автотранспорті, комунально-побутовому секторі. Основна сировина для виробництва – природний газ (понад 90%). У перспективі основним джерелом стане вода шляхом електролізу або використання тепла високотемпературних ядерних реакторів.

Технологічні супутні гази утворюються в значних обсягах під час технологічних процесів у металургії, нафтохімії. У чорній металургії утворюються доменний, конверторний, коксовий, феросплавний гази. Повне використання цих газів могло б заощадити значні обсяги основного палива.

Метан вугільних родовищ. За запасами займає третє місце після вугілля та природного газу. Україна посідає четверте місце у світі за цим показником. Використання шахтного метану зменшує залежність від імпорту енергоносіїв та викиди парникових газів.

7. Вторинні енергетичні ресурси

Вторинні енергетичні ресурси поділяються на три групи:

- горючі – хімічна енергія відходів технологічних процесів;
- теплові – теплота відхідних газів, води й повітря для охолодження агрегатів, теплота виробів і відходів виробництва;
- надлишкового тиску – потенційна енергія газів, рідин і сипучих тіл з надлишковим тиском.

8. Перспективи розвитку альтернативної енергетики

Сучасне суспільство зіткнулося з енергетичними проблемами. Всі традиційні джерела енергії обмежені, особливо при постійно зростаючих потребах. Людство шукає нові джерела енергії з простотою видобутку, дешевизною транспортування, екологічною чистотою та відновлюваністю.

Не менш важливою причиною освоєння альтернативних джерел є екологічні проблеми, зокрема глобальне потепління. Двоокис вуглецю (CO_2), що вивільняється при спалюванні вугілля, нафти і бензину, створює парниковий ефект. Австрійські вчені з'ясували, що людська діяльність впливає на зміни клімату в 170 разів більше, ніж природні фактори.

Вуглеводнева сировина залишається основним джерелом енергоресурсів у світі, але вирішальна роль у сучасному балансі вуглецю належить людському фактору. Відновлювані джерела енергії можуть бути вироблені базовим обладнанням з використанням природних процесів, що є їх перевагою перед викопним паливом.

Перспективними напрямками є: вуглецево-нейтральні синтетичні палива, целюлозний етанол, технології використання навколишньої енергії через теплові насоси, комплексна переробка різних видів біомаси.

Контрольні питання

1. Які джерела енергії були першими для людства та як змінювалась енергетика історично?
2. Дайте визначення первинної енергії та первинних енергоресурсів.
3. Перелічіть п'ять основних джерел енергії та вкажіть, які з них є відновлюваними.
4. Що таке валовий, технічний та економічний потенціал ВДЕ?
5. Наведіть класифікацію енергетичних ресурсів Світової енергетичної ради.
6. Які джерела енергії відносять до традиційних та нетрадиційних?
7. Охарактеризуйте основні види нетрадиційних відновлюваних джерел енергії.
8. Що таке альтернативне паливо та які його види ви знаєте?
9. Назвіть три групи вторинних енергетичних ресурсів.
10. Які екологічні проблеми зумовлюють необхідність розвитку альтернативної енергетики?

Лекція 2

Тема: «Використання відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії в комбінованих енергосистемах. Основні переваги та недоліки. Досяжні обсяги впровадження»

План

1. Фактори використання ВДЕ в енергосистемах
2. Переваги відновлюваних джерел енергії

3. Недоліки відновлюваних джерел енергії
4. Мінливість генерації ВДЕ та її вплив на енергосистему
5. Екологічні аспекти використання ВДЕ
6. Технічний та практично реалізований потенціал ВДЕ
7. Досяжні рівні впровадження ВДЕ в Україні та ЄС
8. Критерії сталості виробництва біопалива
9. Технічні обмеження інтеграції ВДЕ
10. Шляхи подолання мінливості ВДЕ

1. Фактори використання ВДЕ в енергосистемах

Зростаючі навантаження на навколишнє середовище від традиційної енергетики, промисловості та транспорту привели до гострої необхідності інтеграції енергетичної, екологічної та соціально-економічної політики. Використання відновлюваних джерел енергії в конкретних енергосистемах обумовлюється наступними факторами:

- рівнем забезпечення регіону традиційними і відновлюваними джерелами енергії з урахуванням їх потенціалу;
- кліматичними та метеорологічними умовами;
- структурою систем постачання та використання енергії;
- вимогами до якості електричної та теплової енергії;
- типом та параметрами навантаження;
- вимогами до погодинного графіка енергопостачання;
- економічними та екологічними факторами.

2. Переваги відновлюваних джерел енергії

Відновлювані джерела енергії мають значні переваги порівняно з традиційними:

- а) Практично невичерпні ресурси – постійно поновлюються від первинних джерел, що забезпечує довгострокову енергетичну безпеку.

б) Екологічна чистота – не забруднюють навколишнє середовище тепловими та хімічними викидами, що критично важливо для боротьби зі зміною клімату.

в) Відсутність необхідності в транспортуванні палива – під час використання ВДЕ відпадає необхідність у видобуванні, переробці та транспортуванні первинних енергоносіїв (вугілля, нафти, газу).

г) Зменшення водоспоживання – не потрібно використовувати великі обсяги води для охолодження в теплоенергоустановках, збирати та транспортувати золу і продукти горіння.

д) Зменшення обслуговуючого персоналу – автоматизовані системи ВДЕ потребують значно меншої кількості працівників.

е) Децентралізація енергопостачання – джерела енергії максимально наближені до місць споживання, що зменшує втрати при транспортуванні.

3. Недоліки відновлюваних джерел енергії

Незважаючи на численні переваги, ВДЕ мають суттєві недоліки, що гальмують їх широке впровадження:

а) Низька густина енергії – енергетичний потік через одиницю площі є дуже малим. Для сонячних, вітрових і геотермальних установок густина енергії становить менше одного кіловата на квадратний метр, тоді як у сучасних котлах та ядерних реакторах вона у тисячі разів більша.

Для виробництва однакової кількості теплової енергії сонячною установкою порівняно зі звичайною котельною необхідні розміри у 300 разів більші, а для виробництва електроенергії вітровою установкою порівняно з АЕС – у 2500 разів більші. Це призводить до значної металоємності та займання великих територій.

б) Мінливість енергетичного потенціалу – дискретність та періодичність надходження енергії, змінність потужності в часі та географії використання створюють складності в забезпеченні стабільного енергопостачання споживачів.

в) Висока собівартість енергії – наявність суттєвих інженерно-технічних проблем у створенні ефективних технологій призводить до високої вартості виробленої енергії, хоча ця різниця поступово зменшується.

г) Потреба в резервних потужностях – у періоди відсутності енергії ВДЕ необхідні регулюючі потужності на основі традиційних енергосистем або систем акумулювання енергії.

4. Мінливість генерації ВДЕ та її вплив на енергосистему

Одним з найбільших викликів при інтеграції ВДЕ є їх мінливість. Потужність вітрових електростанцій змінюється залежно від швидкості вітру, яка може коливатись від нуля до максимальних значень протягом доби. Сонячні електростанції генерують енергію тільки в світлий час доби, а їх потужність залежить від хмарності та пори року.

Характеристики мінливості:

- Вітрова енергія має річну, сезонну та денну мінливість;
- Сонячна енергія має передбачувану добову циклічність, але непередбачувану хмарність;
- Інтенсивність сонячної радіації змінюється залежно від пори року та географічної широти.

Вплив на енергосистему: Можлива ситуація, коли генерація ВДЕ перевищує споживання, що призводить до від'ємного навантаження та ускладнює роботу операторів енергосистеми через зустрічні потоки електроенергії. Найбільш несприятливою є ситуація одночасного зростання потреб та зниження генерації ВДЕ. Натомість синхронна зміна генерації та споживання не створює негативного впливу і розвантажує традиційну генерацію.

5. Екологічні аспекти використання ВДЕ

Хоча ВДЕ вважаються екологічно чистими, масштабне використання має певні екологічні наслідки:

Біомаса: Для задоволення поточного попиту енергії виключно біомасою потрібно використати понад 10% поверхні суші Землі. Люди вже відповідальні за 30-40% пов'язаного з фотосинтезом вуглецю в світі. Розширення збору біомаси може спричинити стрес для екосистем та зникнення видів тварин через позбавлення джерел їжі.

Гідроелектростанції: Затоплення земель для водосховищ руйнує ліси, місця проживання диких тварин, сільськогосподарські землі. На рівнинах ГЕС

займають значно більші площі – для Valbina у Бразилії затоплено 2360 км² для 250 МВт (більше 800 га/МВт), тоді як 10 МВт ГЕС у горах займає менше 1 га. Греблі змінюють міграційні шляхи риби, режим течії, температуру та вміст кисню у воді.

Вітрові електростанції: Для забезпечення 100% попиту на енергію в США потрібно близько 80 млн гектарів (більше 40% сільськогосподарських угідь). Основний вплив пов'язаний з землекористуванням та смертністю птахів і кажанів. Проблема вирішується можливістю подвійного використання території для сільського господарства.

Геотермальна енергетика: Гаряча вода часто містить високі рівні сірки, солі та інших домішок. Системи з відкритим контуром виділяють сірководень, діоксид вуглецю, аміак, метан, хоча викиди діоксиду сірки у 30 разів нижчі, ніж у вугільних ТЕС. Викачування води може викликати осідання ґрунту та збільшити частоту землетрусів.

Сонячна енергетика: Загальні потреби в землі для мережевих фотоелектричних станцій становлять від 1,4 до 4 га/МВт, для теплових – від 1,6 до 6,6 га/МВт. Небезпечні матеріали використовуються для очищення напівпровідників (соляна, сірчана, азотна кислоти). Тонкоплівкові фотоелементи містять токсичні матеріали: арсенід галію, кадмій-телурид, які потребують належної утилізації.

6. Технічний та практично реалізований потенціал ВДЕ

Технічний потенціал ВДЕ оцінюється в 150 ПВт·год/рік, при цьому практично реалізований становить близько третини:

Вид енергії	Технічний потенціал (ПВт·год/рік)	Практично реалізований (ПВт·год/рік)
Сонячна	50	10
Гідравлічна	30	15
Вітрова	30	15
З органічних відходів	25	10
Температурний градієнт океану	10	0-10
Геотермальна	4	2

7. Досяжні рівні впровадження ВДЕ в Україні та ЄС

Європейський Союз: Директива ЄС 2008 року встановила обов'язкову ціль досягнення 20% ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії. Розподіл квот між країнами враховує стартові умови та економічний розвиток. У 2017 році частка ВДЕ в ЄС досягла 17,5% порівняно з 8,5% у 2004 році.

Україна: Національна індикативна ціль на 2020 рік – 11% ВДЕ у кінцевому енергоспоживанні. Фактично досягнуто:

- Опалення та охолодження – 9,3% (план 12,4%);
- Електроенергетика – 13,9% (план 11%);
- Транспортний сектор – 2,5% (план 10%);
- Загальна частка – 9,2%.

Національний план до 2030 року передбачає досягнення 27% ВДЕ у загальному кінцевому енергоспоживанні, зокрема:

- Частка ВДЕ в електрогенерації – 25%;
- У тепlopостачанні до 2025 року – 30%, до 2035 року – 40%;
- У транспорті до 2030 року – не менше 14%.

Прогнозні показники виробництва електроенергії з ВДЕ в Україні до 2030 року:

- ГЕС (малі та великі) – 7715 ГВт·год (5108 МВт);
- Геотермальна енергія – 100 ГВт·год (20 МВт);
- Сонячні ФЕС – 10542 ГВт·год (9947 МВт);
- Вітрові станції – 15251 ГВт·год (5033 МВт), включаючи офшорні;
- Біомаса – 6633 ГВт·год (1533 МВт);
- Всього з ВДЕ – 40241 ГВт·год (21641 МВт).

Станом на жовтень 2019 року частка ВДЕ у виробництві електроенергії в Україні становила 3,6%, приріст потужностей за рік перевищив 107%.

8. Критерії сталості виробництва біопалива

Директива ЄС встановлює обов'язкові критерії сталості для біопалива:

Викиди парникових газів: Біопалива повинні гарантувати зменшення викидів щонайменше на 35% (50% з 2017 р., 60% з 2018 р.) порівняно з викопним паливом протягом повного життєвого циклу.

Обмеження землекористування: Заборонено виробництво сировини на територіях:

- цінних для збереження біорізноманіття (заповідні території, праліси);
- торфовищ;
- що є важливими накопичувачами вуглецю (водно-болотні угіддя, лісисті території).

Соціальні критерії: Забезпечення належних умов праці та прав людини у виробництві біопалива.

Звітність: Компанії, що продають біопаливо в ЄС, повинні довести через незалежний аудит відповідність критеріям сталості. Біопаливо, що не відповідає критеріям, не може отримати фінансової підтримки.

9. Технічні обмеження інтеграції ВДЕ

Виробництво електроенергії з вітру та сонця критикують за мінливість, проте це стосується не всіх ВДЕ і залежить від багатьох факторів.

Фактор потужності:

- Фотоелектричні станції – 10-20% від номінальної потужності;
- Наземні вітрові станції – 20-35%;
- Офшорні вітрові станції – до 45%.

Це означає необхідність встановлення більшої загальної потужності для досягнення потрібної середньорічної генерації.

Робочі діапазони:

- Вітрові турбіни не працюють при швидкості вітру менше 2,5 м/с;
- При швидкості понад 25 м/с турбіни гальмуються для уникнення пошкоджень;
- Сонячні станції залежать від кількості світлової енергії, яка змінюється протягом дня та сезонів.

Для значної кількості турбін на великій території середня потужність стає менш змінною, що полегшує інтеграцію в енергосистему.

10. Шляхи подолання мінливості ВДЕ

Міжнародне енергетичне агентство та провідні дослідження не виявили жорсткої технічної межі щодо інтеграції ВДЕ. Частка 20-50% змінних ВДЕ вже

реалізована в ряді європейських систем. Більше 200 міжнародних досліджень підтверджують можливість інтеграції до 30% і більше ВДЕ без технічних бар'єрів.

Ключові стратегії:

а) Диверсифікація джерел: Поєднання різних типів ВДЕ (вітер, сонце, гідро, геотермальна) забезпечує компенсацію мінливості – коли одне джерело дає мало енергії, інше працює ефективно.

б) Географічна диверсифікація: Розміщення станцій у різних локаціях зменшує ризик одночасного зниження генерації через погодні умови.

в) Прогнозування: Використання стандартних методів прогнозування погоди для передбачення генерації вітрової та сонячної енергії дозволяє заздалегідь планувати роботу енергосистеми.

г) Інтеграція з керованими джерелами: Гідроелектростанції можуть швидко заповнювати прогалини в генерації, геотермальні станції забезпечують стабільну базову потужність.

д) Системи акумулювання: Накопичувачі енергії (батареї, гідроакumuлюючі станції) згладжують коливання генерації та споживання.

е) Управління попитом: Гнучке реагування споживачів на зміни в генерації допомагає балансувати енергосистему.

ж) Високоманеврові потужності: Створення резервних потужностей з можливістю швидкого запуску для компенсації просідань генерації ВДЕ.

Міжурядова група експертів ООН зі зміни клімату визначила у 2011 році, що при урядовій підтримці та використанні повного набору технологій ВДЕ постачання енергії з відновлюваних джерел може скласти майже 80% світового споживання протягом 40 років. Необхідні інвестиції коштуватимуть близько 1% світового ВВП на рік і дозволять знизити викиди парникових газів до безпечного рівня.

Контрольні питання

1. Які фактори обумовлюють використання ВДЕ в конкретних енергосистемах?

2. Перелічіть основні переваги відновлюваних джерел енергії порівняно з традиційними.
3. Які суттєві недоліки ВДЕ гальмують їх широке впровадження?
4. Що таке мінливість генерації ВДЕ і як вона впливає на роботу енергосистеми?
5. Охарактеризуйте екологічні наслідки масштабного використання різних видів ВДЕ.
6. Який технічний та практично реалізований потенціал основних видів ВДЕ?
7. Які досяжні рівні впровадження ВДЕ встановлено для України на 2030 рік?
8. Які обов'язкові критерії сталості виробництва біопалива визначено Директивою ЄС?
9. Що таке фактор потужності і які його значення для різних типів ВДЕ?
10. Назвіть основні стратегії подолання мінливості відновлюваних джерел енергії.

Лекція 3

Тема: «Вплив обсягів впровадження відновлюваних джерел енергії на потреби в маневрових потужностях об'єднаної енергосистеми»

План

1. Світові проекти з досягнення високих рівнів споживання ВДЕ
2. Проблеми інтеграції ВДЕ в енергосистеми
3. Стадії впровадження ВДЕ та їх вплив на енергосистему
4. Способи забезпечення надійності систем з високою часткою ВДЕ
5. Стандартизація та правила приєднання ВДЕ
6. Гнучкість енергосистеми як ключовий параметр
7. Вторинний резерв потужності
8. Сценарії розвитку ВДЕ в Україні
9. Високоманеврові потужності та системи прогнозування
10. Економічні аспекти балансування енергосистеми

1. Світові проекти з досягнення високих рівнів споживання ВДЕ

Станом на 2018 рік у світі нараховувалося близько 150 запланованих та реалізованих проектів повного переходу на ВДЕ. Вони охоплюють різні категорії: міські, регіональні, державні проекти, ініціативи у житловому фонді та бізнесі.

Приклади національних стратегій:

Данія планує до 2035 року досягти 100% виробництва теплової та електричної енергії з ВДЕ та 100% енергії з ВДЕ в усіх секторах до 2050 року.

Ісландія вже досягла 100% виробництва електроенергії та 85% теплової енергії з ВДЕ, використовуючи переважно геотермальну та гідроенергетику.

Шотландія поставила мету досягти 100% електроенергії та 30% загальної потреби в енергії до 2020 року. У 2018 році частка "чистих" джерел становила 74,6%. У період з січня по липень 2019 року Шотландія виробила 9,8 млрд кВт·год енергії від вітроенергетики, чого достатньо для забезпечення 182% всіх шотландських будинків. Країна планує відмовитись від бензинових і дизельних двигунів до 2032 року.

Німеччина у 2020 році виробила 246 ТВт·год електроенергії з ВДЕ, їх частка перевищила 50% загального виробництва. Вітроенергетика стала найбільшим джерелом виробництва з часткою 27%. Разом з сонячною енергетикою вітрові станції виробили більше електроенергії, ніж вугільні, газові та нафтові електростанції. Це підтверджує, що велика енергосистема може функціонувати з надзвичайно високою часткою змінних ВДЕ, забезпечуючи надійне постачання споживачів.

Міські ініціативи:

За даними CDP Global (2019 р.), з 620 міст понад 100 отримують щонайменше 70% електроенергії з відновлюваних джерел. 275 міст використовують гідроенергію, 189 – вітрову, 184 – сонячну фотоелектрику. У США близько 58 міст взяли зобов'язання перейти на 100% відновлювані джерела.

Копенгаген планує повну декарбонізацію до 2025 року. Наразі 98% населення отримують теплову енергію з твердих побутових відходів та біомаси.

Глобальні прогнози:

Вчені Стенфордського університету створили модель світової енергосистеми, яка до 2050 року функціонуватиме виключно на ВДЕ. Модель

передбачає, що до 2030 року 80% світової енергії вироблятиметься відновлюваними джерелами, до 2050 року – 100%. Структура генерації: сонячна енергетика – 57,55%, вітроенергетика – 37,14%, гідроенергетика – 4%, інші – близько 1,3%. Загальна потужність становитиме 46,2 терават плюс 6 тисяч ГВт додаткових пікових потужностей та накопичувачів. Необхідні інвестиції оцінюються в 125 трильйонів доларів США.

2. Проблеми інтеграції ВДЕ в енергосистеми

Інтеграція відновлюваних джерел енергії спричинила виникнення проблем зі стабільністю мережі. Спочатку з такими проблемами зіткнулися країни з високим рівнем впровадження ВДЕ, зокрема Німеччина.

Коливання напруги викликають проблеми для чутливого обладнання. Зафіксовано випадок, коли алюмінієвий завод у Гамбурзі був змушений зупинитися через те, що напруга електромережі ослабла за мілісекунди. За три роки кількість відмов зросла на 31%, майже половина призвела до зупинок виробництва.

Стрибки потужності ВЕС при різких перепадах швидкості вітру є значними. За даними Міжнародної енергетичної агенції, для ВЕС в екстремальних умовах зафіксовано стрибки потужності зі швидкістю 10-35% номінальної за годину (окремі значення – до 40%), проте середній темп змін – 5% за годину. За одну хвилину максимальні зміни становлять 0,5-0,8% номінальної потужності.

Приклади екстремальних перепадів потужності:

- Данія: 2000 МВт (83% загальної потужності) зниження за 6 годин;
- Німеччина: понад 4000 МВт (58% потужності) зниження протягом 10 годин;
- Ірландія: 338 МВт (68% потужності) за 12 годин;
- Португалія: 700 МВт (60% потужності) зниження за 8 годин;
- Іспанія: 1000 МВт (9% потужності) зниження за 1 годину 45 хвилин.

У Китаї технічні правила передбачають, що для потужностей до 30 МВт допустимі коливання не перевищують 6 МВт за годину (в межах 20% номінальної потужності).

Згідно зі світовим досвідом, при високому рівні ВДЕ (понад 1 ГВт) певну частку виробленої відновлюваної електроенергії енергосистема може поглинати практично без складнощів. Здебільшого порогова величина оцінюється як 10% від загального споживання електроенергії для країн зі слабкою інтегрованістю енергосистеми.

3. Стадії впровадження ВДЕ та їх вплив на енергосистему

За дослідженнями Міжнародної енергетичної агенції виділяють чотири стадії впровадження мінливих ВДЕ:

Стадія 1: $EVRE < 3-5\%$ (кВт·год) Інтеграція мінливих ВДЕ не робить помітного впливу на мережу. Нестабільна генерація ВЕС і СЕС перебуває в межах щоденних природних змін попиту на електроенергію.

Стадія 2: $EVRE = 3-15\%$ (кВт·год) ВДЕ починають серйозно впливати на систему, але цей вплив регулюється відносно просто удосконаленням методів управління, наприклад прогнозуванням виробітку ВЕС та СЕС.

Стадія 3: $EVRE = 15-25\%$ (кВт·год) Суттєві виклики для енергосистеми. Вплив відчувається як на рівні системи в цілому, так і на роботі традиційних електростанцій. На перше місце виходить гнучкість енергосистеми – її здатність реагувати на мінливість балансу попиту і пропозиції. Головні ресурси: керовані маневрені електростанції, управління попитом та нові технології накопичення енергії.

Стадія 4: $EVRE = 25-50\%$ річного виробітку з підвищеннями до 100% добового споживання. Виклики носять високотехнологічний характер. Потрібна ще більша гнучкість системи та здатність до самовідновлення після різких і об'ємних коливань генерації.

4. Способи забезпечення надійності систем з високою часткою ВДЕ

Експерти визначають сім способів проектування та експлуатації систем зі змінними ВДЕ для надійного задоволення попиту:

1) Географічна диверсифікація: Генерація географічно рознесена, змінні джерела енергії (вітер, сонце, хвилі, припливи) значно згладжують подачу електроенергії.

2) Стабільні джерела енергії: Використання гідроелектростанцій, геотермальної енергії для заповнення тимчасових проміжків між попитом і генерацією.

3) Управління попитом: "Розумне" управління для перенесення гнучких навантажень на час доступності більшої кількості відновлюваних джерел.

4) Накопичення енергії: Акумуляторні батареї, газоподібний водень, розплавлені солі, стиснене повітря, ГАЕС, маховики для подальшого використання.

5) Оптимізація потужностей: Мінімізація часу, коли ВДЕ генерують менше поточного попиту, використання вільних потужностей для виробництва водню.

6) Акумулятори електромобілів: Накопичення електроенергії в "мережевих транспортних засобах".

7) Прогнозування погоди: Для кращого планування потреб енергопостачання на основі прогнозів вітру, сонця, хвиль, припливів і опадів.

5. Стандартизація та правила приєднання ВДЕ

Наприкінці 1980-х років компанії розподільчих мереж Європи почали використовувати невеликі ВЕУ та ВЕС. Протягом 1990-х років правила приєднання було узгоджено на національному рівні у Німеччині, Данії та інших країнах.

Міжнародні стандарти:

- IEC 61400-21: Вимірювання та оцінка якісних характеристик енергії ВЕУ, підключених до мережі;
- IEEE 519: Режими роботи і вимоги для гармонійного контролю в електроенергетичних системах;
- IEEE 1001: Керівництво з установами зв'язку між об'єктами розсіяного зберігання та генерації і енергосистемою.

В Україні прийнято СОУ НЕК 341.001:2019 "Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з ОЕС України". Вимоги поширюються на ВЕС та СЕС згідно з класифікацією:

- Тип А: до 1 МВт включно, напруга нижче 110 кВ;
- Тип В: від 1 до 20 МВт, напруга нижче 110 кВ;

- Тип С: від 20 до 75 МВт, напруга нижче 110 кВ;
- Тип D: понад 75 МВт або напруга 110 кВ і вище.

Сучасні ВЕС можуть виконувати системні функції: контроль частоти, напруги та реактивної потужності; підтримання балансу потужності; участь у вторинному регулюванні. Це стало можливим завдяки застосуванню перетворювальної силової електроніки.

6. Гнучкість енергосистеми як ключовий параметр

У доповіді DNV GL (грудень 2017) підкреслюється важливість гнучкості для енергетичних ринків майбутнього. Під гнучкістю розуміється "послуга, яка дає можливість електроенергетичній системі реагувати на коливання та невизначеність попиту та пропозиції, підтримуючи стабільну та безпечну роботу".

Фактори, що вимагають гнучкості:

- Швидкий розвиток відновлюваної енергетики (великих та малих розподілених об'єктів);
- Зростання виробництва електроенергії в цілому;
- Електрифікація транспорту, секторів тепло- і холодопостачання.

Гнучкість забезпечується не тільки накопичувачами енергії, але й управлінням попитом та посиленням мережевого господарства.

Важливий висновок: Збільшення обсягів мінливих ВДЕ не потребує істотного збільшення балансуєчого резерву. На прикладі Німеччини показано, що зростання встановленої потужності ВДЕ майже втричі в період 2008-2014 років супроводжувалося зниженням балансуєчого резерву і відповідних витрат.

Показник SAIDI (середній час непланових перерв на одного споживача в рік) для Німеччини знизився майже вдвічі з 2006 року, незважаючи на значне збільшення частки ВДЕ. Країни з найвищою часткою мінливої генерації (Данія, Німеччина) володіють найнадійнішими енергосистемами.

7. Вторинний резерв потужності

Первинне регулювання забезпечує стабільність частоти змінного струму. ВЕС та СЕС практично не залучені до цього процесу, оскільки їх використовують як безпаливне джерело без обмежень. Термін помітних змін потужності ВЕС –

декілька хвилин, часовий проміжок суттєвого впливу – декілька годин. Це сфера відповідальності вторинного резерву.

Завдання вторинного регулювання:

- Зміна активної потужності спеціально виділених електростанцій для компенсації небалансу;
- Ліквідація перевантаження транзитних зв'язків;
- Відновлення частоти і заданих зовнішніх перетоків;
- Відновлення резервів первинної регулюючої потужності.

Розрахунок резерву в Україні:

Величина мінімального резерву вторинного регулювання R визначається за формулою: $R = a\sqrt{P_{\text{макс}}} + b^2$, де $P_{\text{макс}}$ – максимум навантаження (МВт), $a=10$ МВт, $b=150$ МВт.

При максимальному споживанні близько 25-32 ГВт розрахунковий рівень вторинного резерву в Україні становить $R=435$ МВт.

Для ОЕС України діапазон вторинного регулювання:

- На завантаження – 1000 МВт;
- На розвантаження – 500 МВт.

Наявність ВЕС та СЕС не впливатиме на величину необхідного резерву, поки потужність окремої станції не перевищуватиме 1000 МВт. Однак на практиці при значному рівні інтегрування їх вплив пом'якшують запровадженням додаткових резервних потужностей для компенсації коливань при змінах швидкості вітру та інсоляції.

8. Сценарії розвитку ВДЕ в Україні

За результатами дослідження НЕК "Укренерго" (початок 2018 р.) лише 3 тис. МВт потужності СЕС та ВЕС може прийняти енергосистема без ризику розбалансування. Водночас видано технічних умов на приєднання до 2025 року удвічі більше (7,5 тис МВт).

Станом на час дослідження встановлена потужність становила 1353 МВт (ВЕС – 512 МВт, СЕС – 841 МВт), що мало впливало на баланс. Відсутність системи прогнозування не дозволяла точно передбачати рівень генерації. У

дослідженні закладалася похибка прогнозування близько 30% при нормативі 50%.

До 2025 року ОЕС може розвиватися за трьома сценаріями:

Сценарій А: Не вводяться додаткові високоманеврові потужності, вимушено обмежується виробництво електроенергії з ВДЕ.

Сценарій В: Обмежується частка АЕС, збільшується частка вугільної генерації для забезпечення маневрових потужностей, не обмежується розвиток "зеленої" генерації.

Сценарій С (оптимальний): Забезпечується розвиток "зеленої" генерації при впровадженні системи точного прогнозування та будівництві 2,5 тис. МВт нових високоманеврових балансуєчих потужностей.

9. Високоманеврові потужності та системи прогнозування

"Укренерго" пропонує третій варіант як найоптимальніший з точки зору збалансованості інтересів споживача і розвитку ВДЕ.

Складові плану С:

Високоманеврові потужності: Введення 2,5 тис. МВт нових потужностей дозволить уникнути збільшення генерації на ТЕС, обмеження генерації з ВДЕ та АЕС, стримати зростання тарифів. Найоптимальнішим є будівництво газопоршневих електростанцій з 10-хвилинним періодом виходу на повну потужність та акумуляторів для швидкого регулювання відхилень всередині години.

Система точного прогнозування: Впровадження системи з відхиленням:

- На ринку на добу наперед – 5-10%;
- Внутрішньодобове планування – 3-5%.

Відсутність такої системи коштуватиме споживачеві не менше 400 млн грн щорічно при 7,5 тис. МВт потужностей ВДЕ. Коли враховується 4-годинний прогноз роботи вітроенергетики, збільшення потреб у короткостроковому резерві досягає 9-10% від встановленої потужності ВЕС. При 10% впровадження це призводить до резервних вимог на рівні 15% потужності ВЕС, при 20% – 18%.

10. Економічні аспекти балансування енергосистеми

Вартість будівництва високоманеврових потужностей (2,5 тис. МВт) оцінюється близько 55 млрд грн, термін окупності – близько шести років. За оцінками, це дозволить заощадити споживачам близько 65 млрд грн щорічно за рахунок мінімізації зростання тарифу на електроенергію.

Переваги відновлюваної енергетики:

ВДЕ підвищують енергетичну безпеку для бідних на енергію районів, знижують залежність від зовнішніх джерел палива та волатильності світових ринків. Вони децентралізують енергопостачання і мінімізують необхідність виробництва, транспортування та зберігання небезпечних видів палива. Надійність підвищується за рахунок виробництва енергії близько до споживача – випадкове відключення зачіпає меншу кількість потужності, ніж збої великої станції.

Досвід країн ЄС:

Більшість штатів США, Канада, Бразилія, Китай не нараховують плату за приєднання до електромереж – компенсація здійснюється через цінову і тарифну політику. Країни-члени ЄС створюють економічно вигідні умови роботи ВДЕ, забезпечують схеми вільного використання електроенергії з ВДЕ.

Міжнародне енергетичне агентство та провідні дослідження не виявили жорсткої технічної межі інтеграції ВДЕ. Частка 20-50% змінних ВДЕ вже реалізована в ряді європейських систем. При урядовій підтримці постачання енергії з ВДЕ може скласти майже 80% світового споживання протягом сорока років при інвестиціях близько 1% світового ВВП на рік.

Контрольні питання

1. Наведіть приклади країн та міст, які досягли високих рівнів споживання ВДЕ.
2. Які основні проблеми виникають при інтеграції ВДЕ в енергосистеми?
3. Охарактеризуйте чотири стадії впровадження мінливих ВДЕ за дослідженнями МЕА.
4. Назвіть сім способів забезпечення надійності систем з високою часткою ВДЕ.
5. Які міжнародні стандарти регулюють приєднання ВДЕ до енергосистем?

6. Що розуміється під гнучкістю енергосистеми і чому вона важлива?
7. Яке завдання виконує вторинний резерв потужності в енергосистемі?
8. Охарактеризуйте три сценарії розвитку ВДЕ в Україні за дослідженням "Укренерго".
9. Які переваги має будівництво високоманеврових потужностей для балансування енергосистеми?
10. Яка економічна ефективність впровадження системи точного прогнозування генерації ВДЕ?

Лекція 4

Тема: «Засоби підвищення надійності енергопостачання з використанням нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії. Прогнозування як засіб забезпечення надійності»

План

1. Проблема регулювання енергобалансу при зростанні частки ВДЕ
2. Потреби у вторинному резерві потужності
3. Прогнозування швидкості вітру та потужності ВЕС
4. Методи прогнозування вітрової енергії
5. Фізичні моделі прогнозування
6. Статистичні моделі прогнозування
7. Порівняння різних моделей прогнозування
8. Практичне застосування статистичних методів в Україні
9. Балансуючі групи та механізми компенсації небалансів
10. Економічні аспекти точності прогнозування

1. Проблема регулювання енергобалансу при зростанні частки ВДЕ

Зростання частки відновлюваних джерел енергії, зокрема вітрових та сонячних електростанцій, у складі електроенергетичних систем ускладнює можливості регулювання енергобалансу через випадковий характер надходження вітрової та сонячної енергії.

Одним з проблемних питань є зростання потреби у регулюючих потужностях, здатних компенсувати зміну виробітку електроенергії ВДЕ. За даними Міжнародної енергетичної агенції, в екстремальних погодних умовах зафіксовано стрибки потужності ВЕС зі швидкістю до 40% номінальної потужності за годину.

Для надійного енергопостачання повинен утримуватися резерв, необхідний для заповнення втрати робочої потужності чи зростання споживання електроенергії. При зростанні частки ВДЕ збільшуються вимоги до резерву категорії від 15 хвилин до 1 години (вторинного резерву).

2. Потреби у вторинному резерві потужності

Такий резерв повинен компенсувати лише непрогнозовані зміни, адже рівень споживання може бути частково передбачений. Прогнозуванню підлягає і потужність ВДЕ.

Залежність від точності прогнозу: Потреба в резерві зростає по мірі відхилення фактичного навантаження від передбаченого. Величина відхилення визначається точністю прогнозу. Частота оновлення прогнозу також має значення – оновлення прогнозу через кожні 3 години суттєво зменшує поточну потребу в резерві.

Передбачуваність означає, що існують електростанції з тривалішим часом запуску, які можуть бути ввімкнені завчасно. За наявними методиками величина мінімального резерву вторинного регулювання визначається залежно від максимуму навантаження в енергосистемі, встановленої потужності найбільшого енергоблоку та вузла найбільшого споживання.

У багатьох реальних енергосистемах існують зв'язки з сусідніми системами, і при визначенні потреб у резервах слід враховувати обсяг і швидкодію обміну енергією.

Ринкові аспекти: Якщо навантаження можна точно передбачити на 24 години, то можна укласти тільки 24-годинні угоди на поставку енергії. Якщо така точність недосяжна, має бути доступ до альтернативного постачальника. Більшість електростанцій вмикаються за 4-6 годин, тому немає потреби в 24-годинній інформації.

Приклад зростання потреб у додаткових резервних потужностях показує, що при впровадженні ВДЕ на рівні 10% та 4-годинному прогнозі потреба в резерві досягає 15% встановленої потужності ВЕС, при 20% впровадження – 18%.

3. Прогнозування швидкості вітру та потужності ВЕС

Продуктивність вітрових станцій змінюється відповідно до швидкості вітру, тоді як енергосистема має утримувати баланс між генеруванням та споживанням енергії. Крупна ВЕС може стати вагомим дестабілізуючим фактором.

Приклад: На ВЕС Horns Rev у Данії відзначалися коливання потужності з періодом у десятки хвилин, градієнт яких сягав 15 МВт за хвилину, так що при номінальній потужності 160 МВт зміна між нульовою та максимальною потужністю могла відбутися за 10-15 хвилин.

Особливості ВЕС: Якщо активна потужність ВЕУ може бути знижена при зменшенні потреб у енергії, то збільшитись при зростанні потреб вона не може внаслідок обмеженої швидкості вітру. Тому чим більша частка вітрової енергії, тим важче утримувати баланс енергосистеми.

Вітрова енергія змінюється в часі внаслідок флуктуацій метеорологічних факторів. Ці зміни можуть тривати від кількох секунд до років. Розуміння природи цієї мінливості та можливість передбачення є пріоритетним питанням при інтегруванні ВЕС до енергомереж.

Передбачуваність ВЕС – ключовий момент в уникненні істотних коливань потужності. Це необхідно з економічних мотивів для зменшення обсягу резервних потужностей. Часова протяжність надійного прогнозу визначається умовами енергоринку та технічною спроможністю енергосистеми до компенсації перепадів потужності.

Потреба у прогнозуванні залежить від рівня впровадження вітрової енергетики. Вважається, що при частці встановленої потужності ВЕС у загальному обсязі на рівні 5% потреба у точному прогнозуванні стає нагальною, а для рівня 10% і вище – критично необхідною.

4. Методи прогнозування вітрової енергії

Для практичних потреб розглядаються методи короткотермінового (до двох діб) прогнозування змін поточної потужності ВЕС. Прогнозування стосується як швидкості й напрямку вітру, так і безпосередньо потужності ВЕС.

Методи прогнозування загалом можна розділити на фізичні та статистичні. Перші досліджують фізичні властивості атмосфери та її взаємодію з земною поверхнею, другі базуються на статистичних закономірностях.

Чому прогнозується швидкість вітру, а не потужність: Швидкість вітру є об'єктивним та унормованим показником, тоді як потужність ВЕС – істотно нелінійна функція швидкості вітру, яка залежить від технічних можливостей конкретних ВЕС. Характеристика потужності є стохастичною функцією і може бути визначена лише опосередковано. Тому поточні дані щодо роботи ВЕС конвертуються у швидкість вітру, і лише на останній стадії прогнозна швидкість вітру перетворюється у очікувану потужність ВЕС.

Окремо фізичний і статистичний методи використовуються рідко. Зазвичай застосовуються одночасно як фізичні, так і статистичні моделі. Останнім часом розроблено нові методи на основі штучного інтелекту: штучні нейронні мережі (ANN) і моделі нечіткої логіки (fuzzy logic). Сучасні гібридні моделі мають меншу похибку.

5. Фізичні моделі прогнозування

Фізичні моделі використовують різні фактори (характер місцевості, перешкоди, тиск і температуру повітря) для оцінки майбутньої швидкості вітру. Іноді це лише перший крок як допоміжне джерело даних для статистичних моделей.

Модель NWP (числового передбачення погоди) розроблено метеорологами для прогнозу погоди великомасштабного регіону. Для конкретної місцевості використовуються числові розв'язки рівнянь збереження (маси, імпульсу, енергії), цифрові моделі висот (тривимірні моделі площадки).

Модель вихідних статистик (MOS) виконує об'єктивну інтерпретацію числових даних щодо особливостей конкретної площадки для зменшення похибки.

Алгоритм роботи моделей передбачення:

1. Отримання даних передбачення погоди з використанням HIRLAM або DM (прогноз на 48 годин з оновленням через 6 годин, просторова дискретність 14×14 км у DM та 23×23 км у HIRLAM);
2. Горизонтальне приведення даних до умов місцевості (врахування шорсткості поверхні, орографії);
3. Статистична обробка даних для усунення систематичних похибок (MOS);
4. Врахування технічних характеристик ВЕУ та ВЕС (крива потужності, взаємозатінення, втрати);
5. Розробка прогнозу виробництва електроенергії на наступні 48 годин.

Для врахування місцевих ефектів використовується програмний комплекс WAsP з програмою PARK.

Основні фізичні моделі: HIRLAM, Prediktor, Casandra, UK MESO, Олденбурзька модель, Meteologica. На площадках з великими середніми швидкостями вітру модель HIRLAM/WAsP демонструє дуже хороші результати. Для терміну прогнозу 3-6 годин рекомендується модель постійності, яка добре працює на коротких часових інтервалах.

Точність: Середньоквадратична похибка становить 75-100% поточної потужності (залежно від горизонту прогнозування). При нормалізації відносно номінальної потужності ВЕС похибка становить в середньому від 15% (горизонт 6 годин) до 25% (48 годин). Статистична очистка даних (MOS) здатна на 15% покращити точність. Точність прогнозування вища для плоских територій і погіршується за наявності нерівного рельєфу.

6. Статистичні моделі прогнозування

Найпростішим варіантом є модель постійності, яка передбачає збереження поточного значення потужності. Усі інші методи використовують більший обсяг даних і спрямовані на визначення тренду змінної величини, представленої у вигляді часового ряду.

Типи статистичних моделей:

- AR (авторегресійна модель);
- MA (модель рухомого середнього);
- ARMA (авторегресійна модель з рухомим середнім);

- ARIMA (авторегресійна інтегрована модель з рухомим середнім).

Часові ряди можуть бути описані рівністю: $x_t = \sum \phi_i \cdot x_{t-i} + \sum \theta_j \cdot \alpha_{t-j}$, де ϕ_i – параметр авторегресії; θ_j – середній параметр руху; α_t – нормальний білий шум; x_t – значення прогнозованої величини в час t .

Просторова кореляція враховує співвідношення швидкості вітру на різних площадках. Здебільшого беруть до уваги метеодані площадок в радіусі 30 км. Одна з таких моделей – динамічно невизначена нейронна мережа з місцевим зворотнім зв'язком, де похибка прогнозу знаходиться в межах від 5% до 14%.

Нейронні мережі (ANN) можуть передбачити швидкість вітру цільових станцій без топографічних деталей або метеорологічних даних, використовуючи лише дані довідкових станцій. ANN добре пристосовані для введення необроблених даних і мають широкі можливості до самонавчання.

Моделі нечіткої логіки краще працюють при аналізуванні проблем, натомість можливості їх вдосконалення посередні.

7. Порівняння різних моделей прогнозування

Порівняння різних моделей виконано у проекті ANEMOS міжнародною групою дослідників для різних площадок у чотирьох країнах з рельєфом від гладкого (включаючи офшорну ВЕС у Данії) до гористого (Іспанія).

Результати: Нормалізована середня абсолютна похибка, віднесена до номінальної потужності, варіює від 5-10% для пласких територій (10-15% для офшорних) до 10-35% для гірської місцевості. Похибка зростає зі збільшенням горизонту прогнозування.

Висновки порівняння:

- Статистичний підхід дає кращий результат для перших 3-4 годин порівняно з фізичним, надалі точність вирівнюється;
- Очікується покращення точності від комбінування моделей;
- Розрахункові сітки з великою дискретністю дають незадовільний результат, особливо для складного рельєфу;
- Оптимальний результат забезпечує комбінація статистичних та фізичних моделей.

Характеристики різних моделей:

- NWP: ефективні для великого регіону в тривалому інтервалі, часто як джерело вхідних даних;
- Модель постійності: найпростіша, може перевершити інші в дуже короткостроковому прогнозі;
- ARIMA, нейронні мережі, нечітка логіка: використовують значний обсяг даних, точні при короткостроковому прогнозуванні.

8. Практичне застосування статистичних методів в Україні

Короткотермінові прогнози роботи ВЕС складаються на термін до 48 годин виходячи з потреб диспетчеризації енергосистеми. Для України в цілому це питання наразі не критичне, проте в деяких регіонах сумарна потужність вітрових станцій наближається до критичної межі.

Переваги статистичних методів: Статистичні прогнози можна виконувати з використанням традиційного обчислювального апарату (програми Statistica, SPSS), маючи строкові записи метеопостів ВЕС та офіційні метеопрогнози. Такі методи більш доступні та менш затратні, ніж фізичні моделі.

Приклад прогнозування (дані Присноводненської ВЕС):

Початкові дані – 10-хвилинні записи швидкості вітру протягом місяця (4464 точки). Для прогнозування використано середньогодинні значення (744 точки).

Аналіз часового ряду:

- Візуально не має ознак нестационарності;
- Автокореляційна функція експоненційно затухає, досягнувши значень білого шуму на 25-му кроці;
- Часткова автокореляційна функція має два значимі викиди на перших двох лагах.

Автокореляція – це кореляція функції з самою собою, зміщеною на певну величину. Використовується для знаходження закономірностей у ряді даних, таких як періодичність. Часткова автокореляційна функція показує кореляцію між двома змінними за вирахуванням впливу всіх внутрішніх значень.

Використана модель: Сезонна модель $ARIMA(2,1,2)(1,0,1)$ є стаціонарною, її автокореляційна функція має кращу збіжність і досягає меж білого шуму вже на 15-му лазі.

Урахування періодичності: Незважаючи на візуальну відсутність періодичної складової, добовий хід швидкості вітру відчутний. Спектральний аналіз показує періоди, кратні 24 годинам, чітко виражена також 4-добова періодичність (96 годин). Для виділення періодичної складової використано трансформацію з лагом 24.

Результати:

- Без урахування періодичності середньоквадратична похибка становила 2,2 м/с;
- З урахуванням періодичності – 1,8 м/с.

Прогноз на 2-й день якісно повторює прогноз на 1-й день – властивість розрахункової моделі. Тому доцільніше виконувати прогнозування на один день.

Точність прогнозу залежить від плавності зміни елементів ряду і має досить випадковий характер. Локально похибка може становити від 15% (0,87 м/с) до 47% (4,28 м/с) залежно від різкості змін швидкості вітру.

Покращення точності: Значне покращення досягається при складанні прогнозу частіше (через кожні 6 годин замість доби). Для днів з різкими змінами швидкості вітру середньоквадратична похибка зменшилась з 4,44 м/с (62%) до 1,82 м/с (25%).

Важливі висновки:

- Точність прогнозу не зростає при збільшенні бази прогнозування (дані за 10 днів дають таку ж точність, як за 30 днів);
- Для статистичного прогнозування достатньо даних за декілька останніх годин;
- Точність задовільна лише для декількох наступних годин (до 10);
- Коректне використання $ARIMA$ потребує хоча б 50 попередніх значень.

9. Балансуючі групи та механізми компенсації небалансів

Виробники ВДЕ можуть продавати електроенергію на всіх сегментах ринку. Для продажу за "зеленим" тарифом або аукціонною ціною вони стають учасниками балансуєчої групи гарантованого покупця.

Відшкодування небалансів: При відхиленні фактичних погодинних обсягів відпустки енергії від графіків виробники ВДЕ відшкодовують частину вартості врегулювання небалансу "Гарантованого покупця" відповідно до правил функціонування балансуєчої групи.

Переваги об'єднання в балансуєчу групу:

По-перше, компенсація обсягів небалансів: "Співгрупники" можуть легко компенсувати небаланси навіть за похибок у плануванні. Різновекторність планування посилює компенсації – кожен учасник має свій графік споживання.

По-друге, зниження ризику небалансів: Віртуальне поєднання різних принципів планування зменшує ризику. Чим більше учасників у групі і чим більші у них обсяги при абсолютно різних графіках споживачів – тим кращий ефект.

Механізм балансування: Небаланси кожного учасника підсумовуються. Відповідальність за небаланс ДП "Гарантований покупець" може бути меншою за сумарну, оскільки позитивні та негативні небаланси компенсують один одного. У такому разі відповідальність виробників ВДЕ як учасників балансуєчої групи може бути меншою, ніж за межами групи.

Різномасштабність графіків споживання учасників дозволяє краще компенсувати нестачу або надлишок електроенергії, значно (часом до 90%) зменшувати втрати від небалансів.

Статистика: Станом на 1 грудня 2021 року в балансуєчу групу Гарантованого покупця входять 944 учасники. Кожен день ДП "Гарантований покупець" публікує на сайті графіки відхилення фактичних обсягів від прогнозних даних виробників ВДЕ.

10. Економічні аспекти точності прогнозування

Від якості прогнозу залежать можливості диспетчеризації енергосистеми, організації резервних потужностей, забезпечення стабільності енергозабезпечення в цілому.

Ринкові наслідки: Точність прогнозування безпосередньо впливає на економічні результати роботи виробників ВДЕ через механізми відшкодування небалансів. Чим точніший прогноз, тим менші втрати від врегулювання небалансів.

Перспективні напрями досліджень:

- Поглиблене вивчення методів з використанням штучного інтелекту;
- Покращення алгоритмів для точніших результатів;
- Комбінування різних фізичних і статистичних моделей для хороших результатів як в довго-, так і короткостроковому прогнозуванні;
- Подальші дослідження практичного застосування моделей;
- Розробка нових математичних методів.

Адаптивні моделі розглядають прогнозовану потужність ВЕС як адаптовану комбінацію альтернативних динамічних моделей. Адаптивність враховує нелінійну залежність потужності від швидкості вітру, вплив напрямку вітру, густини повітря. Результуючий прогноз використовує адаптивну комбінацію конкуруючих моделей. Критерієм при виборі моделей є їх точність, визначена для попередніх періодів.

Енергетична нестабільність при прогнозуванні визначається як абсолютне розходження між прогнозованими та фактично вимірними потужностями. Індекси ризику показують рівень невизначеності прогнозу і можуть використовуватися при оперативному плануванні роботи ВЕС або для вибору стратегії участі в ринку електроенергії.

Контрольні питання

1. Чому зростання частки ВДЕ ускладнює регулювання енергобалансу?
2. Що таке вторинний резерв потужності і як він пов'язаний з точністю прогнозування?
3. Чому прогнозується швидкість вітру, а не безпосередньо потужність ВЕС?
4. У чому полягає різниця між фізичними та статистичними методами прогнозування?
5. Опишіть алгоритм роботи фізичних моделей передбачення потужності ВЕС.

6. Які типи статистичних моделей використовуються для прогнозування вітрової енергії?
7. Які переваги і недоліки мають нейронні мережі у прогнозуванні?
8. Як точність прогнозування залежить від рельєфу місцевості та горизонту прогнозування?
9. Які переваги дає об'єднання виробників ВДЕ у балансуєчі групи?
10. Як можна покращити точність короткотермінового прогнозування ВЕС?

Лекція 5

Тема: «Особливості прогнозування сонячної та вітрової енергії. Приклади прогнозування та досяжна точність»

План

1. Змішані методи прогнозування вітрової енергії
2. Використання адаптивних моделей
3. Врахування напрямку вітру у прогнозуванні
4. Оцінка точності прогнозу потужності ВЕС
5. Особливості імовірнісного підходу
6. Можливості короткотермінового прогнозування сонячної енергії
7. Методи прогнозування сонячної радіації
8. Комбінування прогнозів для СЕС
9. Імовірнісний підхід до прогнозування сонячної енергії
10. Точність прогнозу сонячної енергії та фактори впливу

1. Змішані методи прогнозування вітрової енергії

Для короткотермінового прогнозу задовільні результати забезпечує модель постійності – найпростіший варіант моделі ARIMA. Покращеним варіантом є метод експоненційного згладження, коли наступні значення ряду визначаються не лише через поточне значення, але й усі попередні, взяті зі зменшуваними ваговими коефіцієнтами.

Комбінування статистичних методів та метеопрогнозів:

Точність прогнозування можна підвищити, використовуючи не тільки статистичний підхід, а й офіційні метеопрогнози. Щоденні прогнози державної гідрометеослужби містять розрахункові значення швидкості вітру на дві доби вперед (по чотири значення на добу) в прив'язці до існуючої мережі гідрометеостанцій (ГМС).

Метод розподілених лагів (МРЛ):

Для покращення прогнозу використовується регресія прогнозних значень на фактичні методом розподілених лагів. Рівняння лінійної регресії: $Y_t = \sum \beta_i \cdot X_{t-i}$, де Y – залежний ряд; X – незалежний ряд; t – індекс часу; β_i – коефіцієнти регресії. Для розрахунків оптимальним є значення лагу $L=4$. При цьому найбільш статистично значимими є перший та останній коефіцієнти рівняння регресії.

Порівняльні показники точності прогнозування:

Метод	Коефіцієнт кореляції	СКП (м/с)	Відносна похибка
Модель ARIMA	0,457	2,61	0,451
Експоненційне згладження	0,450	2,60	0,449
Прогноз ГМС	0,717	2,52	0,413
Прогноз МРЛ	0,683	1,98	0,344
Комбінований ARIMA+МРЛ	0,686	1,88	0,326

Подальшого покращення прогнозу можна досягти комбінацією прогнозів за моделями ARIMA та МРЛ з ваговими коефіцієнтами, пропорційними коефіцієнтам кореляції або обернено пропорційними середньоквадратичній похибці.

Залежність від обсягу даних:

При обсязі бази даних від 10 до 20 днів зміна коефіцієнтів з додаванням кожного наступного дня є досить помітною. Починаючи з 25 днів коефіцієнти наближаються до асимптотичних значень. Таким чином, місячного обсягу даних цілком достатньо для статистично значимої залежності та стабільності прогнозу.

Відчутте збільшення точності прогнозування за рахунок зростання бази попередніх даних неможливе після стабілізації статистичних закономірностей. Покращення за рахунок комбінування різних моделей з використанням даних гідрометеослужб є більш успішним. Однак досягнута точність на рівні 30-35% все ж недостатня, оскільки прогнози ГМС оновлюються один раз на добу, тоді як для розвинутих зарубіжних моделей на базі NWP – принаймні кожні 6 годин.

2. Використання адаптивних моделей

У більшості прогнозних моделей прогнозується швидкість вітру, а не потужність ВЕС. Показник швидкості вітру є об'єктивним та унормованим, а потужність ВЕС – нелінійна характеристика, що залежить від технічних можливостей конкретних ВЕУ.

Однак потрібною на практиці величиною є саме значення потужності ВЕС, яка може мати свої закономірності, пов'язані з внутрішнім розпорядком роботи ВЕС, особливостями диспетчерського управління. Результуюча прогнозована потужність розглядається як адаптована до конкретних умов комбінація альтернативних динамічних моделей.

Загальний вигляд розрахункової моделі:

$$p_{t+h} = \alpha_{0,t} + P_t(k,c) + W_{t+h|t}(q) + D_{t+h|t} + e_t(M_h|t),$$

де $P_t(k,c)$ – авторегресійна складова потужності ВЕС; $W_{t+h|t}(q)$ – прогноз стосовно швидкості вітру; $D_{t+h|t}$ – прогноз стосовно напрямку вітру; $e_t(M_h|t)$ – прогнозована похибка i -тої моделі; q та k – кількість параметрів регресії; константа c призначена для врахування добової циклічності.

Гнучкість методики полягає у виборі адаптивних способів оцінки коефіцієнтів кожної окремої моделі та адаптивного підходу до оцінки вагових коефіцієнтів при різних альтернативних моделях. Використовуються математичні процедури (метод найменших квадратів або метод фільтрів Калмана), а також інтуїтивний вибір окремих моделей, вага яких відповідає їх точності.

3. Врахування напрямку вітру у прогнозуванні

Напрямок вітру може впливати на результуючу потужність окремих ВЕУ та ВЕС у цілому. Швидкість вітру може корелювати з його напрямом – деякі

напрями відзначаються більш потужними вітрами. Від напрямку вітру залежить рівень втрат потенційного виробітку, обумовлених впливом рельєфу та взаємозатіненням ВЕУ.

Прогнозування напрямку вітру:

Часові ряди напрямку вітру мають ознаки стаціонарності. Характер автокореляційної та часткової автокореляційної функцій свідчить про наявність авторегресії 1-го порядку.

Застосування авторегресійної процедури ARIMA забезпечує невисоку точність прогнозу. Вдало прогнозуються лише періоди плавної зміни азимуту. Дещо кращий результат досягається завдяки використанню прогнозу розташованих поблизу ГМС та застосуванню методу розподілених лагів. Середньоквадратична похибка прогнозування зменшується з 73° (ARIMA) до 51° (МРЛ). Комбінування цих методів точності прогнозування не покращує.

4. Оцінка точності прогнозу потужності ВЕС

Алгоритм дослідження:

1. Розрахувати потужність ВЕУ за фактичними даними метеоспостережень, використавши програми типу WAsP;
2. За даними прогнозу ГМС та попередніми даними метеопостів ВЕС спрогнозувати швидкість та напрям вітру;
3. За прогнозною швидкістю визначити продуктивність ВЕС, уточнити з урахуванням напрямку;
4. Порівняти прогнозовані значення з розрахованими як точними, визначити оптимальні вагові коефіцієнти.

Результати розрахунків середньої потужності та СКП для різних моделей (приклад):

Розрахункова модель	Площадка А	Площадка Б
	(МВт) Середнє / СКП	(МВт) Середнє / СКП
Модель WAsP (точна)	1,289 / 0	0,596 / 0
Авторегресійна (ARIMA)	0,998 / 0,775	0,761 / 0,541

МРЛ	1,347 / 0,447	0,612 / 0,323
МРЛ з урахуванням напряму	1,320 / 0,437	0,605 / 0,321
Лінійна регресія на ARIMA+МРЛ	1,288 / 0,297	0,596 / 0,309
Квадратична регресія	1,290 / 0,292	0,595 / 0,249
Кубічна регресія	1,286 / 0,269	0,593 / 0,196
Кубічна регресія коригована	1,285 / 0,251	0,607 / 0,195

- Лінійна регресія забезпечує більшу похибку, ніж функції вищого порядку, хоча демонструє кращий результат для середнього значення;
- Коефіцієнт кореляції: 0,8 для МРЛ та лінійної регресії, 0,875 – для квадратичної, 0,925 – для кубічної;
- При врахуванні понад 20 попередніх значень коефіцієнти регресії досягають стабільності;
- Відносна точність прогнозу досягала 8-12% відносно номінальної потужності.

5. Особливості імовірнісного підходу

Традиційно прогноз формулюється у вигляді детермінованого значення. Проте сучасні методи можуть забезпечити більше інформації у вигляді прогнозованої невизначеності (ймовірних варіацій).

Зміна парадигми:

Основні джерела невизначеності в прогнозах погоди:

- Атмосферна непередбачуваність;
- Невизначеність у інтерпретації даних;
- Похибки при складанні прогнозу;
- Інтерпретація результатів прогнозування.

Помилка прогнозу – фактичне відхилення прогнозованого від виміряного значення в минулому чи теперішньому. Прогнозована невизначеність – можливий діапазон помилок у майбутньому.

Інтервал прогнозу на момент часу t містить інформацію щодо границь розподілу з певною імовірністю: $\text{Prob}\{P_{tL+k} \leq P_{t+k} \leq P_{tH+k}\} = \alpha$, де τ_H та τ_L – квантилі номінальних інтервальних обмежень; α – ймовірність знаходження шуканого значення всередині визначеного інтервалу.

Три основні процедури застосування невизначеності:

1) Статистичні методи імовірнісних прогнозів: Засновані на статистичній обробці історичних даних для отримання функції щільності розподілу PDF. Перевага – дешеві і прості. Недолік – неможливо отримати реалістичне представлення невизначеності у просторовому та часовому вимірі.

2) Ансамблі статистичних сценаріїв: Продукують статистичні сценарії з ймовірністю розподілу, отриманою із статистичних моделей. Враховують лише просторову мінливість прогнозу.

3) Фізично обґрунтовані ансамблі: Пост-обробка множини прогнозів NWP, отриманих шляхом збурення початкових або граничних умов. Орієнтуються на оцінку фізичної невизначеності погоди в майбутньому. Можуть моделювати події, що трапляються раз за 50 років.

Застосування в енергетиці:

- Балансування потужності або торгівля енергією;
- Встановлення ймовірнісних вимог до резерву потужності;
- Інформаційне забезпечення для розуміння ситуації;
- Гнучке управління в інтелектуальних мережах;
- Швидкісна система оповіщення про вимкнення.

6. Можливості короткотермінового прогнозування сонячної енергії

Частка сонячної енергетики інтенсивно зростає в енергосистемах світу. На шляху високих темпів впровадження фотоелектричних систем постають дві перепони – мінливість і невизначеність. Непостійність сонячної енергії негативно впливає на роботу енергосистем. У Франції, наприклад, частка сонячної електроенергії обмежена 30% загального споживання.

Засоби для розширення меж впровадження:

- Створення резервної ємності для енергії, здатної згладжувати режими генерації;

- Швидке вмикання резервних потужностей контрольованого характеру;
- Досягнення кращої передбачуваності сонячної енергії для надійного балансування виробництва та споживання.

Види прогнозів:

Короткострокове прогнозування (до 6 годин) – потрібне для частотного регулювання та балансування навантаження. Краще використовувати дані вимірів.

Середньостроковий прогноз (від кількох годин до днів) – застосовується виходячи з ринкових вимог до торгівлі енергією. Аналітичні моделі стають дієвими для горизонту понад 6 годин.

Довгострокове прогнозування (сезони, роки) – для планування розвитку енергосистеми та економічного аналізу.

7. Методи прогнозування сонячної радіації

Використовуються різноманітні ресурси: традиційні вимірювання погодних даних, інформація діючих СЕС, аерокосмічні дані спостереження за хмарним покривом, числові моделі прогнозу погоди (NWP).

Методи поділяються на фізичні та статистичні:

Фізичний підхід використовує моделі поведінки сонячної енергії. Основні параметри – освітленість (загальна разом з розсіяною або лише пряма) та температура повітря на території СЕС. Додаткові фактори – швидкість вітру та вологість (впливають незначно).

Статистичний підхід спирається на накопичені дані для визначення тенденцій. Набори даних містять інформацію про попередню роботу СЕС, погодні дані, використовуються для "навчання" моделей (авторегресійні або моделі штучного інтелекту).

Характеристики методів прогнозування:

Метод	Частота вибірки	Роздільна здатність	Горизонт
Модель постійності	висока	1 точка	хвилини

Зображення неба знизу	30 с	10-100 м	10-30 хв
Супутникове зображення	15 хв	1 км	до 5 год
Аналітичний прогноз	1 год	2-50 км	до 10 днів

Модель постійності – найпростіша, екстраполює поточне значення з урахуванням зміни кута підйому сонця. Точність різко зменшується зі збільшенням горизонту.

Зображення неба використовується для прогнозування на 10-30 хвилин, застосовуючи методи обробки зображень і відстеження руху хмар. Рівень сонячної радіації визначається для поточної хмарності, тінь від хмар умовно переміщується на основі розрахованої швидкості.

Етапи прогнозування на основі аналізу знімків неба:

1. Створення актуальних зображень неба в безпосередній близькості від площадки;
2. Аналіз зображення, ідентифікація хмар (розрізнення тонких і густих);
3. Оцінка векторів руху хмар з використанням послідовних зображень;
4. Використання позиції і вектора руху для короткочасного прогнозу.

Обмеження методу: Не враховується розвиток хмар, їх розсіювання або зміни в геометрії. Типові часові горизонти – від 5 до 20 хвилин.

Супутникові зображення забезпечують набагато більший просторовий масштаб. Індекс хмарності обчислюється досить точно. Статистичні методи дозволяють прогнозувати на 2 години вперед, мінімізація розмірів елементів зображення – навіть на 6 годин. Просторова роздільна здатність геостаціонарних супутників – 1 км або більше.

8. Комбінування прогнозів для СЕС

Прогноз на термін понад 6 годин:

Прогнозування "на добу вперед" потрібно надавати близько полудня стосовно кожної години наступного дня. Отже, прогнози мають надходити

принаймні за 36 годин. Основною інформацією є дані прогнозу погоди (NWP-моделі).

NWP-моделі базуються на динамічних рівняннях, що описують зміни в атмосфері на декілька днів. Глобальні моделі стосуються всієї планети, побудовані в 3-вимірному просторі. Просторова дискретність – від 40 до 90 км.

Модель вихідних статистик (MOS) – порівняння прогнозованих даних з результатами спостережень за "навчальний" період для корекції прогнозу шляхом усунення систематичних похибок.

Характерний приклад комбінування:

Досліджується метод прогнозування сонячної радіації на годину вперед з використанням метеорологічної інформації. Часові ряди генеруються за даними п'яти метеостанцій регіону за десять років спостережень. Запропоновано гібридну модель ARMA/ANN – авторегресії та нейронних мереж.

Забезпечення стаціонарності ряду:

- Використання індексу прозорості (відношення радіації на поверхні до позаземного рівня);
- Використання індексу чистого неба (враховує все випромінювання на горизонтальну площадку);
- Застосування періодичних коефіцієнтів (сезонної декомпозиції).

Архітектура нейронної мережі: Багатошарова структура з ендегенними вхідними даними (значення глобальної сонячної радіації) та екзогенними (інші метеорологічні дані). Кількість вузлів визначається послідовними випробуваннями для забезпечення найменшої похибки.

Результати: Часові проміжки з переважно сонячною погодою краще прогнозувати з використанням лінійної авторегресії. Нейронні мережі корисні протягом періоду зі значною хмарністю. Кращі результати – стандартне відхилення похибки 16-18% (модель постійності забезпечує лише 30-50%).

9. Імовірнісний підхід до прогнозування сонячної енергії

Два головні типи підходів – детерміністський та стохастичний. За першим прогнозується певний рівень енергії, за іншим значення супроводжується

інформацією про рівень невизначеності, що більш доречно для управління та контролю.

Метод Байеса:

Як об'єкт прогнозування розглядається індекс прозорості. Метод передбачає знаходження функції щільності розподілу (PDF) даного індексу як випадкової величини.

Алгоритм:

1. Для певної години будується розподіл імовірності індексу;
2. По попередніх вимірах визначається кореляція параметру з іншими погодними умовами;
3. Відбираються значимі параметри, розраховуються параметри регресії;
4. Маючи дані на певну годину, по регресії визначається параметр на наступну;
5. Розраховуються параметри модифікованого бета-розподілу;
6. Отримується аналітична функція розподілу з середнім значенням і розмахом 5-95% імовірності.

10. Точність прогнозу сонячної енергії та фактори впливу

Числові показники точності:

- MBE (mean bias error) – середнє відхилення, вказує на систематичну похибку;
- RMSE (root mean square error) – середньоквадратична похибка;
- MAE (mean absolute error) – середня абсолютна похибка, дає середній розмір похибок;
- SDE (standard deviation) – стандартне відхилення.

Зазначені метрики можуть мати абсолютні значення або відносні – нормалізовані діленням на середні, максимальні значення чи номінальну потужність.

Орієнтири для порівняння:

Простим об'єктом для порівняння є модель постійності або методи простої авторегресії. За результатами дослідження IEA, значення СКП становило 20-35% в Іспанії і досягало 40-60% в Центральній Європі. Кращі результати

прогнозування на наступний день з подальшою статистичною обробкою досягали 15-25%.

Фактори, що впливають на точність:

- Місцевий клімат: За ясної погоди та високих кутів підйому сонця прогноз точніший, ніж при хмарній погоді;
- Розмір регіону: Сукупна похибка для області менша, ніж для окремих точок, через згладження та взаємну компенсацію;
- Часовий горизонт: Точність зменшується зі збільшенням горизонту прогнозування;
- Рельєф: Значний вплив мають мікрокліматичні умови в гористих місцевостях;
- Точність обладнання: Впливає на якість вихідних даних.

Досягнуті показники:

В абсолютних показниках середньоквадратичні похибки прогнозу сонячної радіації становлять 100-140 Вт/м², або до 45% потужності. Просторова протяжність дії прогнозу – 2-25 км. Поведінку хмар складно передбачити більш ніж на 6 годин через хаотичну природу хмароутворення.

Перспективи:

Дослідження можливостей прогнозування є динамічним процесом зі швидким розвитком нових моделей. Сонячні прогнози нещодавно введені в практику Німеччини та Іспанії. Імовірнісний підхід може стати основою нових підходів до роботи енергосистеми. Поява інтелектуальних мереж формуватиме власні вимоги до передбачуваності і стимулюватиме нові розробки.

Ситуація в Україні:

Наявні СЕС ще не справляють помітного впливу на енергосистему. Проте їх потужність швидко зростає, а надійний інструментарій короткострокових прогнозів відсутній. Потреба в дослідженні та розробці ефективних методів прогнозування набуває актуальності.

Контрольні питання

1. У чому полягає суть методу експоненційного згладження для прогнозування?

2. Як метод розподілених лагів покращує точність прогнозування швидкості вітру?
3. Чому в адаптивних моделях прогнозується потужність ВЕС, а не швидкість вітру?
4. Як врахування напрямку вітру впливає на точність прогнозу потужності ВЕС?
5. Порівняйте точність різних методів прогнозування (ARIMA, МРЛ, комбіновані моделі).
6. У чому полягає різниця між детерміністським та імовірнісним підходами до прогнозування?
7. Які методи використовуються для короткострокового прогнозування сонячної енергії?
8. Опишіть алгоритм прогнозування на основі аналізу зображень неба.
9. Які числові показники використовуються для оцінки точності прогнозу сонячної енергії?
10. Які фактори найбільше впливають на точність прогнозування сонячної радіації?

Лекція 6

Тема: «Етапи та методи побудови атласів енергетичного потенціалу.

Методологія розрахунку вітрового потенціалу»

План

1. Початок та напрями досліджень вітрового потенціалу
2. Основні принципи систематичних досліджень вітрового потенціалу
3. Визначення питомої потужності вітрового потоку
4. Європейський вітровий атлас та його структура
5. Загальна модель побудови вітроатласу (програма WAsP)

6. Моделювання швидкості вітру та вертикальний профіль
7. Дослідження вітрового енергетичного потенціалу України
8. Шляхи вдосконалення методик побудови вітроатласу
9. Методи середньомасштабного моделювання
10. Врахування орографії та складного рельєфу

1. Початок та напрями досліджень вітрового потенціалу

Увага до альтернативних джерел енергії набула імпульсу в середині 70-х років минулого століття, в часи енергетичної кризи. Оскільки найдужче криза зачепила США, саме там розпочалися систематичні дослідження вітрового потенціалу для потреб промислової енергетики.

Метеорологічні дослідження кінця 70-х – початку 80-х років дозволили виявити певні закономірності та сформулювати правила вимірювання параметрів вітру і визначення енергії вітрових потоків, придатних для використання вітроелектричними установками (ВЕУ).

Основні дослідницькі центри:

США: Дослідницький центр NASA, згодом Тихоокеанська Північно-Західна лабораторія (PNL) та Національна лабораторія з відновлюваної енергетики (NREL).

Європа: У 80-ті роки лідером стала Національна лабораторія Risø (Данія), яка розробила еталонну данську модель компоновки вітротурбіни. Значних успіхів досягла Німеччина – Німецький інститут вітроенергетики (DEWI), Інститут вітроенергетики Товариства ім. Фраунгофера (IWES). У Швеції – Королівський технологічний інститут КТН.

СРСР: Піонерами виступали Всесоюзний проектно-вишукувальний та науково-дослідний інститут "Гідропроєкт", НВО «Вітроен», ДКБ «Південне».

Програмне забезпечення:

Було розроблено комплекси для:

- Складання атласів вітрового потенціалу (WAsP, NOABL);
- Проектування ВЕС з визначенням очікуваної продуктивності (WindFarm, WindPRO);

- Прогнозування роботи ВЕС (HIRLAM, DM).

Нормативна база: Документи розроблені Міжнародною електротехнічною комісією (IEC), Американським інститутом електроенергетики і електроніки (IEEE), Данським товариством інженерів.

Україна: До досліджень долучилися Інститут електродинаміки та Інститут відновлюваної енергетики НАН, ДНВП «Укренергомаш», ДПВ НДІ «Укренергомережпроект», навчальні заклади та приватні фірми. Активізації сприяло прийняття Комплексної програми будівництва ВЕС в Україні (1997-2010 рр.).

Проблемні питання вітрової енергетики:

Головний недолік – неконтрольованість енергоносія (вітру). Режим генерування електроенергії здається абсолютно неконтрольованою величиною. При зростанні загальної потужності ВЕС проблема нестабільності потребує спеціального вивчення. Існуючі математичні моделі оперують середніми значеннями та випадковими флуктуаціями, проте параметри змінюються залежно від сезону, місцевості, часових інтервалів.

2. Основні принципи систематичних досліджень вітрового потенціалу

Програма систематичних вимірів вітру як енергетичного ресурсу була розпочата в США у 1976 році під егідою Департаменту енергетики. Виміри виконувалися з використанням 50-метрових веж; датчики швидкості та напрямку вітру встановлювалися на двох рівнях – 9 та 46 метрів.

Сформовані принципи досліджень:

Розташування метеовеж: Встановлювалися з навітряного боку відносно місця очікуваного розташування ВЕУ на відстані близько 100 м.

Осереднення даних: Проводилося погодинно, з записом середньої швидкості та напрямку вітру, інтенсивності турбулентності та девіацій напрямку.

Рівні вимірів: Виконувалися на декількох рівнях для визначення вертикального профілю.

Калібрування: Сенсорів виконувалося в аеродинамічній трубі відповідно до вимог Національного бюро стандартизації.

Відбір даних: При розшифруванні проводився відбір за критеріями достовірності – відсутності тривалих пропусків запису, відповідності дат і часу, відсутності значних відхилень вимірюваних величин, наявності зростання швидкості вітру з висотою.

Документування: Вимагалось документування всіх процедур по калібруванню, установці обладнання, зчитуванню даних.

Автоматизація: Починаючи з 1981 року вся обробка цифрових даних виконувалася спеціально розробленою комп'ютерною програмою. З 1982 року впроваджувалися системи дистанційної передачі даних телефонними лініями, що дозволило оперативно вирішувати проблеми несправності сенсорів.

Рекомендації щодо польових досліджень:

- Виміри повинні виконуватися на рівні осі ротора ВЕУ та мінімум на двох рівнях;
- Перед установкою необхідно врахувати кліматичні особливості площадки;
- При можливості ожеледі зміцнювати метеовежі та відповідно закріплювати проводи;
- Оперувати 10-хвилинними осередненими даними;
- Середня тривалість спостережень – приблизно 10 років.

3. Визначення питомої потужності вітрового потоку

Під питомою потужністю вітрового потоку розуміють енергію, що переноситься за одиницю часу через переріз одиничної площі. За час Δt через переріз площею S проходить маса повітря $m = \rho \cdot v \cdot S \cdot \Delta t$.

Питома потужність вітрового потоку прямо пропорційна густині повітря і кубу швидкості потоку. Розмірність: Вт/м².

Формули розрахунку:

Для "строкових" даних: $W = (1/2n)\sum \rho_i \cdot v_i^3$

Для "напівагрегованих" даних (гістограм): $W = (1/2)\bar{\rho} \cdot \sum f_j \cdot v_j^3$

де n – кількість вимірів швидкості вітру; ρ_i – густина повітря на момент i -го виміру (кг/м³); v_i – швидкість вітру на момент i -го виміру (м/с); m – число градацій швидкості вітру; f_j – відносна частота швидкості в j -тій градації; v_j – середня швидкість в j -й градації; $\bar{\rho}$ – середня густина повітря.

Початкові положення при визначенні енергетичного потенціалу:

1. Використання показників середньодобової, середньомісячної або середньорічної швидкостей може дати тільки наближену оцінку, оскільки розподіл швидкості не підпорядковується повністю закону Гауса.
2. Характерні значні міжрічні та міжмісячні зміни: річні вітроенергетичні ресурси можуть змінюватись на величину до 20%.
3. Багаторічні середні значення можна розглядати як багаторічні суми впливу факторів: сума сонячної радіації, сума кінетичної енергії вітру.

Обмеження методу:

Вітровий потенціал доцільно використовувати на першій стадії аналізу територій. Якщо відома модель ВЕУ, необхідно перейти до прогнозування виробітку електроенергії для конкретної моделі.

Складені за допомогою інтерполяції картосхеми мають обмежене використання, оскільки не враховують вплив підстильної поверхні (шорсткості). Місцеві особливості рельєфу можуть значно змінювати середню енергію вітру на коротких відстанях, особливо в районах берегової чи гористої місцевості.

4. Європейський вітровий атлас та його структура

Європейський вітровий атлас був розроблений та опублікований у 1989 році Національною лабораторією Risø (Данія) на замовлення Комісії Європейського Співтовариства.

Структура атласу:

Частина 1: Забезпечує загальний огляд розмірів і розміщення вітрових ресурсів в країнах ЄС. Призначена для політиків, планувальників, громадськості.

Частина 2: Надає інформацію щодо регіональних вітрових ресурсів і місць перспективного розташування вітростанцій. Містить описи та статистичну інформацію з 220 метеостанцій Європи, методичні вказівки про обчислення впливу особливостей ландшафту на ресурс вітру.

Частина 3: Роз'яснює виконання аналізу даних з метеостанцій, демонструє застосування обчислювальних моделей та їх точність.

Дані для кожної станції містять:

- Значення середньої швидкості і питомої потужності вітрового потоку на п'яти висотах при чотирьох класах шорсткості підстилаючої поверхні;
- Параметри Вейбула для розподілу швидкості вітру на висоті 20 м;
- Гістограми розподілу швидкості та напрямку вітру.

Охоплені території: Бельгія (5 метеостанцій), Данія (9), Франція (32), Німеччина (15), Греція (10), Ірландія (10), Італія (27), Люксембург (1), Нідерланди (6), Португалія (15), Іспанія (26), Велика Британія (21), станції радіозондування (30).

Результати відображено на кольорових картах для всього регіону та кожної країни. Карти базувалися на довготермінових спостереженнях тривалістю 10 і більше років. Вітрові умови приведено до висоти 50 м при стандартних умовах і одноманітній території з класом шорсткості 2.

Балтійський вітровий атлас також розроблено за аналогічною методологією. Точність зображених даних коливається в межах 5-10%. На практиці потрібно враховувати особливості місцевості – на окремих узвишшях швидкість може зростати на 15-30%.

5. Загальна модель побудови вітроатласу (програма WAsP)

Загальна модель побудови вітроатласу, що використовується у програмі WAsP, складається з підмоделей:

Модель аналізу даних:

Регіональна вітрова кліматологія розраховується у формі параметрів Вейбула відносно стандартних умов з використанням вимірних вітрових даних, опису шорсткості місцевості, затінюючих об'єктів і даних орографії.

Дані, що вводяться: Гістограми для кожного з 12 секторів азимуту, де частота появи швидкості вітру приведена до бінів шириною 1 м/с.

На першому кроці для кожного сектора визначаються чинники корекції швидкості вітру. Розглядаються три набори чинників:

- Корекції впливу перешкоди;
- Зміни шорсткості;
- Корекції орографії.

Модель зворотної калькуляції розподілу вітру на базі регіональної кліматології. Може використовуватися для перевірки регіональної статистики та як інструмент для сайтингу.

Сайтинг – приблизний підрахунок середньої кількості електроенергії, що виробляється однією конкретною ВЕУ на одному або декількох майданчиках.

Міжнародні стандарти: Методи знайшли відображення у документах: "Wind Resource Assessment Handbook" (США), "Technische Richtlinien für Windenergieanlagen" (Німеччина), "Accurate Wind Speed Measurements in Wind Energy" (Данія), "MEASNET: Evaluation of site-specific wind conditions".

6. Моделювання швидкості вітру та вертикальний профіль

Шар повітря, максимально наближений до поверхні землі, називається атмосферним граничним шаром. Його глибина має до 100 м в ясну ніч при слабкому вітрі та збільшується до 2 км в тихий ясний літній день. Найнижча частка – поверхневий шар.

Формула Хеллмана для оцінки швидкості вітру на висоті h_1 за даними на висоті h_0 :

$$v_1 = v_0 \cdot (h_1/h_0)^\alpha,$$

де v_1 – швидкість вітру на висоті h_1 ; v_0 – швидкість вітру на висоті h_0 ; α – параметр вертикального профілю вітру, який враховує вплив перешкод природного і антропогенного характеру.

Геострофічний вітер:

Вітер в атмосферному граничному шарі виникає через зміну тиску як наслідок синоптичної активності. Відбувається баланс між силою градієнта тиску і силами тертя на земній поверхні.

Закон геострофічної затримки: $G = (u^*/k) \cdot [\ln(zu^*/f) + A + B^2]$,

де G – геострофічний вітер; u^* – швидкість поверхневого тертя; f – параметр Коріоліса; A, B – емпіричні константи; k – константа фон Кармана.

Модель вертикального профілю застосовується тільки при більш-менш однорідній навітряній поверхні. При неоднорідності відбуваються відхилення і неможливо визначити єдину характерну довжину шорсткості.

Турбулентність: Швидкість і напрям вітру швидко змінюються, величина змін залежить від часового інтервалу спостережень. Додаткова причина змін – турбулентність в граничному атмосферному шарі. Для представлення вимірної швидкості використовують дані, усереднені за певний період.

7. Дослідження вітрового енергетичного потенціалу України

Застосування вітроустановок для виробництва електроенергії в промислових масштабах найбільш ефективно в регіонах України, де середньорічна швидкість вітру більша 5 м/с: на Азово-Чорноморському узбережжі, в Одеській, Херсонській, Запорізькій, Донецькій, Луганській, Миколаївській областях, Криму та в районі Карпат.

Мережа метеостанцій:

На території України розташовано близько 200 метеостанцій, підпорядкованих державній гідрометеорологічній службі, які входять до системи Всесвітньої метеорологічної асоціації (ВМО). Виміри характеристик вітру виконуються за методикою ВМО:

- Інтервал зняття показів – 3 години;
- Висота вимірювань – приблизно 10 м;
- Округлення до найближчих цілочисельних значень.

Такі покази корисні при визначенні довготермінових властивостей вітрового потенціалу, проте для потреб вітроенергетики недостатні – ні за дискретністю вимірювань, ні за точністю, ні за висотою.

Параметри розподілу Вейбула оцінено для чотирьох зон України залежно від середньорічної швидкості вітру. Отримані результати досить наближені, оскільки межі зон занадто широкі – варіація виробітку може досягати 30%.

Технічно доступний потенціал за різними дослідженнями становить 14-16 ГВт.

Атлас вітроенергетичного потенціалу України створено Інститутом відновлюваної енергетики НАН в рамках розробки Атласу енергетичного потенціалу ВДЕ. Перша редакція видана в 2001 році. Поточна редакція перебуває у стані оновлення для надання сучасних розширених даних.

Державні стандарти: У 2012 році розроблено проекти стандартів:

- "Вітроенергетика. Площинки для вітроелектростанцій. Вимоги до вибору";
- "Вітроенергетика. Метеопости для вимірювання параметрів вітрового потоку. Загальні технічні вимоги".

Впровадження забезпечить уніфікований підхід до вимірювань параметрів повітряного потоку.

8. Шляхи вдосконалення методик побудови вітроатласу

Застосування ВЕУ мегаватного класу вимагає знання вітрового потенціалу на висотах 100 м і вище. Карти вітрів існуючих атласів, приведені до висоти 50 м, не можуть забезпечити надійної точності.

Програма DOE State Energy Program (США, 2002):

Охоплювала 18 штатів, використовувала понад 40 висотних метеощогл. Виміри виконувалися на висотах 70, 80, 90, 100 і 110 метрів.

Результати досліджень:

- Значні відмінності отриманих даних від карт 50-метрових висот;
- Проста екстраполяція вертикального профілю виявилася недостатньою;
- Знайдено багато площадок, де продуктивність ВЕУ на висотах 50-100 м вища за прогнозовану;
- Відмінності в вітропотенціалі для різних років можуть перевищувати розбіжності між регіонами;
- На площадках з низьким потенціалом на висоті 50 м перепад швидкостей зі збільшенням висоти є суттєвішим.

9. Методи середньомасштабного моделювання

Потреба у досконалому передбаченні вітрової енергії стимулює застосування методу середньомасштабного моделювання (mesoscale modeling).

Переваги методу:

- Легкість моделювання з задовільною точністю;
- Можливість моделювання місцевостей з складним рельєфом;
- Застосування для територій без наземних вимірювань.

Система NREL (США):

Розроблена наприкінці 1990-х років. Використовує дані з метеорологічних радіозондів. За допомогою математичних співвідношень між висотою рельєфу та

швидкістю вітру будуються карти з кроком сітки, що зменшується до 1-2 км. Розбіжність у визначенні середньої швидкості на висоті 50 м – 5-7%.

Методика КАММ-WAsP (Risø):

Використовуючи висотні статистичні дані про стан атмосфери, моделюється репрезентативний набір статичних станів у приземному шарі. Застосовуючи дані на сітці з кроком 2-5 км, за методикою WAsP переходять до розрахунків зі значно більшою точністю.

Система MesoMap (США):

Координатна сітка (крок розрахунку) – 1-3 км. Базується на програмі NOABL. Дозволяє перейти до мікромасштабного моделювання з кроком до 200 м – співмірно з відстанню між ВЕУ в проектах ВЕС.

Програмний пакет WindScape (Австралія):

Варіант середньомасштабного моделювання в комбінації з мікромасштабним.

Точність залежить від достовірності опису ландшафту, шорсткості поверхні, врахування реальної висоти рослинності.

10. Врахування орографії та складного рельєфу

Програма WAsP постійно модернізується відповідно до сучасних вимог. Покращується інтерфейс, розширюються можливості відображення карт місцевості, розрахунку продуктивності вітростанцій.

Обмеження моделі WAsP:

Базується на ряді припущень, які не завжди справедливі для конкретної місцевості. Використовує лінійну модель обтікання пагорбів, яка не враховує завихрення вітрового потоку. Лінеаризована модель забезпечує задовільні результати для схилів не крутіших за 30°.

Модель CFD (Computational Fluid Dynamics):

Для складних випадків розроблено математичні моделі на базі повних, а не лінеаризованих рівнянь Нав'є-Стокса. Компанія RES застосувала модель CFD в програмному пакеті VENTOS.

Порівняння моделей:

Розрахунки за програмою VENTOS (CFD) добре співпадають з лінеаризованою моделлю для незначних складок рельєфу, але для складної орографії відмінності стають різкими. Розбіжності з'являються, коли відбувається розділення вітрового потоку та утворення зворотних потоків.

Розподіл Вейбула:

Для опису розподілу швидкості вітру по градаціях використовують двопараметричну функцію Вейбула через задовільне співпадіння з практичними даними, гнучкість застосування, добре досліджені властивості.

Вдосконалені моделі:

- Модифікований трипараметричний розподіл Вейбула (враховує особливості в районі малих швидкостей);
- Трипараметричний гама-розподіл;
- Обернений гаусів розподіл;
- Гібридні моделі з ненульовою імовірністю нульових швидкостей;
- Суперпозиції нормального та вейбулового розподілів.

Складання атласів вітрового потенціалу базується на апробованій в багатьох країнах методології. Проте динамічний розвиток вітроенергетики висуває нові вимоги щодо висоти визначення швидкості вітру, моделювання імовірнісних характеристик, врахування локальних особливостей ландшафту. Ці питання є предметом сучасних досліджень.

Контрольні питання

1. Коли розпочалися систематичні дослідження вітрового потенціалу і які організації були піонерами?
2. Які основні принципи систематичних досліджень вітрового потенціалу були сформовані в США?
3. Що таке питома потужність вітрового потоку і як вона розраховується?
4. Яку структуру має Європейський вітровий атлас і для кого призначені його частини?
5. Опишіть загальну модель побудови вітроатласу, що використовується у програмі WAsP.

6. Що таке атмосферний граничний шар і як змінюється швидкість вітру з висотою?
7. Який технічно доступний потенціал вітрової енергетики України і в яких регіонах він найвищий?
8. Які основні переваги методу середньомасштабного моделювання?
9. У чому полягають обмеження лінеаризованої моделі WAsP для складного рельєфу?
10. Навіщо використовується функція розподілу Вейбула при побудові вітрових атласів?

Лекція 7

Тема: «Основні характеристики та питомі енергетичні показники енергії вітру та сонячної радіації в різних кліматичних зонах світу та України»

План

1. Рекомендації щодо вибору місць та спорудження метеопостів
2. Вимірювання вітрового потоку
3. Вимоги до обладнання метеопостів
4. Реєстрація даних
5. Сонячний енергетичний потенціал
6. Розрахунок виробітку фотоелектричними системами
7. Сонячний ресурс України
8. Геліо-вітроенергетичні системи
9. Типи співвідношень геліо- та вітроенергетичних ресурсів
10. Динаміка енергоресурсів протягом року в Україні

1. Рекомендації щодо вибору місць та спорудження метеопостів

Джерелами інформації щодо метеорологічних параметрів повітря є дані метеорологічних постів. Основними складовими є щогла з розміщеними на ній давачами та автоматичний електронний прилад-реєстратор.

Організаційні форми метеопостів:

- Системи моніторингу (SCADA) діючих ВЕС;

- Окремі автономні об'єкти для вишукувальних робіт щодо визначення вітрового потенціалу площадки майбутнього будівництва ВЕС.

Метеопости для СЕС:

Наразі немає практики спеціальних досліджень на площадці будівництва. Однак для обґрунтування місця установки можна використовувати автоматичну метеостанцію на базі реєстраторів. Ефективність сонячних модулів залежить від температури, а висока швидкість вітру може потребувати додаткових кріплень або стати причиною пошкоджень обладнання.

Функції автоматичних станцій:

- Вимір метеорологічних параметрів;
- Збір і зберігання даних;
- Телеметрія та візуалізація.

На великих територіях необхідно мати дві або більше метеостанцій. Промислові електростанції мають повністю укомплектовану систему моніторингу сумарного потоку сонячного випромінювання, а також прямого та розсіяного потоків. Зазвичай встановлюють принаймні дві системи для забезпечення надійності та безперервності вимірювань.

Дані записуються на внутрішню карту пам'яті реєстратора в кінці кожної години. Прикладне програмне забезпечення використовується для підготовки вихідних даних у вигляді файлів, які передаються в архів бази даних або за допомогою носіїв інформації, або по електронній пошті.

Розташування метеопостів:

Щоб мати підставу представляти можливий майданчик для ВЕС, засоби вимірювання слід розташовувати в тих же місцях, де планується розташувати вітроустановки. Для групи ВЕУ, особливо в складній місцевості, рекомендується використовувати більше одного місця вимірювання.

2. Вимірювання вітрового потоку

Вимірювання найкраще проводити на висоті передбачуваного розташування маточини ротора ВЕУ або найближче до цієї висоти (не нижче 2/3).

Переваги багаторівневих вимірювань:

- Визначення зміни швидкості вітру по висоті (вертикальний профіль);

- Отримання надійних оцінок швидкостей на різних висотах;
- Точніший опис повітряного потоку поперек ротора ВЕУ.

Обмеження висоти: У США рекомендувалося не підійматися вище 62 м через вимоги щодо безпеки польотів авіації (потреба у світловій індикації). В даний час висота вимірювань зросла відповідно до зростання висот сучасних ВЕУ.

Вимоги до розташування:

- Вимірювання бажано проводити на відкритій місцевості, позбавленій високих дерев, чагарників і будов;
- Якщо давачі встановлені в густо зарослих районах, вони повинні підноситися щонайменше на 10 метрів над поверхнею заростей;
- При розташуванні неподалік від перешкод – з підвітряного боку стосовно переважаючого напрямку вітру, на відстані не менше десятикратної висоти перешкоди.

Урахування кліматичних особливостей:

Перед установкою необхідно вивчити та врахувати кліматичні особливості площадки. Якщо імовірні ожеледі, необхідно зміцнити метеовежі та відповідно закріпити проводи. Використовуються спеціальні затискачі для запобігання затіканню води під ізоляцію проводів.

Досвід вимірювань в Україні:

Швидкості вітру можуть значно відрізнятись навіть в межах одної площадки, і такі зміни не завжди точно прогнозуються програмами моделювання. Фахівці рекомендують встановлювати метеорологічні пости в декількох точках площадки.

Кількість метеопостів визначається кількістю ділянок площадки з різним вітровим режимом. Неоднорідність може виникати через вплив рельєфу місцевості або близько розташованого великого водоймища. У випадку однорідного режиму встановлюється один метеопост. При регулярній зміні швидкості вітру необхідно встановити не менше двох метеопостів.

Організація вимірювань:

Деякі метеопости можна використовувати для короткострокових вимірювань і переносити на іншу ділянку. На кожній площадці ВЕС має бути принаймні один пост, який не пересували і на якому нічого не міняли протягом всього періоду вимірювань. Такий пост служитиме джерелом довготривалих даних, з якими можна проводити кореляцію даних з інших щогл.

Результати вимірювань протягом коротких періодів (декількох місяців або тижнів) мало придатні для оцінок вітроенергетичного характеру, якщо не об'єднати їх у більш довготривалий контекст шляхом кореляції з довготривалими даними.

3. Вимоги до обладнання метеопостів

Типовий метеопост має у своєму складі декілька типів давачів, установлених на щоглі та пов'язаних з реєстратором даних.

Рекомендації щодо давачів:

Американські фахівці рекомендують використовувати чашкові анемометри. Німецьке Товариство з розвитку вітроенергетики (FGW) також пропонує чашковий анемометр в поєднанні з давачем напряду вітру (флюгером) та вимірювальним комп'ютером.

Виробники обладнання:

В Європі найчастіше використовують реєстратори компанії NRG Systems (США) – світового лідера у виробництві вітрового вимірювального обладнання. Також використовуються реєстратори Nexgen (Велика Британія) і Second Wind Inc. (США).

Нормативна база:

Стандартизовані вимоги наведено в додатку G до міжнародного стандарту ІЕС 61400-12-1:2005(E).

Українські стандарти:

- ДСТУ 8307:2015. Вітроенергетика. Метеопости для вимірювання параметрів вітрового потоку. Загальні технічні вимоги. – Введ. 01.07.2017.
- ДСТУ 8340:2015. Вітроенергетика. Площадки для вітроелектростанцій. Вимоги до вибору. – Введ. 01.07.2017.

Установка анемометра:

Оптимальний метод – на вершині метеорологічної щогли, при цьому поблизу не повинно бути інших приладів або устаткування. Анемометр монтується на круглій вертикальній трубі з тим же зовнішнім діаметром, що і під час калібрування, кабель пропускається усередині труби.

Технічні вимоги:

- Діаметр труби не повинен перевищувати розмір корпусу анемометра;
- Чашки анемометра повинні підтримуватися на висоті як мінімум 0,75 м вище за метеорологічну башту;
- Інші прилади – як мінімум на відстані 1,5 м нижче за чашки анемометра.

Додаткові давачі:

Давачі температури і тиску повітря встановлюються на щоглі близько до висоти маточини ВЕУ та на 1,5 м нижче за основний анемометр. Давач температури повинен мати захист від прямих променів. Давач тиску поміщається в коробці, захищеній від погодного впливу.

Вимоги до вимірювальних приладів:

Характеристика	Анемометр	Флюгел	Термометр	Барометр
Діапазон вимірювання	0–50 м/с	0–360°	-50–+60°C	94–106 кПа
Поріг чутливості	1 м/с	1 м/с	-	-
Системна похибка	±3%	±5°	1°C	1 кПа
Роздільна здатність	0,1 м/с	1°	0,1°C	0,2 кПа

Діапазон допустимих температур: від -40°C до +60°C; діапазон допустимої вологості: від 0% до 100%.

4. Реєстрація даних

Запис та зберігання даних виконуються реєстратором даних – спеціальним пристроєм для використання у вітровій енергетиці, заздалегідь налаштованим

під промислові стандарти. Всі необхідні функції для реєстрації характеристик вітру вже вбудовані.

Найбільш уживаний реєстратор Symphonie компанії NRG не потребує складної процедури конфігурації для підключення нестандартних давачів.

Параметри запису:

Середні за 10 хвилин значення величин параметрів, стандартне відхилення, максимальні і мінімальні величини параметрів записуються у пам'ять реєстратора з 10-хвилинним інтервалом.

5. Сонячний енергетичний потенціал

Сонячний енергетичний потенціал визначається за показником сумарної сонячної радіації:

$$S = D + I \cdot \sin \gamma,$$

де S – сумарна сонячна радіація; D – розсіяна радіація; I – пряма радіація; γ – висота Сонця над обрієм.

Додаткові показники:

Для розв'язання деяких задач геліоенергетики використовуються показники тривалості сонячного сьйва та хмарності. Для характеристики режиму хмарності використовують ймовірність похмурого та ясного неба:

- Похмуре небо – кількість хмар перевищує 8 балів;
- Ясне небо – кількість хмар не перевищує 2 балів.

Географічні чинники:

Надходження сумарної сонячної радіації визначається:

- Географічною широтою;
- Часом доби;
- Хмарністю;
- Особливостями підстелюючої поверхні.

Методика визначення характеристик:

При визначенні характеристик геліоресурсів враховуються тільки метеорологічні та актинометричні показники, що спостерігаються на метеорологічних та актинометричних станціях, і не враховуються показники

функціонування геліоенергетичних установок через різноманітність їх типів та способів установки.

6. Розрахунок виробітку фотоелектричними системами

Виробіток енергії фотоелектричними системами знаходиться у прямій залежності від:

- Сумарної сонячної радіації, що надходить на їх поверхню;
- Коефіцієнту корисної дії сонячних батарей;
- Площі поверхні фотоелектричних панелей;
- Частки ефективної поверхні.

Формула розрахунку місячного виробітку:

$$A = Q_p \cdot S_{фп} \cdot K_{ккд} \cdot K_{еп},$$

де A – місячний виробіток енергії (кВт·год); Q_p – місячне надходження сумарної сонячної радіації на поверхню площею 1 м²; $S_{фп}$ – площа фотоелектричних панелей; $K_{ккд}$ – коефіцієнт корисної дії сонячних батарей; $K_{еп}$ – коефіцієнт ефективної поверхні.

Характерні значення параметрів:

- Площа фотоелектричних панелей: 1 м² (відповідає встановленій потужності 100 Вт);
- Коефіцієнт ефективної поверхні: 0,72 (частка поверхні сонячних елементів);
- Коефіцієнт корисної дії: 10-14% (для батарей з аморфного кремнію).

Останні три показники є постійними величинами, а динаміка виробітку визначається безпосередньо надходженням сонячної радіації.

7. Сонячний ресурс України

При розрахунках для конкретних територій можна скористатися інтерактивними програмами, що містять базу даних щодо сонячного потенціалу та початкові дані щодо конкретного типу фотобатарей.

Приклад розрахунку для Київської області:

Координати: 50°3'16" пн.ш., 31°28'54" сх.д., висота над рівнем моря: 86 м.

База даних: PVGIS-CMSAF. Номінальна потужність: 1.0 kW (кристалічний

кремній). Втрати виробітку: температурні 8,6%, відбивання світла 3,0%, інше 10,0%. Установка: кут нахилу 34°, орієнтація -2°.

Річна продуктивність:

Місяць	E_d (кВт·год)	E_m (кВт·год)	H_d (кВт·год/м ²)	H_m (кВт·год/м ²)
Січень	1,03	32,0	1,16	36,0
Лютий	1,83	51,1	2,10	58,7
Березень	3,13	97,0	3,72	115
Квітень	3,99	120	4,98	150
Травень	4,61	143	5,97	185
Червень	4,58	137	5,98	179
Липень	4,43	137	5,86	182
Серпень	4,30	133	5,62	174
Вересень	3,28	98,4	4,13	124
Жовтень	2,29	70,9	2,77	85,8
Листопад	1,03	30,8	1,20	35,9
Грудень	0,85	26,5	0,96	29,9
Всього	-	1080	-	1360

де E_d – середня добова продуктивність; E_m – середня місячна продуктивність; H_d – середня добова продуктивність на м²; H_m – середня місячна продуктивність на м².

Обмеження методу:

Розрахунок дійсних геліоенергетичних ресурсів виконується через показник тривалості сонячного саява. На основі виконаних розрахунків неможливо побудувати достовірні поверхні розподілу геліоенергетичних ресурсів через незначну густину актинометричних станцій.

Величини сумарної, прямої та розсіяної радіації практично можуть бути розповсюдженими на територію у радіусі 50-100 км приблизно за таких же умов прозорості атмосфери. Відстань між актинометричними станціями на території країни складає більше 300 км.

Річний виробіток енергії сонячними батареями за даними різних метеостанцій України коливається від 79 кВт·год/рік (Конотоп) до 108

кВт·год/рік (Саки). Найвищі показники характерні для південних регіонів та Криму.

8. Геліо-вітроенергетичні системи

Для детального висвітлення природно-ресурсного забезпечення гібридних геліо-вітроенергетичних систем потрібно розглянути динаміку добових дійсних комплексних геліо-вітроенергетичних ресурсів через аналіз повторюваності по місяцях.

9. Типи співвідношень геліо- та вітроенергетичних ресурсів

При класифікації за співвідношеннями геліо- та вітроенергетичних ресурсів виділено 4 типи співвідношень по днях:

Тип 1. Доба з значними геліо- та вітровими ресурсами

Спостерігається при зміні погоди, надходженні або утворенні циклонів. Хмари незначних розмірів переміщуються по небу та спричиняють значні коливання потужності сонячної установки. Швидкість вітру також значно мінлива. І сонячна, і вітрова установка можуть виробити достатню кількість енергії.

Тип 2. Доба зі значними сонячними та мінімальними вітровими ресурсами

Відповідають дні з характерною антициклонічною погодою. Фотобатареї можуть виробити необхідну кількість енергії, а ВЕУ – ні.

Тип 3. Доба зі значними вітровими та мінімальними сонячними ресурсами

Відповідають дні з інтенсивною циклонічною діяльністю, періоди проходження холодних атмосферних фронтів. Виробіток необхідної кількості енергії може забезпечити тільки ВЕУ.

Тип 4. Доба з одночасно мінімальними вітровими та сонячними ресурсами

Спостерігається при проходженні теплих фронтів та розвитку мікроциркуляційних процесів, особливо за інверсії температури приземного шару повітря. Ні ВЕУ, ні фотобатарея не можуть забезпечити виробіток необхідної кількості енергії. Споживання можуть забезпечити тільки акумуляторні потужності.

10. Динаміка енергоресурсів протягом року в Україні

Динаміка вітроенергетичних ресурсів (Київський регіон):

Динаміка розрахункового виробітку енергії вітроустановкою є вкрай нерівномірною через особливості вітрового режиму. Максимальні значення спостерігаються в період з листопада по квітень.

Кількість діб з виробітком понад 5 кВт·год: січень – 15, лютий – 17, грудень – 10, березень – 14 діб. Для літнього періоду: травень – 11, червень – 8, липень – 4, серпень – 6 діб.

Повторюваність діб з мінімальним виробітком (менше 1 кВт·год) максимальна влітку: червень – 4, липень – 10, серпень – 7 діб. Взимку: грудень – 3, січень – 1, лютий – 1 доба.

Порівняння виробітку ВЕУ та ФБ при однаковій встановленій потужності:

По-перше: Річний виробіток вітроустановки в середньому в 2,5 рази перевищує виробництво енергії сонячними батареями.

По-друге: Річний виробіток енергії сонячними батареями є більш постійною величиною. Річні вітрові ресурси можуть змінюватись на 20%, сонячні – на 10%.

По-третє: Для сонячних батарей характерні менші амплітуди добових сум. Добовий виробіток ФБ коливається від 0 до 3,2 кВт·год, вітроустановки – від 0 до 15 кВт·год. Це означає, що встановлена потужність сонячних батарей має перевищувати встановлену потужність вітроустановки.

По-четверте: Для геліоенергетичних ресурсів менш частими є періоди (більше доби), коли виробництво дорівнює нулеві. Це характеризує їх як джерело більш постійного постачання енергії.

Сезонні особливості:

Січень: Найбільшу повторюваність має тип 3 (10-23 доби). Мінімальну – тип 2 (0-4 доби). Значну частку має тип 4 (5-15 діб), що вказує на необхідність додаткових джерел або акумуляторів. Тривалість періоду з типом 4 складає в середньому 2-3 доби (максимум 8 діб).

Березень: Найбільшу частку займають типи 1 та 3. Повторюваність типу 2 збільшується до 5 діб. Частка типу 4 значно коливається: від 2 до 9 діб.

Квітень: Значно збільшується повторюваність типу 1 (до 25 діб), зростає частка типу 2, зменшується частка типу 3 (3-11 діб). Повторюваність типу 4 зменшується, безперервна тривалість не перевищує 2 доби.

Травень: Високі значення повторюваності типів 1 та 2, мінімальні значення типів 3 та 4. Безперервна тривалість типу 4 мінімальна – 1 доба.

Липень: Значно збільшується частка типу 2 (максимум 23 доби, безперервна тривалість 12 діб). Повторюваність типів 3 та 4 мінімальна (0-4 доби).

Вересень: Дещо зменшується повторюваність типу 2, продовжують збільшуватися показники типів 3 та 4. Період безперервної тривалості типу 4 в одному випадку збільшується до 3 діб.

Листопад-грудень: Значне переважання типу 3 (10-19 діб). Характерні високі повторюваності типів 1 та 4.

Динаміки дійсних вітрових та сонячних ресурсів в цілому протягом року є майже діаметрально протилежними. Внески дійсних вітрових та сонячних ресурсів значно розрізняються у різні пори року, проте разом надають можливість протягом більшої частини року (в середньому 80%, або 295 діб) забезпечувати виробіток необхідної кількості електричної енергії.

Комплексне використання сонця і вітру робить енерговиробництво більш стійким у часі. Проте залишається в середньому 70 діб у році, в які виробіток енергії не є достатнім. Така проблема може вирішуватись за допомогою використання акумуляторів або аналогічних пристроїв.

Контрольні питання

1. Які основні складові має метеорологічний пост і які його організаційні форми?
2. На якій висоті найкраще проводити вимірювання вітрового потоку і чому?
3. Які вимоги до розташування метеопостів відносно перешкод та підстилаючої поверхні?
4. Які основні технічні характеристики має мати анемометр згідно з вимогами MEASNET?

5. Як розраховується сумарна сонячна радіація і які фактори на неї впливають?
6. Яка формула використовується для розрахунку місячного виробітку фотоелектричними системами?
7. Які характерні значення коефіцієнта корисної дії сонячних батарей?
8. Які чотири типи співвідношень геліо- та вітроенергетичних ресурсів виділяються?
9. Як відрізняється річний виробіток вітроустановки від сонячних батарей при однаковій встановленій потужності?
10. Яку частку року (в середньому) комплексне використання сонця і вітру може забезпечувати виробіток необхідної кількості енергії?

Лекція 8

Тема: «Можливості сумісного використання вітрової та сонячної енергії в кліматичних умовах України. Застосування акумуляторів енергії як один із заходів підвищення надійності та стабільності енергопостачання»

План

1. Розрахунок можливих режимів генерування електроенергії вітровими та сонячними установками
2. Особливості вітрового потенціалу України
3. Сонячні енергетичні ресурси України
4. Режим сонячної радіації
5. Інтегральна оцінка вітрового та сонячного ресурсів
6. Методика побудови карт сумарного потенціалу
7. Динаміка сонячно-вітрового потенціалу протягом року

8. Приклад суміщення вітрової та сонячної енергії (м. Миколаїв)
9. Акумуляування енергії
10. Оптимізація співвідношення ВДЕ та акумуляторних потужностей

1. Розрахунок можливих режимів генерування електроенергії вітровими та сонячними установками

Одним з головних недоліків відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної та вітрової, є нерівномірність і певна непередбачуваність їхнього часового розподілу.

Шляхи вирішення проблеми:

По-перше: Підключення до загальної електричної мережі. Під час роботи енергетичної установки використовується її власна енергія, під час простою споживається енергія з мережі. Коли установка виробляє енергію без потреби на місці, енергія подається до мережі. Такий спосіб поширений в країнах Західної Європи.

По-друге: Встановлення потужних акумуляторних батарей для використання разом з вітровими або сонячними установками малої потужності. Проблемою є висока вартість таких акумуляторів.

По-третє: Використання гібридних систем, що складаються з різних типів установок альтернативної енергетики.

Переваги гібридних систем:

Останнім часом набувають широкого використання гібридні системи, що включають сонячні та вітрові установки, а також акумуляторні батареї. Використання таких систем має значні кліматичні передумови в помірно-континентальних областях, де циркуляція атмосфери здійснюється у вигляді циклонічної та антициклонічної діяльності. Це створює кліматичні передумови для антисиметрії динаміки сонячних та вітрових енергоресурсів протягом року.

2. Особливості вітрового потенціалу України

Розподіл вітрів на Україні характеризується географічними закономірностями: циркуляцією атмосфери, рельєфом території і шорсткістю

поверхні. Ландшафтні умови впливають як на швидкість вітру, так і на його напрямок.

Розподіл тиску:

Зимовий період: Середній тиск повітря на рівні моря знаходиться в межах 1015–1025 мб. У січні найбільший атмосферний тиск (вище 1022 мб) приурочений до південно-східної частини Гірських Карпат і південно-західної частини лісостепової зони. На крайньому сході України також спостерігається область підвищеного тиску.

Літній період: Характер розподілу різко змінюється. На відміну від січня, коли ізобари мають широтний напрямок, в червні вони набувають субмеридіонального напрямку. Максимальне значення (вище 1013 мб) приурочене до області Гірських Карпат, західної частини Полісся та лісостепової зони.

Циркуляція повітряних мас:

Основною формою циркуляції над Україною є циклонічна і антициклонічна діяльність. На Україну надходять різні повітряні маси: від арктичних (середня річна повторюваність близько 10%) до тропічних (20%).

Циклони рухаються здебільшого в холодний період (листопад–березень, в середньому 10–13% на місяць) через найбільші контрасти температури між холодним суходолом і теплим океаном. Тому взимку на більшій частині території спостерігаються вітри швидкістю понад 5 м/с.

Території зі швидкістю > 5 м/с взимку: Лівобережжя лісостепової і степової зон, степова область Рівнинного Криму, східна частина лісостепової області Волинської височини, центральна і східна частина степової області, Бузько-Дніпровська степова область Причорноморської низовини.

Весна: Ділянки зі швидкістю ≥ 5 м/с скорочуються, але займають ще значні території (південний схід і південний захід України). Майже вся лісостепова зона характеризується швидкостями 4–5 м/с.

Літо: Середня швидкість > 5 м/с практично не спостерігається. Швидкості на всій території знаходяться в межах 3–4 м/с. Лише невелика зона узбережжя Чорного і Азовського морів характеризується швидкостями більше 4 м/с.

Осінь: Майже на всій лісостеповій зоні спостерігаються швидкості 3–4 м/с. Лише на невеликих ділянках узбережжя середні швидкості перевищують 5 м/с. Степова зона характеризується швидкостями 4–5 м/с.

Цілорічні показники:

Найбільша середньорічна швидкість вітру (6 м/с) спостерігається в південно-східних та південних районах степової зони. В північно-західних районах Українського Полісся також відмічаються значні швидкості (4–5 м/с). Порівняно невеликі швидкості спостерігаються в західних і центральних районах лісостепової і степової зони (3–4 м/с).

Протягом всіх сезонів середні швидкості вітру на висоті 16 м по всій території України не бувають менше 3 м/с, за винятком невеликої ділянки Південного берега Криму (район Ялти).

3. Сонячні енергетичні ресурси України

Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації на 1 м² поверхні на території України знаходиться в межах від 1070 кВт·год/м² в північній частині до 1400 кВт·год/м² і вище в АР Крим.

Напрями використання:

Потенціал слід розглядати з точки зору:

- Можливостей теплопостачання (нагрівання води в сонячних колекторах);
- Виробництва електричної енергії у сонячних перетворювачах (фотоенергетика).

Термін ефективної експлуатації:

- Південні області України: 7 місяців (квітень–жовтень);
- Північні області: 5 місяців (травень–вересень);
- Фотоенергетичне обладнання: може ефективно експлуатуватися протягом всього року.

4. Режим сонячної радіації

На території України спостерігається суттєва диференціація показників і режиму надходження сонячної радіації. Режим залежить від астрономічних та географічних факторів.

Астрономічний фактор:

Залежність місячних величин сумарної радіації від географічної широти має місце протягом усього року. Найбільш яскраво вона проявляється взимку: в січні на півдні України сумарна радіація на 60% більше, ніж на півночі. В липні це збільшення не досягає 3%.

Сезонні особливості:

Теплий період є найбільш сприятливим для використання сонячної енергії, оскільки мінливість сумарної радіації по території порівняно мала: різниця між північними і південними районами становить 3–8%. Для середніх умов хмарності така різниця дорівнює 15–30% через вплив хмарності.

Взимку та восени показники сумарної радіації розподіляються в широтному напрямку. Головними факторами є висота Сонця та тривалість дня. Коефіцієнт прозорості в січні збільшується від 0,743–0,754 в північних районах до 0,759–0,797 в Причорномор'ї та Криму.

Влітку спостерігається різке порушення широтної зональності. Вплив астрономічних факторів перекривається впливом місцевих умов, які зумовлюють відмінності в прозорості атмосфери і стають головним фактором територіальної мінливості. Мінливість в літні місяці становить близько 10–15% середніх величин.

Вплив рельєфу:

На схилах зміни сумарної сонячної радіації найбільш відчутні через вплив експозиції і кута нахилу. Від закритості горизонту схилами залежить надходження розсіяної радіації. На крутих схилах та у забудові суттєве значення має відбиття радіації від схилів і будівель, що може у півтора рази збільшувати надходження сонячних променів.

5. Інтегральна оцінка вітрового та сонячного ресурсів

Вихідні положення дослідження:

1. Природні ресурси для сонячної та вітрової енергетики наявні на всій території України та змінюються континуально. Будь-яка ділянка може бути використана, але ефективність буде різною.
2. Порогові характеристики природних ресурсів не є усталеними та залежать від конкретних технологій. Є потреба у диференційованому використанні

ВЕУ залежно від параметрів вітру, а для СЕС – від кількості, якості і режиму сонячної радіації.

3. Енергія, що виробляється установками, знаходиться в прямій залежності від базових характеристик природних ресурсів, з одного боку, та підбору технічних засобів – з іншого.
4. Використання ділянок для одного типу установок не перешкоджає використанню для іншого типу. Вітрові та сонячні установки можуть бути встановлені одночасно на одній ділянці.

6. Методика побудови карт сумарного потенціалу

Були побудовані карти сумарного сонячно-вітрового потенціалу за наступною методикою:

Показники:

- Для сонячного потенціалу – сумарна сонячна радіація;
- Для вітрового – середня швидкість вітру.

Алгоритм:

1. За даними метеостанцій побудовані карти сумарної сонячної радіації та середніх швидкостей вітру по місяцях року.
2. За регулярною сіткою квадратів зняті значення показників (понад 500 точок рівномірно по території України).
3. Для вирівнювання ваги показників та надання їм однакової розмірності виконано нормування за дисперсією:

$$X_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / \sigma_j,$$

де x_{ij} – вихідні показники; \bar{x}_j – середнє арифметичне; X_{ij} – нормовані значення; σ_j – середнє квадратичне відхилення.

4. Значення нормованих показників складені в кожній точці – отримано сумарний відносний показник сонячного та вітрового потенціалу.
5. За значеннями побудовані карти сумарного потенціалу сонячних та вітрових ресурсів.

7. Динаміка сонячно-вітрового потенціалу протягом року

Для детального дослідження часової динаміки побудовані діаграми динаміки сонячного, вітрового та сумарного потенціалу у відносних одиницях по обласних центрах України.

Сонячний потенціал:

Поведінка впродовж року є близькою для різних регіонів України через близькість їх географічного розташування. Потенціали мають помітні відмінності не тільки в широтному, а і в меридіональному розподілах. Однак ваги окремих місяців у відносних одиницях є характерними для помірного кліматичного поясу.

Вітровий потенціал:

Поведінка не є настільки однотипною по регіонах, оскільки на характер вітрів більшою мірою впливає навколишній ландшафт. Лісові та степові зони матимуть різний характер, що особливо помітно на висотах до 100 м. Особливий характер вітрів у приморських районах через вплив бризів.

Сумарний сонячно-вітровий потенціал:

Динаміка являє собою усереднену форму динамік сонячного та вітрового потенціалів. Амплітуда коливань є усередненою між значною амплітудою сонячного та незначною амплітудою вітропотенціалу, з урахуванням вагової частки кожної складової.

Оптимізація співвідношень:

Комплексне використання сонячних та вітрових установок дає можливість змінювати часову динаміку отримання енергії. Цю динаміку можна змінювати відповідно до потреб в енергії у різні пори року шляхом знаходження оптимального співвідношення між кількістю або потужністю установок.

Варіанти співвідношень:

- При збільшенні долі сонячної енергетики: Сумарний потенціал в літні місяці збільшується, а в зимові зменшується.
- При збільшенні долі вітрової енергетики: Крива сумарного потенціалу поступово вирівнюється, далі починає збільшуватися потенціал зимових місяців, а літніх зменшуватися.

- Співвідношення $0,5/1 - 0,3/1$ (сонце/вітер): Криві майже вирівнюються, незначні максимуми навесні та мінімуми восени. Прийнятно для територій з незмінною динамікою споживання (промислові райони).
- Співвідношення $< 0,3/1$: З'являються зимові максимуми. Прийнятно для північних регіонів де значна частина енергії витрачається на опалення.
- Співвідношення $> 1/1$: Може використовуватись в південних курортних регіонах з літніми максимумами енергоспоживання.

8. Приклад суміщення вітрової та сонячної енергії (м. Миколаїв)

Одночасні виміри вітру та інсоляції виконувались в Чорноморському державному університеті протягом 461 доби (серпень 2013 – жовтень 2014).

Обладнання:

- Стенд з двох фотоелектричних батарей з полікристалічного кремнію потужністю по 25 Вт кожна;
- Анемометр, калібрований за допомогою еталонних засобів;
- Тривалість одного виміру $< 0,1$ секунди, інтервал опитувань – 1 хвилина.

Результати:

Найбільший вітер був у зимовий період, найбільше сонця – влітку.

Швидкість вітру: Середньодобові значення змінювалися від 0,5 до 5 м/с, середнє значення приблизно 1,85 м/с.

Фотострум: Середньодобові значення у безхмарні дні змінювалися від 0,43 А влітку до 0,26 А взимку. За умов великої хмарності фотострум зменшується у десятки разів, середнє значення сягає лише 0,25 А (у 7 разів менше за максимальний паспортний).

Статистичний аналіз:

Побудована двовимірна гістограма нормованих середньодобових значень швидкості вітру та інсоляції виявила:

- Літня мода: 1,0 за вітром та 1,6 за інсоляцією;
- Зимова мода: 1,2 за вітром та 0,2 за інсоляцією.

Вітрогенератори взимку можуть дещо допомагати сонячним батареям. Але в цілому переважають умови, коли є і сонце і вітер, або навпаки. Низька інсоляція

(велика хмарність, опади, туман) в Миколаєві тримається, доки її не прожене вітер.

9. Акумулявання енергії

Для забезпечення надійного енергопостачання в умовах недостатнього надходження сонячної або вітрової енергії необхідно мати можливість накопичення – акумулявання енергії. Ємність акумуляторів повинна бути тим більшою, чим триваліші провали у надходженні енергії.

Методика дослідження:

Виконано розрахунки "ковзаючого" середнього для нормованих середньодобових значень енергії за умов усереднення на інтервалах 1–7 діб. Результати представлені у вигляді гістограм ймовірності окремо для вітру та інсоляції, і для спільного використання у пропорції 1:1.

Інтерпретація:

Розглядається 3 варіанти енергетичного комплексу з однаковою середньорічною потужністю (умовно 1):

- Вітрогенератор;
- Сонячна установка;
- Композиція з середньорічною потужністю по 0,5 кожна.

Кожний варіант має можливість акумулявати енергію протягом 1–7 діб.

Результати для вітру:

- Випадків падіння потужності нижче 0,1 від середньорічного – не зареєстровано (0%);
- Нижче 0,2 – один випадок (0,2%);
- Нижче 0,3 – три випадки (0,7%);
- Достатньо акумулятора ємністю на 5 діб, щоб звести ймовірність падіння нижче 0,3 до нуля.

Результати для сонця:

- Для порогу 0,1 і акумуляторів на 1 добу: 41 випадок (9%);
- Для порогу 0,3 і акумуляторів на 1 добу: 90 випадків (20%);
- За наявності акумуляторів на 7 діб падіння нижче 0,1 має ймовірність 1,2%, нижче 0,3 – 8%.

Результати для композиції:

Оптимістичні результати для композиції засобів вітрової та сонячної енергії. Достатньо мати акумулятор ємністю на 2 доби, щоб гарантувати, що потужність не впаде нижче порогу 0,3 від середньорічного значення.

10. Оптимізація співвідношення ВДЕ та акумуляторних потужностей

Із збільшенням інтервалу усереднення усі гістограми стискаються ближче до середньорічних значень – зменшуються пульсації. Випадки низьких значень постачання енергії для вітру трапляються значно рідше, ніж для сонця. Випадки тривалої відсутності сонця протягом кількох діб (тижнів) трапляються значно частіше, ніж для вітру. Вітер в умовах Миколаєва є практично завжди.

Вимоги до акумуляторів:

Акумулятори є важливою та найдорожчою частиною альтернативних систем. Від їх якості і ємності залежить надійність і комфортність експлуатації. Не кожна акумуляторна батарея може бути використана в гібридному комплексі "вітрогенератор+фотоелектричні модулі".

Технічні характеристики:

Акумулятори повинні відповідати особливим технічним характеристикам і підвищеною надійністю, з можливістю тривалих і глибоких циклів заряду-розряду.

Економічна оптимізація:

Враховуючи вартість технічних засобів вітряної та сонячної енергетики, а також систем акумулявання, можна знайти оптимальне за економічною рентабельністю рішення щодо співвідношення відповідних потужностей.

Поєднання різних поновлюваних джерел енергії дає можливість гнучко використовувати їх потенціал, згладжувати або підсилювати природні коливання викликані циклічністю природних процесів. Перспективним є пошук та реалізація таких динамік, що відповідали б різним динамікам споживання енергії в різних місцевостях та галузях господарства.

Контрольні питання

1. Які основні шляхи вирішення проблеми нерівномірності часового розподілу сонячної та вітрової енергії?

2. Які особливості розподілу вітрового потенціалу України по сезонах року?
3. Які значення середньорічної кількості сумарної сонячної радіації характерні для території України?
4. Як проявляється залежність сумарної радіації від географічної широти взимку та влітку?
5. Яка методика використовується для побудови карт сумарного сонячно-вітрового потенціалу?
6. Як змінюється динаміка сумарного потенціалу при різних співвідношеннях сонячної та вітрової енергетики?
7. Які результати отримано при дослідженні суміщення вітрової та сонячної енергії в м. Миколаїв?
8. Яка ємність акумуляторів необхідна для забезпечення надійного енергопостачання від вітру та сонця окремо?
9. Які переваги має композиція засобів вітрової та сонячної енергії з точки зору акумулювання?
10. Які технічні вимоги висуваються до акумуляторів у гібридних геліо-вітроенергетичних системах?

Лекція 9

Тема: «Комплексне використання різнотипних ВДЕ. Можливості поєднання в одній енергосистемі»

План

1. Загальний потенціал відновлюваних джерел енергії в Україні
2. Комплексне використання гідроенергетичних ресурсів
3. Інтегральна оцінка сонячного, вітрового та гідравлічного потенціалу
4. Динаміка сумарного потенціалу при різних співвідношеннях ВДЕ
5. Комбіновані геотермальні теплоелектричні станції
6. Використання геотермальних ресурсів з тепловими насосами
7. Комбіновані геотермальні системи з паливним газом
8. Когенераційні геотермальні станції

9. Спільне використання геотермальних ресурсів та біопалива

10. Економічна ефективність комбінованих систем

1. Загальний потенціал відновлюваних джерел енергії в Україні

Станом на лютий 2015 р. (дані IRENA – International Renewable Energy Agency), річний технічно досяжний енергетичний потенціал відновлюваних джерел енергії України становив 68,6 млн т нафтового еквіваленту (Мт.н.е.). У одиницях умовного палива це дорівнює 98 млн т. Цього достатньо, щоб замінити приблизно половину загального енергоспоживання України.

Енергія вітру:

Загальний вітровий потенціал України оцінюється в 16-24 ГВт (ДТЕК, Всесвітня асоціація вітроенергетики). 16 ГВт вважають економічно обґрунтованим потенціалом. Найбільш перспективні регіони – південний та південно-західний, де середня річна швидкість вітру на висоті 80 метрів перевищує 7,5 м/с.

Станом на 2018 рік ці дані істотно переглянуто в більшу сторону внаслідок зміни підходу до визначення потенціалу.

Оцінка середньорічного енергетичного потенціалу ВДЕ України:

Джерело даних	Вид ВДЕ	Потужність (ГВт)	Електроенергія (млрд кВт·год/рік)
IRENA, NREL	ВЕС (разом)	466	1428
	- оншор	320	858
	- офшор	146	570
	СЕС	71	88
	Всього ВДЕ	537	1516
ІВЕ НАНУ	ВЕС (разом)	688	2174
	- оншор	438	1190
	- офшор	250	984
	СЕС	83	99
	Всього ВДЕ	771	2273

Енергостратегія 2035	ВЕС і СЕС	-	25
----------------------	-----------	---	----

Енергія сонця:

Середньорічна кількість енергії сонячного випромінювання в Україні складає від 1070 кВт·год/м² у північних регіонах до 1400 кВт·год/м² у південних, і ще більше на півострові Крим.

Експлуатація обладнання:

- Сонячне фотоелектричне обладнання можна ефективно експлуатувати впродовж року;
- Пікова ефективність: квітень–жовтень у південних областях, травень–вересень у північних.

Сонячна теплова енергія:

Плоскі колектори, які можуть використовувати і пряме, і дисперсне сонячне випромінювання, є найбільш прийнятною опцією для України, зокрема для північних регіонів. Сонячні колектори, які концентрують промені, ефективно використовувати у південних регіонах.

Біомаса:

Україна має великий потенціал для розширення використання біомаси, здебільшого для теплопостачання. До земель сільськогосподарського призначення належать 42,8 млн га (71% території), 32,5 млн га є орними.

Економічно обґрунтований потенціал біоенергії перевищує 800 ПДж/рік (чверть загального енергоспоживання). Половина припадає на сільськогосподарські відходи та деревну біомасу, інша половина – на енергетичні культури та біогаз.

Ресурсний потенціал деревної біомаси: 4 Мт щорічно (відходи лісопилок, лісозаготівлі, дрова, технічна деревина). Щороку на полях лишається більше 10 Мт соломи.

Потенціал біомаси (IRENA, до 2030): 1115–1780 ПДж. На залишки сільського господарства (біогаз) припадає 53–58%, на залишки лісового господарства – 12%, енергетичні культури та паливна деревина – 19–31% та 0–15% відповідно.

Енергія води:

Технічно обґрунтований потенціал становить 21,5 ТВт·год на рік, що більш ніж вдвічі перевищує 10,4 ТВт·год, вироблені у 2013 р. Річний технічно досяжний потенціал малих ГЕС оцінюють на рівні 20,1 ТВт·год.

Існуючі потужності малих ГЕС – 75-90 МВт. Малі ГЕС складають незначну частку (0,2%), проте малі річки в Україні, особливо у західних областях, складають майже 28% від загального потенціалу річок. Потенціал особливо високий у Закарпатській та Чернівецькій областях.

2. Комплексне використання гідроенергетичних ресурсів

Підрахунок потенційних гідроенергетичних ресурсів малих і середніх річок визначає запаси гідравлічної енергії по всій території країни. Для цього необхідно знати розподіл запасів по території через питомі величини потенціальної потужності на метр падіння дна, на кілометр довжини річки, та на квадратний кілометр басейну.

Територіальний розподіл:

Енергетичний потенціал малих і середніх річок за територією України розподілений вкрай нерівномірно.

Максимальні значення: Район Карпат через значну кількість опадів та значні перепади висот. Потенціал у десятки разів вищий ніж у середньому для України. У гірських областях (Львівській, Закарпатській, Івано-Франківській, Чернівецькій) зосереджено 71,7% усіх енергетичних ресурсів малих річок.

Середні значення: Сім областей Подільської височини (Вінницька, Житомирська, Київська, Кіровоградська, Тернопільська, Хмельницька, Черкаська) – 14,2%. Західні некарпатські райони характеризуються відносно великими значеннями кількості опадів та перепадів висот.

Мінімальні значення: Південні райони країни через невелику кількість опадів, незначну кількість малих річок, переважання великих транзитних річок. Херсонська і Запорізька області майже не мають потенційних запасів. Потенціал наближається до нульових значень протягом літніх та зимових місяців.

Сезонна динаміка:

Протягом зимових місяців гідропотенціал за територією змінюється значно менше, ніж протягом весняних місяців під час повені, коли максимальні значення

зростають на два порядки. Протягом року гідропотенціал змінюється однаковою мірою в усіх районах країни через дію однакових факторів.

3. Інтегральна оцінка сонячного, вітрового та гідравлічного потенціалу

Розглянемо комплексне поєднання сонця, вітру та води річок для електроенергетики. Ці ресурси характеризуються мінливою природою залежно від сезону та погоди, хоча темпи змін суттєво різні:

- СЕС: Поточна потужність може змінитись в рази за секунди;
- ВЕС: Зміни за хвилини;
- ГЕС: Зміни за дні.

Середні показники потенціалу можна співставляти по окремих місяцях.

Методика інтегральної оцінки:

Складено дані потенціалів трьох видів ВДЕ у відносних одиницях для різних регіонів України помісячно для виявлення ефектів взаємного доповнення та стабілізації сумарної потужності відповідних електростанцій. Розглянуто паритетні та нерівні співвідношення окремих видів ВДЕ.

4. Динаміка сумарного потенціалу при різних співвідношеннях ВДЕ

Співвідношення 1/1/1 (сонце/вітер/гідро):

При паритетній потужності малих ГЕС з іншими видами джерел в регіонах, багатих на гідроресурси, спостерігається значний вплив весняних паводків, що частково збігається з активізацією сонячної активності. Це спричиняє істотну нерівномірність генерації енергії.

Співвідношення 1/1/0,5:

Зменшення частки ГЕС дещо пом'якшує ситуацію, згладжуючи весняні піки генерації.

Аналіз природних ресурсів для розвитку сонячної, вітрової та гідравлічної енергії показує, що вони досить динамічно та за різними закономірностями змінюються просторово (за територією) і в часі (протягом року). Їх просторові і часові складові динаміки не співпадають, що робить доцільним дослідження сумарного потенціалу як комплексного явища.

Це дає можливість більш гнучко використовувати їх потенціал, згладжувати чи підсилювати природні коливання, викликані циклічністю природних процесів в різних часових масштабах.

5. Комбіновані геотермальні теплоелектричні станції

Україна має значну кількість геотермальних джерел з високим температурним потенціалом в діапазоні 120-180°C. Таких температур достатньо для виробництва електроенергії. Придатними вважаються вже рівні понад 80°C за умови подвійного циклу нагрівання.

Потенціал: За різними оцінками потенціал економічно значних енергетичних ресурсів термальних вод в Україні становить 8,4 Мт.н.е./рік.

Діючі системи:

Опалення за рахунок геотермальних вод працює на півострові Крим, де в експлуатації перебуває 11 систем циркуляції геотермальних вод. Працюють пілотні і промислові установки.

Великі запаси термальних вод винайдені у Чернігівській, Полтавській, Харківській, Луганській та Сумській областях. Сотні свердловин термальних вод законсервовані, але можуть бути розконсервовані.

Перспективи розвитку:

Розвиток геотермальної енергетики дозволяє вирішувати проблему автономного децентралізованого електро- і теплопостачання в окремих регіонах. Уже розвідані запаси можуть забезпечити роботу:

- Геотермальних електростанцій сумарною потужністю близько 410 МВт;
- Систем геотермального теплопостачання сумарною потужністю до 12400 МВт.

Можливе отримання з термальної води цінних хімічних речовин і сполук та бальнеологічне застосування.

6. Використання геотермальних ресурсів з тепловими насосами

Прикладом локальної системи є система опалення корпусу №2 Ботанічного саду, яка дозволяє здійснювати опалення окремо по поверхах. Номінальна теплова потужність для опалення першого поверху становить 20 кВт.

Джерело теплоносія:

Джерелом низькопотенційного теплоносія у теплонасосній установці (ТНУ) є ґрунтова вода. Основними елементами є ТНУ і підземний акумулятор тепла.

Принцип роботи:

У нічний період використовується електроенергія за нічним тарифом. Для раціонального використання потужності теплового насосу доцільно в нічний період надлишок тепла акумулювати за допомогою підземного акумулятора.

Робота теплового насосу, за винятком незначного періоду максимального теплового навантаження (360 годин), відбувається при максимальній продуктивності тільки вночі. В цей період проводиться вироблення тепла для опалення будинку і для його акумулювання. Після завершення нічної фази використовують тепло з акумулятора, а потім включається тепловий насос у режимі, який потребують теплоспоживачі.

Технічні параметри:

Температура пластової води становить $+13^{\circ}\text{C}$. Така температура дозволяє ефективно використовувати теплові насоси для опалення і гарячого водопостачання. Максимальна теплова продуктивність для опалення становить 127,6 кВт. Таку потужність забезпечить вода з дебітом 15,7 м³/год при перепаді температури 7°C .

Технічні характеристики (приклад):

Показник	Величина
Максимальне теплове навантаження	127,6 кВт
Номінальна теплова продуктивність ТНУ	128,0 кВт
Потужність, що споживає ТНУ	34,8 кВт
Потужність циркуляційного насосу	1 кВт
Витрати води	7,3 м ³ /год
Об'єм підземного акумулятора тепла	27,0 м ³

Глибина водяної свердловини	120 м
Температура води на виході	13°C
Потужність зануреного насоса	6 кВт
Тривалість опалювального періоду	4416 годин
Кількість виробленого тепла	388,6 Гкал

Робота ТНУ системи "вода-вода" забезпечує сталу роботу протягом всього періоду теплопостачання і не потребує додаткових заходів для забезпечення потрібного графіку постачання тепла.

7. Комбіновані геотермальні системи з паливним газом

Значний інтерес представляють родовища з термальними водами, які містять паливний газ. Родовища знаходяться головним чином у нафтогазовидобувних регіонах Криму, Закарпаття і Дніпровсько-Донецької западини.

Когенераційна технологія:

Термальна вода, що містить значну кількість газу (коли в одному м³ термальної води міститься більше одного м³ газу при нормальних умовах), доцільно використовувати когенераційну технологію спалювання відділеного газу.

Схема роботи:

1. Термальна вода, яка містить розчинений газ, поступає в сепаратор, розділяється на рідку та газоподібну фази;
2. Термальна вода подається в теплообмінник геотермальний, віддає теплоту мережевій воді, охолоджується;
3. Відпрацьована термальна вода нагнітається в термоводоносний горизонт;
4. Газ подається в газопоршневий двигун, з'єднаний з електрогенератором;
5. Мережева вода додатково підвищує температуру за рахунок утилізації скидної теплоти;
6. Утилізується теплота викидних газів газопоршневого двигуна.

8. Когенераційні геотермальні станції

Визначення максимальної відстані транспортування:

Приклад для попередньо ізолюваного трубопроводу 315/219:

- Тепловитрати при режимі $(90-70)^{\circ}\text{C}$ і температурі ґрунту 10°C – 32 Вт;
- Втрати температури на 1 км – $0,24^{\circ}\text{C}$;
- Тепловитрати при режимі $(60-40)^{\circ}\text{C}$ – 20 Вт;
- Втрати температури на 1 км – $0,15^{\circ}\text{C}$.

Кількість теплоти при обох режимах однакова – 2630 кВт. Теплові витрати не повинні перевищувати 13% (342 кВт).

Максимальна відстань транспортування:

При втратах 0,76% на 1 км: $13/0,76 = 17$ км.

Якщо температура геотермального теплоносія 90°C , а потрібна температура на вході в теплообмінник 70°C , можливо допустити втрати 20°C : $20/0,15 = 133$ км.

Маневрові функції:

Виробництво електроенергії за допомогою газотурбінних електростанцій може відбуватись в режимі маневрових електричних потужностей. Залежно від потужності вони можуть виконувати функцію згладжування пікових навантажень електромережі.

9. Спільне використання геотермальних ресурсів та біопалива

Можливе використання газонасиченої термальної води, яка характеризується відносно невеликим вмістом розчиненого горючого газу (коли в одному м³ термальної води міститься до одного м³ газу при нормальних умовах) в технологіях спалювання біогазу.

Схема роботи:

1. Термальна вода поступає в сепаратор, розділяється на рідку та газоподібну фази;
2. Термальна вода подається в мережевий підігрівач, віддає теплоту, охолоджується;
3. Відпрацьована вода спрямовується на хімічні, бальнеологічні та господарські потреби або нагнітається в термоводоносний горизонт;

4. Газ, відділений в сепараторі, подається в газопровід, де змішується з біогазом;
5. Змішування виконується для збільшення теплотворної спроможності суміші газів та стабільної роботи газопоршневого двигуна;
6. Газопоршневий двигун з'єднаний з електрогенератором для виробітку електроенергії;
7. За рахунок утилізації скидної теплоти відбувається нагрів мережевої води.

10. Економічна ефективність комбінованих систем

Перспективним напрямком підвищення ефективності і конкурентоздатності геотермальних енергоустановок є створення когенераційних геотермальних станцій. Для одночасного вироблення електроенергії і теплоти можливе використання декількох технологічних схем. Це пояснюється різноманітністю параметрів і фізико-хімічних властивостей, що залежать від природних умов родовища.

Головна проблема: Відстань до теплоспоживача, оскільки при великій відстані необхідні відносно великі витрати на прокладення траси тепlopостачання.

Перспективи:

Реальні перспективи практичного використання геотермальних когенераційних установок визначаються їхньою економічною ефективністю в порівнянні з установками, що використовують органічне паливо. Комбіновані системи дозволяють максимально використовувати наявні енергетичні ресурси та підвищити загальну ефективність енергопостачання.

Контрольні питання

1. Який загальний технічно досяжний енергетичний потенціал відновлюваних джерел енергії України?
2. Як розподілений енергетичний потенціал малих і середніх річок за територією України?
3. Які особливості сезонної динаміки гідроенергетичного потенціалу України?
4. Як відрізняються темпи змін поточної потужності СЕС, ВЕС та ГЕС?

5. Який температурний діапазон геотермальних джерел в Україні придатний для виробництва електроенергії?
6. Який принцип роботи теплонасосної установки з підземним акумулятором тепла?
7. Які переваги має когенераційна технологія використання термальних вод з паливним газом?
8. Яка максимальна відстань доцільного транспортування теплової енергії при різних температурних режимах?
9. Як можна комбінувати використання геотермальних ресурсів та біопалива?
10. Які основні фактори визначають економічну ефективність комбінованих геотермальних систем?

Лекція 10

Тема: «Воднева енергетика, методи отримання водню із застосуванням відновлюваних джерел енергії. Оптимізація параметрів системи отримання водню»

План

1. Система «вітер-водень»: принцип роботи та переваги
2. Математична модель системи «вітер-водень»
3. Світовий досвід та вартість виробництва водню
4. Вихідні дані для визначення собівартості водню в Україні
5. Обсяги виробництва при різних конфігураціях обладнання
6. Розрахунки собівартості водню
7. Оптимізація співвідношення потужностей ВЕУ та електролізерів
8. Вплив вітрового потенціалу на собівартість водню
9. Спільна робота комплексу «вітер-водень» і сонячної електростанції
10. Економічна доцільність комбінування ВДЕ

1. Система «вітер-водень»: принцип роботи та переваги

Промислове виробництво водню стало можливо завдяки створенню електролізера, що розщеплює воду на водень і кисень. Водень запасється і

згодом використовується як паливо, кисень виводиться в атмосферу або утилізується для технічних потреб.

Принцип роботи:

Воднева установка, яка отримує електроенергію від вітроенергетичної установки, називається вітро-водневою установкою і є прообразом майбутніх безперебійних енергетичних станцій на основі екологічно чистих технологій.

Режими роботи:

- При наявності вітру установка видає електроенергію споживачеві і одночасно запасає водень у спеціальних балонах;
- За відсутності вітру використовує накопичений водень і видає електроенергію споживачеві.

Програма «вітер-водень»:

Була предметом досліджень Національної лабораторії з відновлюваної енергетики (NREL) у США. Мета – оптимізувати економічну складову використання водню в енергосистемах різної конфігурації. Виконано аналіз централізованого виробництва водню (The Wind-to-Hydrogen Project, 2009).

Економічна доцільність:

Хоча загалом енергоефективність сучасних електролізерів та паливних комірок невисока, існує додаткова користь від використання надлишкової енергії ВЕС в період позапікових навантажень, коли споживання електроенергії падає.

Переваги:

- Повніше використання потенціалу ВЕС в ізолюваних енергосистемах;
- Зниження втрат від вимушених зупинок ВЕУ;
- Забезпечення неперервності роботи генеруючої системи;
- Накопичення енергії для використання при пікових навантаженнях;
- Можливе спільне виробництво електроенергії та водню як кінцевого продукту.

Конфігурація системи:

Мінімальна конфігурація автономної системи передбачає наявність вітроелектричної установки (ВЕУ) для виробництва електроенергії та електролізера (ЕЛ) для виробництва водню. Однак ефективність такої системи

буде незначною внаслідок тривалих простоїв чи неповного завантаження обладнання.

Покращення економічних показників:

Доповнення системи елементами, що дозволяють повніше утилізувати вітрову енергію:

- Накопичення чи побічне використання зайвої електроенергії;
- Додаткові джерела енергії (мережа або інші ВДЕ, зокрема сонячні панелі).

Сценарії оцінки собівартості:

1. Єдиним кінцевим продуктом є водень;
2. Надлишкова електроенергія споживається всередині автономної енергосистеми (вартість за тарифами для споживачів);
3. Надлишкова електроенергія надається іншому користувачеві (вартість за "зеленим" тарифом).

2. Математична модель системи «вітер-водень»

З теорії вітрової енергетики вироблена ВЕУ за час T електроенергія визначається:

$$EW = T \int P(v)f(v)dv \text{ (кВт}\cdot\text{год)},$$

де $P(v)$ – енергетична характеристика ВЕУ (крива потужності), кВт; $f(v)$ – функція щільності розподілу швидкості вітру; v – поточна швидкість вітру.

Розподіл Вейбула:

Щільність розподілу швидкості вітру моделюють функцією Вейбула: $f(v) = (\beta/\alpha)(v/\alpha)^{\beta-1}\exp[-(v/\alpha)^\beta]$

Крива потужності:

Загальна форма має вигляд:

- $P(v) = 0$, при $v \leq V_0$ або $v \geq V_m$
- $P(v) = P(v, a_1, a_2, \dots)$, при $V_0 < v < V_p$
- $P(v) = PW$, при $V_p \leq v < V_m$

де V_0 , V_p та V_m – відповідно стартова, розрахункова (що відповідає номінальній потужності PW) та максимальна швидкості вітру.

Споживана потужність електролізера:

Природно припустити, що вона не перевищує номінальної потужності ВЕУ. Доцільніше використовувати ЕЛ потужністю, близькою до середньої за час експлуатації поточної потужності ВЕУ.

Вироблений обсяг водню:

$$N = k \cdot EE \text{ (нм}^3\text{)},$$

де $k = 0,25 \text{ нм}^3/\text{кВт} \cdot \text{год}$ – середній рівень продуктивності електролізу (на практиці споживана потужність становить $3,85\text{-}4,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{нм}^3$).

Надлишкова електроенергія:

$$E = EW - EE \text{ (кВт} \cdot \text{год)}$$

Оптимізація системи:

Передбачає таке співвідношення номінальних потужностей ВЕУ та ЕЛ, при якому буде досягнуто найкращих показників виробітку продукції. При обмежених потужностях можна досягти мінімальної собівартості продукції (водню), необхідної для максимальної прибутковості проекту.

Економічний результат:

Виражається у вартості кінцевої продукції порівняно з понесеними затратами (або собівартості продукції).

Традиційне визначення собівартості:

$$cB = (\alpha_1 CW + \alpha_2 CE - t(EW - EE)) / (kEE),$$

де α_i – відсоток щорічних витрат (амортизація та експлуатаційні витрати); CW та CE – капітальні витрати вітрової та електролізної складових; t – тариф на електроенергію; k – продуктивність виробництва водню.

3. Світовий досвід та вартість виробництва водню

Дослідження NREL (США, 2009):

Для системи, пов'язаної з електромережею, отримано початкові результати собівартості водню на рівні $4\text{-}6 \text{ \$/кг}$ залежно від вітрового класу території та висоти ВЕУ, з перспективою подальшого зниження за рахунок вдосконалення технології.

Собівартість водню суттєво залежала від вартості електроенергії та частки безпосереднього використання потужності ВЕУ.

Дослідження в Туреччині (2015):

- Інтегровані в мережу системи: 4-9 \$/кг;
- Автономні системи: 12-22 \$/кг.

Для інтегрованих з мережею систем собівартість варіює в межах 4-9 \$/кг залежно від висоти ВЕУ, з перспективою зниження за рахунок вдосконалення технологій. Для автономних систем собівартість принаймні удвічі вища.

Перерахунок у об'ємні одиниці:

Щільність водню як газу становить 0,09 кг/м³, тобто 1 кг водню становить 11,13 м³, а теплотворна здатність 28630 ккал/кг. За теплотворністю 1 кг водню приблизно відповідає галону (3,8 л) моторного палива, або 1 л бензину тотожний 3 м³ водню.

Собівартість у об'ємних одиницях:

- Інтегровані в мережу системи: 0,4-0,9 \$/м³;
- Автономні системи: 1-2 \$/м³.

Фактори впливу на собівартість:

- Фіксовані капітальні витрати;
- Приведена річна вартість запасних частин;
- Обслуговування та експлуатація;
- Зберігання та збут продукції;
- Вартість електроенергії;
- Продуктивність ВЕУ.

4. Вихідні дані для визначення собівартості водню в Україні

Вартісні показники (2015 рік):

Споживання електроенергії (тарифи Київенерго):

- До 100 кВт·год/місяць: 36,6 коп./кВт·год (0,016 €/кВт·год);
- 100-600 кВт·год: 63,0 коп./кВт·год (0,027 €/кВт·год);
- Понад 600 кВт·год: 140,7 коп./кВт·год (0,061 €/кВт·год).

"Зелений" тариф для вітроенергетики (з 01.07.2015):

- До 600 кВт: 0,058 €/кВт·год;
- До 2000 кВт: 0,068 €/кВт·год;
- Понад 2000 кВт: 0,102 €/кВт·год.

Капітальні витрати:

За даними Європейської вітроенергетичної асоціації (EWEA, 2014):

- Вартість 1 кВт встановленої потужності ВЕС: 1160-1600 євро;
- В Україні (2011-2014): 2700 €/кВт;
- Прийнятий середній рівень: 1,5 тис. €/кВт;
- Для малих ВЕС: 2,0 тис. €/кВт.

Електролізери:

За розрахунками вітчизняних експертів (ІПМ ім. Підгорного, Харків):

- Обладнання для електролізу: 14-18 тис. € за потужність 1 нм³/год;
- В середньому близько 16 тис. €.

Амортизація та експлуатація:

- Термін експлуатації обладнання: 20 років;
- Щорічні амортизаційні відрахування: 5%;
- Експлуатаційні витрати: 1%;
- Річна вартість експлуатації: 6% вартості обладнання.

Розрахункові витрати:

- Для ВЕУ: 90 €/кВт (для малих до 120 €/кВт);
- Для ЕЛ: приблизно 950 € за продуктивність 1 нм³/год, або 240 €/кВт.

Дослідна площадка:

Практичні дослідження виконувались Інститутом відновлюваної енергетики спільно з ІПМ ім. Підгорного на площадці в Переяслав-Хмельницькому районі Київської області (2012-2015). Використано дані метеостанції Яготин за 2013-2014 роки.

5. Обсяги виробництва при різних конфігураціях обладнання

Розглянуті типи ВЕУ:

1. ВЕУ-075:

- Номінальна потужність: 0,75 кВт;
- Стартова швидкість: 2,5 м/с;
- Номінальна швидкість: 7,5 м/с;
- Максимальна швидкість: 45 м/с;
- Термін експлуатації: 20 років;
- Висота: 11 м.

2. ВЕУ WE-8000:

- Номінальна потужність: 8 кВт;
- Стартова швидкість: 3-4 м/с;
- Номінальна швидкість: 10 м/с;
- Висота: 24 м.

3. ВЕУ Т600-48:

- Номінальна потужність: 600 кВт;
- Стартова швидкість: 3,5 м/с;
- Номінальна швидкість: 12 м/с;
- Максимальна швидкість: 25 м/с;
- Висота: 60 м.

Технічні характеристики електролізерів високого тиску (ІПМ ім. Підгорного):

Параметр	ЕВД 0,2-150	ЕВД 0,5-150	ЕВД 1,0-150
Продуктивність Н ₂ , м ³ /год	0,2	0,5	1,0
Продуктивність О ₂ , м ³ /год	0,1	0,25	0,5
Чистота Н ₂ , %	99,98	99,98	99,98
Чистота О ₂ , %	99,95	99,95	99,95
Робочий тиск, МПа	0,1-15	0,1-15	0,1-15
Споживана потужність, кВт·год/м ³	3,85-4,1	3,85-4,1	3,85-4,1
Витрати води на 1 м ³ Н ₂ , кг	0,84±0,02	0,84±0,02	0,84±0,02

Продуктивність ВЕУ на дослідній площадці (кВт·год):

Місяць	ВЕУ-075 (2014)	WE-8000 (2014)	Т600-48 (2014)
Січень	145	800	48050
Лютий	65	220	14000
Березень	133	765	48200

Квітень	96	490	29600
Травень	73	320	19600
Червень	77	305	18750
Липень	65	250	15550
Серпень	55	205	13050
Вересень	73	320	19900
Жовтень	69	295	18100
Листопад	89	420	25600
Грудень	82	305	18900
За рік	1023	4700	289300
КВВП	0,157	0,067	0,055

Коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) загалом низький через незначний вітровий потенціал площадки. Середня швидкість вітру у 2014 р. становила 2,55 м/с на висоті 10 м.

Приклади конфігурацій:

ВЕУ-075 та ЕВД 0,2-150:

- 1 ВЕУ: водень 255 нм³, зайва енергія 0 кВт·год;
- 2 ВЕУ: водень 496 нм³, зайва енергія 61 кВт·год;
- 3 ВЕУ: водень 681 нм³, зайва енергія 344 кВт·год;
- 4 ВЕУ: водень 814 нм³, зайва енергія 837 кВт·год.

При використанні однієї ВЕУ та одного електролізера він буде навантажений лише на одну сьому можливості. Зростання числа ВЕУ збільшує завантаженість ЕЛ, проте рівень використання можливостей самих ВЕУ знижується.

6. Розрахунки собівартості водню

Приклад для ВЕУ 0,75 кВт, ЕЛ 0,2 нм³/год:

Кількість ВЕУ	1	2	3	4	5
---------------	---	---	---	---	---

Витрати, €/рік	310	430	550	670	790
Собівартість H ₂ , €/нм ³	1,2	0,8	0,8	0,8	0,8
	2	7	1	2	7
Вартість ел. енергії, €/рік	0	1,0	5,5	13,4	23,5
Остаточна собівартість H ₂ , €/нм ³	1,2	0,8	0,8	0,8	0,8
	2	6	0	1	4

Приклад для ВЕУ 600 кВт та модулів ЕЛ 6,0 м³/год:

Кількість модулів	1	2	3	4	10
Витрати, €/рік	5970	6540	7110	7680	11100
	0	0	0	0	0
Собівартість H ₂ , €/нм ³	1,95	1,51	1,43	1,39	1,63
Ел. енергія, €/рік	1019				
	0	7090	5520	4170	1070
Остаточна собівартість, €/нм ³	1,62	1,35	1,32	1,32	1,62
За "ЗТ", €/нм ³	1,58	1,33	1,31	1,31	1,61

7. Оптимізація співвідношення потужностей ВЕУ та електролізерів

Для якісної оцінки впливу співвідношень кількості установок на собівартість водню проведено аналіз.

Оптимальні співвідношення:

- ВЕУ-075 (малопотужні з малою стартовою швидкістю): Найкраще співвідношення – 3 ВЕУ по 0,75 кВт та один ЕЛ 0,8 кВт, тобто співвідношення потужностей 3:1.
- ВЕУ WE-8000 (8 кВт): Оптимальне співвідношення – 2 ВЕУ до 3 ЕЛ, або по потужності 6:1; у випадку ЕЛ 4 кВт оптимальне співвідношення 4:1.
- ВЕУ T600-48 (600 кВт): Оптимальне співвідношення 6:1; при продажу електроенергії за "зеленим" тарифом частку ЕЛ можна зменшити до рівня 8:1.

Стрибкоподібна зміна співвідношень викликана модульним принципом вибору обладнання – його потужність не може змінюватися плавно при обраних типорозмірах.

8. Вплив вітрового потенціалу на собівартість водню

Для оцінки впливу вітрового потенціалу використано умовну площадку з заданою середньою річною швидкістю вітру, розподіл імовірності якої описується функцією Вейбула.

Результати:

Для потужних ВЕУ при швидкості вітру понад 5 м/с:

- Оптимальне співвідношення потужностей залишається 6:1;
- Собівартість водню: 0,6 €/нм³ без урахування продажу електроенергії;
- З урахуванням продажу: 0,4 €/нм³;
- Тенденція до зниження при зростанні середньої швидкості вітру.

Для малих ВЕУ з низькою стартовою швидкістю (типу ВЕУ-075):

- Собівартість водню: 0,33 €/нм³;
- Оптимальне співвідношення: 3:1;
- При швидкості вітру 7 м/с собівартість знижується до 0,25 €/нм³, співвідношення зміщується до 2:1.

Загалом рівень собівартості водню співмірний з аналогічними зарубіжними результатами для автономних систем. Застосування спеціальних ВЕУ, розрахованих на малі швидкості вітру, дозволяє досягти конкурентоздатних вартостей водню.

9. Спільна робота комплексу «вітер-водень» і сонячної електростанції

Обсяг потенціалу сонячної енергії:

Додатковим джерелом живлення електролізера можна використовувати сонячні батареї, які також належать до ВДЕ і можуть працювати в автономному режимі.

Очікувані переваги:

- Можливість більш стабільного живлення в часи відсутності вітру.

Недоліки:

- Використання тільки в денний час і лише в ясну погоду;

- Порівняно висока вартість фотопанелей.

Рівень інсоляції (дані NASA, 1983-2005, Київська область):

Місяць	січ.	лют.	бер.	квіт.	трав.	черв.	лип.	серп.	вер.	жовт.	лист.	груд.
кВт·год/м ² /день	1,0	1,8	2,9	3,9	5,25	5,22	5,2	4,67	3,1	1,94	1,02	0,86
	7	7	5	6			5		2			

Математична модель:

Передбачає представлення поточної потужності вітрових та сонячних установок у вигляді випадкових процесів. Вважається, що фотомодуль має постійний коефіцієнт корисної дії (16-18%), а електрична потужність СЕС пропорційна рівню сонячної радіації зі сталим коефіцієнтом.

Розглянутий варіант:

ВЕУ 0,75 кВт – 3 шт., СЕС 1,0 кВт; електролізер 0,2 нм³/год (0,8 кВт).

Показники роботи системи «вітро-водень»:

Місяць	Всього енергії (кВт·год)	Водень (нм ³)	Зайва енергія (кВт·год)
Березень	405	83	73
Червень	247	56	23
Вересень	242	54	26
Грудень	270	62	22
За рік	3270	715	405

Показники роботи системи «вітро-водень плюс СЕС»:

Місяць	Всього енергії (кВт·год)	Водень (нм ³)	Зайва енергія (кВт·год)
Березень	510	94	134
Червень	438	85	98

Вересень	324	70	44
Грудень	285	65	25
За рік	4370	880	845

Результати:

Наявність СЕС номінальною потужністю 1 кВт додатково до ВЕС потужністю 2,25 кВт забезпечило б:

- Загальне збільшення виробітку електроенергії на 33%;
- Спожитої для виробництва водню – на 23%.

10. Економічна доцільність комбінування ВДЕ

Завантаження обладнання:

Наявність СЕС призводить до частішого перевищення максимальної потужності електролізу і необхідності утилізувати надлишкову електроенергію. Надходження сонячної енергії помітне в основному в літні місяці (взимку лише декілька відсотків), тому завантаження обладнання для електролізу виявляється нерівномірним.

Показники використання потужності (з одним ЕЛ 0,8 кВт):

Показник	Тільки ВЕУ	ВЕУ + СЕС
Використання потужності < 50%	59%	49%
Тривалість повного простою	13%	9%
Надлишкова потужність	16%	26%

Вартісні показники:

Для фотоелектричних модулів з супутнім обладнанням питому вартість можна вважати близькою до вартості малих ВЕУ. У розглянутій конфігурації:

- Річний обсяг витрат зростає на 30%;
- Очікуване зростання виробництва водню на 23%;
- Собівартість водню зростає приблизно на четверть.

Висновки:

1. При відповідних цінових показниках та кліматичному потенціалі можливо сформуванати систему з ВДЕ та електролізерів, для якої співвідношення потужностей забезпечить мінімальну собівартість водню.
2. Розрахунковий рівень собівартості водню з використанням вітчизняного обладнання співмірний з аналогічними зарубіжними результатами для автономних систем.
3. Сумісне використання вітрової та сонячної енергії доцільне в сенсі зростання загального виробництва електроенергії, але при цьому зростає нерівномірність генерування, оскільки робота СЕС неможлива у нічні години.
4. Якщо планувати роботу обладнання лише на денний час, використання СЕС стає цілком виправданим.
5. Остаточний висновок про доцільність комбінування ВЕС та СЕС має стосуватися конкретної місцевості та цінових співвідношень обладнання.

Контрольні питання

1. Який принцип роботи вітро-водневої установки та які її основні переваги?
2. Як математично описується вироблена ВЕУ електроенергія?
3. Який діапазон собівартості водню для інтегрованих в мережу та автономних систем за світовими дослідженнями?
4. Які основні складові капітальних витрат при створенні системи «вітер-водень» в Україні?
5. Які технічні характеристики електролізерів високого тиску розробки ПІМ ім. Підгорного?
6. Яке оптимальне співвідношення потужностей ВЕУ та електролізерів для різних типів обладнання?
7. Як впливає вітровий потенціал площадки на собівартість водню?
8. Які переваги та недоліки має додавання сонячних батарей до системи «вітер-водень»?
9. Як змінюються показники виробництва водню при додаванні СЕС до системи?

10. За яких умов економічно доцільне комбінування вітрової та сонячної енергії для виробництва водню?

Лекція 11

Тема: «Класифікація гібридних систем. Використання відновлюваних джерел енергії в гібридній енергосистемі»

План

1. Особливості комбінованих систем енергопостачання з ВДЕ
2. Мережеві гібридні енергосистеми
3. Автономні гібридні енергосистеми
4. Локальні енергосистеми (Microgrid)
5. Показники надійності енергозабезпечення
6. Індекси втрати навантаження (LOLE, LOEE, LOLF)
7. Показники для автономних систем (LPSP, EXC, WE)
8. Критерії оптимізації гібридних систем
9. Балансова надійність енергосистем з ВДЕ
10. Багатокритеріальна оптимізація гібридних систем

1. Особливості комбінованих систем енергопостачання з ВДЕ

Гібридні електростанції на основі ВДЕ – це комбіновані системи електроживлення, в яких, крім сонячних батарей чи вітрогенераторів, для забезпечення електроенергією можуть використовуватися інші джерела: централізована електромережа, бензинові або дизельні електроагрегати. Для резервування енергії застосовуються системи акумулювання, потреба в них залежить від наявності централізованої електромережі та вимог до якості живлення.

Режими роботи:

Елементи комбінованої системи можуть працювати в паралельному, послідовному або послідовно-паралельних режимах. Здебільшого система працює в паралельному режимі, коли електроенергію виробляють одночасно всі елементи.

Фактори функціонування:

Внутрішні фактори: Функція перетворення енергії джерела в електричну енергію, максимальна потужність установки або конструктивний параметр, що характеризує вихідну потужність.

Зовнішні фактори: Контрольовані та неконтрольовані подачі носія енергії, який використовується генеруючими установками.

Досягнення високих показників:

Високі техніко-економічні показники застосування ВДЕ, стабільні робочі параметри енергетичного обладнання і надійне енергопостачання споживачів досягаються при:

- Комбінованому виробленні електричної і теплової енергії;
- Комплексному акумулюванню при поєднанні з технологіями традиційної енергетики;
- Застосуванню допоміжного обладнання для автоматичного управління режимами роботи.

Фактори вибору ВДЕ в енергосистемах:

- Рівень забезпечення регіону традиційними і нетрадиційними джерелами енергії з урахуванням їх потенціалу;
- Кліматичні (метеорологічні) умови;
- Структура систем енергопостачання і енергоспоживання;
- Вимоги до якості електричної і теплової енергії;
- Тип і параметри навантаження;
- Вимоги до погодинного графіка енергопостачання;
- Економічні та екологічні фактори.

Регіональні особливості:

У середній і північній зонах України недостатню кількість енергії від вітрових і сонячних установок доцільно компенсувати використанням традиційного палива. Для південних областей додатковим застосуванням пасивного теплового акумулювання влітку можна досягти повної автономності.

Варіанти комбінованих систем:

- Повністю автономні;

- Сполучені з загальною енергосистемою;
- З накопиченням енергії чи без нього;
- З використанням лише ВДЕ чи у поєднанні з генераторами від паливних джерел.

2. Мережеві гібридні енергосистеми

Інтеграція комбінованих сонячних і вітряних енергетичних систем в загальну електромережу може сприяти зниженню загальних витрат і підвищенню надійності вироблення електроенергії з ВДЕ. Мережа приймає надлишок потужності ВДЕ і компенсує нестачу.

Топології мережевих систем:

Спільна шина постійного струму: Окремі блоки можуть бути приєднаними до спільної шини постійного струму, що інтегрується до мережі через інвертор, який контролює напругу шини. Окремі блоки використовуються для досягнення максимальної потужності фотоелектричних і вітрових систем. Банк батарей акумулятора заряджається при надлишковій потужності і розряджається при дефіциті.

Спільна шина змінного струму: Відновлювані джерела можуть передавати енергію безпосередньо до мережі через індивідуальні інвертори.

Проблеми та рішення:

Хоча гібридна мережа зменшує обсяг процесів перетворення струму, виникають практичні проблеми при застосуванні в інфраструктурі з домінуванням змінного струму. Потрібні спеціальні контролери для динамічної підтримки напруги і стійкості перехідних процесів.

Головні проблеми мережевих енергосистем:

Проблема	Засоби вирішення
Флуктуації напруги при варіюванні швидкості вітру та сонячної радіації	Шунтуючі фільтри, силові компенсатори. Використання устаткування, менш чутливого до дисбалансу потужності

Коливання частоти при раптовій зміні потужності споживання	Контроль ширини імпульсу інвертора (PWM-контролер)
Спотворення форми змінного струму	PWM-конвертор та відповідні фільтри
Вплив переривань потужності на безпеку експлуатації	Регресійний аналіз, алгоритми прогнозування погоди, планування роботи. Регулювання потужності системним оператором

Пом'якшення впливу:

Досягається застосуванням методів прогнозування та завчасного планування режимів роботи. Системний оператор може налаштувати інші джерела для уникнення дефіциту або надлишку енергії. Має значення географічний розподіл, уникнення концентрації поновлюваних джерел в одній області. Застосування пристроїв для зберігання енергії, таких як батареї безперебійного живлення.

Засоби вирішення проблем якості:

- Коливання напруги: Активні фільтри енергії, динамічні регулятори напруги, статичні синхронні компенсатори, уніфіковані кондиціонери якості електроенергії;
- Реактивна потужність: Силові компенсатори, фіксовані або регульовані конденсатори;
- Флуктуації частоти: Контури управління потужністю і контролю частоти.

3. Автономні гібридні енергосистеми

Мікромережа є відмінним рішенням для віддалених районів, де прокладка ліній електропередачі не вигідна економічно або складна через рельєф місцевості.

Топології ізольованих систем:

Можуть бути поділені на дві основні топології: загальна шина постійного струму або загальна шина змінного струму.

Переваги об'єднання джерел:

Змінний характер сонячних і вітрових ресурсів може бути частково подоланий шляхом інтеграції в оптимальне поєднання. Сила одного джерела може подолати слабкість іншого протягом певного періоду часу, система стає більш надійною.

Економічна проблема:

Серйозну економічну проблему для автономних джерел представляє вартість зберігання енергії. Об'єднання сонячної і вітрової генерації може зменшити потребу в акумулюючих потужностях і загальну вартість системи, оскільки акумуляторні батареї коштують дорожче і мають коротший термін служби порівняно з сонячними панелями і вітровими турбінами.

Загальна шина постійного струму:

Головна перевага – можливість поєднання різних джерел генерації, які не зобов'язані працювати на постійній частоті і в синхронізмі. Напруга в шині може бути фіксованою, а струм від кожного джерела регулюється незалежно. Акумуляторна батарея слугує для стабілізації напруги.

Загальна шина змінного струму:

Широко використовується у світі. Переваги: простота в експлуатації, можливості індивідуального підключення, низька вартість, можливості розширення. Проблеми: контроль напруги та частоти змінного струму, управління загальною енергією.

Контроль системи:

Застосування силової електроніки є традиційним способом управління. Головна задача – забезпечення максимальної енерговіддачі сонячних і вітряних ресурсів (точка максимальної потужності MPPT), зменшення можливих флуктуацій потужності.

Головні проблеми автономних енергосистем:

Проблема	Засоби вирішення
Висока вартість акумулювання	Комбінація вітрової та сонячної енергії зменшує потреби в акумулюванні

Втрати корисної енергії протягом року	Поєднання ВДЕ з акумуляторними батареями і дизель-генератором як резервним живленням
Безпека	Захисні пристрої, розосереджена система генераторів
Недостатнє акумулявання	Поєднання ВДЕ з паливними комірками
Екологічність та безпека використання акумуляторів	Поєднання ВДЕ з паливними комірками замість великих свинцево-кислотних батарей

Застосування водневих технологій:

Акумулятор енергії може використовувати надлишкову електроенергію для електролізу води та виробництва водню, який через паливні комірки повертає енергію в мережу. При іншій конфігурації виробництво водню може бути головним споживачем енергії ВДЕ, а водень – кінцевою продукцією.

4. Локальні енергосистеми (Microgrid)

Типи джерел живлення в ЛЕС:

1. Джерела централізованого електропостачання;
2. Джерела розосередженої генерації (РГ) безперервного електрозабезпечення;
3. Джерела РГ, вихідні параметри яких залежать від погодних умов (ВЕС, СЕС).

Визначення ЛЕС:

Сукупність генеруючого електрообладнання обмеженої потужності низької напруги, перетворювачів та споживачів електроенергії, з'єднаних між собою з урахуванням топології розподільної мережі, у яких протікають єдині електромагнітні процеси. Відповідає структурі сучасних локальних систем Microgrid.

Контрольована генерація:

В якості електричного генератора може виступати дизель- чи газова установка на традиційному чи біопаливі, або мала ГЕС. Контрольована допоміжна генерація може бути як традиційною, так і відновлюваною, і слугувати для стабілізації енергопостачання за відсутності централізованої мережі чи для її розвантаження в години пікового споживання.

Особливості розвитку ЛЕС:

Типи ЛЕС	Особливості
ЛЕС в умовах централізації генерації на основі традиційних джерел змінного струму	Нарощування потужностей призвело до потреби маневрування графіків споживання. Проблеми порушення якості електроенергії. Порушення стійкості функціонування
ЛЕС з РГ на основі джерел постійного струму та традиційних джерел змінного струму	Обмежені потужності та відстань передачі електроенергії. Обмеження за типом навантаження
ЛЕС з джерелами РГ на основі НВДЕ з пристроями силової електроніки	Побудова комплексних систем. Забезпечення якості електроенергії. Поява джерел на основі НВДЕ вимагає забезпечення стабільності ЛЕС

5. Показники надійності енергозабезпечення

Існує множина показників якості електропостачання та ефективності регулювання енергетичних процесів. Особливістю локальних енергосистем є потреба в оптимізації вибору складу генеруючих потужностей та їх характеристик, режимів сумісної роботи з урахуванням особливостей споживання, вимог до надійності, наявного потенціалу ВДЕ, вартісних показників.

Категорії параметрів:

Дві категорії параметрів для визначення розмірів компонентів гібридної системи:

- Економічні (фінансові): Мінімізація собівартості;
- Технічні: Показники надійності постачання енергії.

Надійність системи:

Здатність задовольняти вимоги щодо навантаження з достатньою гарантією безперервності і якості. Поділяється на:

- Адекватність системи: Наявність достатнього потенціалу для задоволення попиту;

- Безпека живлення: Здатність протистояти непередбаченим обставинам, не порушуючи межі нормальної роботи.

6. Індекси втрати навантаження (LOLE, LOEE, LOLF)

Для оцінки можливого впливу на надійність забезпечення споживачів використовують показники:

LOLE (Loss of Load Expectation):

Очікуваний період, протягом якого навантаження енергосистеми перевищує доступну потужність генерації, год/рік або діб/рік.

$$LOLE = \sum_{i \in S} p_i \cdot T_i,$$

де p_i – імовірність перебування системи в i -му стані, S – множина всіх станів, що асоціюються з втратою навантаження, T_i – тривалість стану.

LOLP (Loss of Load Probability):

Імовірність втрати навантаження – прогнозована кількість часу, коли очікуване навантаження буде більшим, ніж потужність наявних генеруючих потужностей.

$$LOLP = \sum_j P[C_j] \cdot P[L_j > C_j],$$

де $P[\cdot]$ – імовірність певної потужності; C_j – досяжна генерована потужність; L_j – навантаження.

Зв'язок: $LOLE = LOLP \cdot T$.

LOEE (Loss of Energy Expectation):

Очікувана кількість недоотриманої енергії впродовж року, МВт·год/рік, показує обсяг дефіциту електричної енергії.

$$LOEE = \sum_{k \in S} p_k \cdot E_k,$$

де p_k – імовірність недостатньої потужності на k -му інтервалі часу; E_k – втрачена енергія навантаження.

Нормалізований індекс: $LOEE_n = \sum_{k=1 \text{ to } n} p_k \cdot E_k / E$, де E – загальна спожита енергія.

LOLF (Loss of Load Frequency):

Число випадків виникнення дефіциту генеруючої потужності (попит перевищує генерацію), випадків/рік.

EENS (Expected Energy Not Served):

Індекс очікуваної відсутності енергії. Результат представляється як ймовірне співвідношення між нестачею живлення і енергією, необхідною системі.

WE (Wasted Energy):

Невикористана (втрачена) на певному часовому інтервалі енергія.

Обмеження індексів:

Індекси LOLP чи LOLE не відображають сумарний дефіцит потужності. Години LOLE не є часом серйозного відключення цілих ринкових зон. Проблема зазвичай вирішується тимчасовим зменшенням напруги або вибіркоvim відключенням великих промислових користувачів.

7. Показники для автономних систем (LPSP, EXC, WE)

LPSP (Loss of Power Supply Probability):

Показник імовірності втрати можливості забезпечення енергією потреб споживача. Інша назва – дефіцит потужності (DPS).

$$LPS(t) = Pload(t) \cdot \Delta t - \{ [PCEC(t) + PBEC(t)] \cdot \Delta t + Cbat(t-1) - Cbat.min \} \cdot \eta_{inv},$$

де η_{inv} – коефіцієнт енергоефективності інвертора; $Cbat$ – рівень зарядки акумуляторів.

$$LPSP = \sum_{(t=1 \text{ to } T)} LPS(t) / \sum_{(t=1 \text{ to } T)} Pload(t) \cdot \Delta t.$$

Індекс надійності енергії:

Нехай ймовірність недостатньої потужності – p_k ; втрачена енергія – E_k .

Індекс ненадійності енергії (EIR):

$$EIR = 1 - \sum_{(k=1 \text{ to } n)} (E_k \cdot P_k) / E_{load}.$$

Надлишкова енергія:

При перевищенні потреб і повністю зарядженій батареї втрачена на елементарному інтервалі енергія:

$$WE(t) = [PCEC(t) + PBEC(t)] \cdot \Delta t - Pload(t) / \eta_{inv} \cdot \Delta t - (Cbat.max - Cbat(t-1)).$$

Частка надлишкової енергії (EXC):

$$EXC(T) = \int_{(0 \text{ to } T)} WE(t) dt / E.$$

Показник якості профілю напруг (VQ):

$$VQ(T) = \int_{(0 \text{ to } T)} |V_{norm} - V(t)| / V_{norm}.$$

8. Критерії оптимізації гібридних систем

Балансова надійність ОЕС:

Ключове значення має забезпечення балансової надійності або адекватності системи генерації з урахуванням пропускових спроможностей системоутворюючої мережі.

Основні критерії адекватності:

- Математичне очікування річного обсягу обмежень споживачів $M[\Delta W]$, МВт·год/рік;
- Відносне задоволення споживачів $\pi = 1 - M[\Delta W]/LT$;
- Інтегральні ймовірності появи дефіциту потужності;
- Ймовірність втрати навантаження (LOLP);
- Середнє число днів дефіциту потужності (LOLE365);
- Середнє число годин дефіциту потужності в рік (LOLN або LOLE8760).

Міжнародні стандарти:

- США: LOLE = 0,1 діб/рік або 1 доба в 10 років;
- Франція: LOLN = 3 год/рік;
- Велика Британія: LOLN = 4 год/рік;
- Ірландія: LOLN = 8 год/рік.

9. Балансова надійність енергосистем з ВДЕ

Нові проблеми з ВДЕ:

Швидкий розвиток технологій генерації на базі ВДЕ, які не мають гарантованого джерела первинного енергоносія (вітрова та сонячна енергетика), обумовив появу нових проблем.

Проблема надлишку потужності:

Поряд з можливістю дефіциту виникає проблема надлишку потужності при одночасному високому значенні поточної потужності на ВЕС та СЕС та мінімальних рівнях виробництва на інших електростанціях.

Компенсація коливань:

Колівання енергобалансу необхідно компенсувати за рахунок зміни потужності традиційних джерел, для чого необхідна наявність відповідного діапазону регулювання додатково до необхідного для покриття змін навантаження споживачів.

Новий критерій:

Вбачається необхідним запровадження критерію появи надлишку потужності для оцінки вірогідності виникнення таких ситуацій в ОЕС.

10. Багатокритеріальна оптимізація гібридних систем

Вимоги до мережевих електростанцій:

Відповідно до правил роботи ринку електричної енергії в Україні постачальники є відповідальними за баланс своїх споживачів. Виробники зобов'язані:

- Увійти до складу балансуючої групи виробників за «зеленим» тарифом;
- Щодобово подавати добові графіки відпуску електричної енергії.

Фінансова відповідальність:

Відхилення фактичних обсягів від добових графіків розглядаються як небаланси. Оскільки небаланс передбачає фінансову відповідальність, виробники мають якомога точніше прогнозувати свою генерацію або увійти до складу балансуючої групи, здатної компенсувати випадкові зміни потужності.

Цілі оптимізації:

При роботі з контрольованим генератором до оцінки надійності додається вимога мінімізації витрат палива при максимальному використанні ВДЕ, а також зниження собівартості енергії.

Критерії роботи енергосистеми:

- Показники надійності;
- Економічні критерії;
- Екологічні критерії.

Етапи оптимізації:

Оптимізація розпочинається ще на етапі проектування при виборі обладнання та конфігурації енергосистеми.

Метою оптимізації можуть бути:

- Забезпечення надійного живлення для створення належних умов експлуатації;
- Ефективне використання всієї виробленої енергії (мінімізація втрат);

- Максимальна комерційна привабливість або мінімізація собівартості енергії.

Багатокритеріальна задача:

Як правило, має вирішуватися багатокритеріальна задача оптимізації з урахуванням:

- Надійності енергозабезпечення споживачів;
- Фінансової ефективності;
- Екологічних вимог;
- Технічних обмежень.

Контрольні питання

1. Які основні типи гібридних електростанцій на основі ВДЕ та їх режими роботи?
2. Які головні проблеми виникають при роботі мережевих гібридних енергосистем та засоби їх вирішення?
3. У чому переваги та недоліки топології зі спільною шиною постійного струму для автономних систем?
4. Що таке локальна енергосистема (Microgrid) та які три типи джерел живлення в ній виділяють?
5. Які основні індекси надійності енергозабезпечення (LOLE, LOEE, LOLF) та що вони характеризують?
6. Як розраховується індекс імовірності втрати живлення (LPSP) для автономних систем?
7. Які міжнародні стандарти існують для показника LOLE в різних країнах?
8. Які нові проблеми виникають при забезпеченні балансової надійності енергосистем з ВДЕ?
9. Які вимоги висуваються до виробників електроенергії на ВЕС та СЕС відповідно до правил роботи ринку в Україні?
10. Які основні цілі оптимізації гібридних енергосистем та чому це багатокритеріальна задача?

Тема: «Обмеження щодо рівнів впровадження вітрових та сонячних електростанцій до об'єднаної енергосистеми. Методи розрахунку досяжних рівнів впровадження»

План

1. Структура та маневрові можливості ОЕС України
2. Добовий графік навантаження та зони генерації
3. Первинне, вторинне та третинне регулювання потужності
4. Регулюючі можливості різних типів електростанцій
5. Оцінка граничної сукупної потужності ВДЕ за регулюючими потужностями
6. Розрахунки допустимої потужності ВДЕ на основі точності прогнозування
7. Імовірнісний підхід до оцінки резервів
8. Додаткові потреби в резервах при інтеграції ВДЕ
9. Етапи інтеграції мінливих ВДЕ за досвідом МЕА
10. Прогноз щодо можливостей ОЕС України

1. Структура та маневрові можливості ОЕС України

Необхідність виконання умов роботи енергосистеми, зокрема забезпечення показників надійності, формує вимоги до обсягу відновлюваних джерел енергії, які можуть бути інтегровані до ОЕС без шкоди для її функціонування. Ці вимоги ґрунтуються на наявності маневрових та резервних потужностей, які відповідали б змінному характеру генерації та споживання енергії.

Встановлена потужність електричних станцій ОЕС України (МВт, станом на 2020):

- АЕС: 13835
- ТЕС ГК: 21842
- ТЕЦ: 6069,6
- ГЕС: 4812,5
- ГАЕС: 1487,8
- СЕС: 5153,9
- ВЕС: 1109,7

- Станції на біопаливі: 187,7

Частка потужності певного типу електростанцій може не відповідати їх участі в генерації енергії. Після 2013 року в Україні спостерігались проблеми з забезпеченням паливом теплових електростанцій, спостерігалось помітне збільшення ваги атомних станцій в загальному балансі. Свою роль грає і ціновий фактор – собівартість енергії.

2. Добовий графік навантаження та зони генерації

Паралельна робота електростанцій ОЕС України здійснюється у відповідності до добового диспетчерського графіку навантаження з погодинним розподілом. На графіку виділяють три зони: базова, напівпікова і пікова.

Базова зона:

Працюють електростанції з кількістю годин використання встановленої потужності більше 6000 год/рік. Як правило це електростанції, які не можуть змінювати свою потужність чи змінюють в обмеженому діапазоні (АЕС та ТЕЦ) або мають низьку вартість виробленої електроенергії. Також частково ГЕС під час паводку та для підтримки рівня води в річках.

Напівпікова зона:

Працюють електростанції з кількістю годин використання встановленої потужності від 2000 до 6000 год/рік. В цій зоні повинні працювати високоманеврені електростанції, такі як ГЕС.

Пікова зона:

Працюють електростанції з кількістю годин використання встановленої потужності менше 2000 год/рік. Це високоманеврені електростанції – ГЕС і ГАЕС.

Оптимальна структура:

Для забезпечення стабільної роботи ОЕС України в структурі генеруючих потужностей базові повинні складати 50-55%, напівпікові – 30-35%, пікові – 15%. В ОЕС України спостерігається брак пікових потужностей (8-9% у 2016 р. проти необхідних 15%). Внаслідок цього до регулювання активно залучають енергоблоки ТЕС.

Параметри добових графіків навантаження:

Добовий графік навантаження ОЕС України характеризується значною нерівномірністю. Коефіцієнт нерівномірності коливається від 0,72 до 0,77. При проходженні нічного мінімуму навантаження доводиться зупиняти певну кількість енергоблоків ТЕС. Такі режими роботи ведуть до збільшення витрат палива та прискореного фізичного зносу обладнання.

Характерні місця графіка: мінімальне навантаження вночі (о другій годині), денний максимум (о десятій годині) та вечірній максимум (о 18-й годині взимку і о 21-й годині влітку).

3. Первинне, вторинне та третинне регулювання потужності

Для підтримки балансу потужності в ЕЕС України на електростанціях здійснюють планові та непланові зміни навантаження енергоблоків. До непланових змін відносять первинне і вторинне регулювання, до планових – третинне регулювання.

Первинне регулювання:

Здійснюється автоматичними регуляторами частоти обертання турбін, змінюючи подачу енергоносія. Призначення – утримання частоти струму в допустимих межах при порушенні балансу активної потужності.

Характеристики:

- Частота в нормальному режимі: $50 \pm 0,2$ Гц не менше 95% часу доби;
- Час початку дії: кілька секунд;
- Час введення необхідного резерву на 50%: не більше 15 с;
- Весь резерв вводиться в дію: не пізніше 30 с;
- Величина необхідного резерву для ОЕС України в ізолюваному режимі: 1000 МВт.

Вторинне регулювання:

Процес відновлення планового балансу потужності шляхом використання вторинної регулюючої потужності для компенсації небалансу, ліквідації перевантаження транзитних зв'язків, відновлення частоти і використаних при первинному регулюванні резервів.

Характеристики:

- Початок: після дії первинного, не пізніше ніж через 30 с;
- Закінчення: не пізніше ніж через 15 хв після виникнення небалансу;
- Розміщення резерву: не менш ніж на 30 енергоблоках 300 і 200 МВт ТЕС, а також на агрегатах ГЕС;
- Діапазон для ОЕС України: на завантаження – 1000 МВт, на розвантаження – 500 МВт.

Третинне регулювання:

Використовується для відновлення резервів первинного і вторинного регулювання та для надання взаємодопомоги енергосистемам при нездатності окремих енергосистем у складі ОЕС самостійно забезпечити вторинне регулювання.

Оцінювання відповідності генеруючих потужностей:

Здійснюється за двома напрямками (термінологія НЕК «Укренерго»):

1. **Оцінювання достатності (adequacy):** Оцінка забезпеченості енергосистеми такою сумарною величиною встановленої потужності, за якою відсутні обмеження максимального навантаження попиту.
2. **Оцінювання відповідності – гнучкість (flexibility):** Оцінка характеристик генеруючого обладнання (швидкості навантаження/розвантаження, час запуску/зупинки, регульовальний діапазон, час реакції), що відповідають зміні навантаження та мінливості генерації з ВДЕ.

4. Регулюючі можливості різних типів електростанцій

Мінливий характер генерованої потужності ВДЕ зумовлює необхідність мати в енергосистемі електростанції із високими можливостями регулювання своєї потужності.

АЕС:

Можуть змінювати потужність на 2% від максимальної по мірі випалювання урану. Наведені регулюючі можливості не можуть бути залучені до процесу повсякчасної компенсації коливань потужності ВДЕ. Складають базову (незмінну) частину добової генерації.

ТЕЦ:

Можуть змінювати потужність на 5-7% залежно від зміни теплового споживання на опалення вдень і вночі. До категорії базових також відносяться промислові станції та блокстанції окремих підприємств.

Блокові ТЕС:

Мають обмежений діапазон регулювання потужності. Діапазон охоплює значення від технічного мінімуму (в середньому близько 77% від встановленої потужності) до 100% потужності. Діапазон регулювання блокових ТЕС становить $\approx 30\%$ відносно технічного мінімуму.

При зменшенні потужності нижче технічного мінімуму енергоблок має бути зупинений з поступовим розхолодженням. Блокові ТЕС покривають до 44% навантажень (включно з регулюючим діапазоном 10% в напівпіковій частині). На блокових ТЕС розміщується частка обсягів первинного та вторинного резервів потужностей.

ГЕС:

Можуть змінювати потужність від нуля до 100%, однак на практиці нижня межа діапазону регулювання становить приблизно 10% через необхідність забезпечення мінімального рівня води нижнього б'єфу. Призначені для покриття частки напівпікової та всієї пікової частини графіка.

ГАЕС:

Виконують подвійну функцію:

- Сприяють вирівнюванню добового графіка навантажень за рахунок споживання потужності в нічні години під час помпування води у верхні резервуари;
- Покривають гостропікові навантаження в години максимуму.

Недолік: Працюють в циклі помпування та генерації з низьким ККД по електричній енергії (не перевищує 0,7). Режимова особливість – дуже короткий час участі у покритті піків (не більше 1,5-2,0 години) через обмежений об'єм води у верхніх резервуарах.

5. Оцінка граничної сукупної потужності ВДЕ за регулюючими потужностями

З огляду на концептуальне положення щодо використання ВДЕ в енергосистемі України (економія органічного палива), ВДЕ повинні заступати своєю потужністю теплові електростанції, зокрема блокові ТЕС.

Наслідки:

- Обсяг потужностей ВДЕ знаходиться в прямій залежності від наявного обсягу потужностей регулюючого діапазону блокових ТЕС;
- В графіку покриття електричних навантажень робоча потужність ВДЕ не може виходити за межі поточного діапазону регулювання блокових ТЕС, які введені в добовий графік.

Методика розрахунку:

Найбільша регулююча потужність ТЕС утворюється, якщо ТЕС проходять нічні години доби на рівні технічного мінімуму:

$$T_{рег} = 0,3 \cdot T_{min},$$

де $T_{рег}$ – максимальна регулююча потужність ТЕС; T_{min} – технічний мінімум потужності регулюючих ТЕС (МВт).

Максимальна робоча потужність ВДЕ не повинна виходити за межі регулювання. При перевищенні належить оперативно обмежувати потужність ВЕС/СЕС.

Оцінка граничної установленної потужності:

$$V_{max} = K_d \cdot K_{вп} \cdot K_{рт} \cdot K_t \cdot V_u,$$

де K_d – коефіцієнт географічної дисперсії (0,8); $K_{вп}$ – коефіцієнт власних потреб (0,98); $K_{рт}$ – коефіцієнт ремонтних технологій (0,95); K_t – коефіцієнт територіального впливу (0,98); V_u – установлена потужність ВДЕ.

Звідси: $V_{max} = 0,73 \cdot V_u$.

Виходячи з того, що $V_{max} = 0,3 \cdot T_{min}$, отримаємо: $V_u = 0,4 \cdot T_{min}$.

За розрахунками різних періодів значення параметра T_{min} в робочі дні змінюється за сезонами від 8400 МВт до 13200 МВт (за даними до 2013 р.). Відповідно допустима робоча потужність ВДЕ змінюється від 2400 МВт до 4000 МВт. Найбільше значення граничної робочої потужності припадає на зимовий сезон і становить 4000 МВт.

6. Розрахунки допустимої потужності ВДЕ на основі точності прогнозування

В результаті подій 2014-2015 рр. ОЕС України втратила частину регулюючих потужностей, змінилось і споживання. Зимовий максимум 2016 р. склав 23900 МВт (замість очікуваних 32500 МВт).

Критерій оптимальності:

За критерій оптимальності поточного режиму приймається така робоча потужність всіх станцій вітро-сонячної генерації, при якій ймовірні відхилення (похибки) на $\pm 20\%$ від їх заявленої (прогнозої) потужності компенсуються тепловими станціями в межах технічно допустимого регулювального діапазону без пуску і зупинки теплових блоків або залучення потужності ГЕС.

Нічна зона:

Щоб уникнути зупинки блоків ГЕС при відхиленні заявленої робочої потужності ВДЕ V_1 в бік $+20\%$, сумарна потужність блоків повинна бути на рівні технічного мінімуму:

$$P_{\text{тех}} = 1 - 1,2V_1 \text{ (в.о.)}$$

Для блоків 200–300 МВт діапазон регулювання становить в середньому 22% технічного мінімуму. При відхиленні генерації ВДЕ на -20% запас регулювання вичерпується при $V_1 = 0,36$ (в.о.).

Зони максимумів:

В максимальних зонах істотну частину навантаження покриває генерація ГЕС і ГАЕС. Це дозволяє компенсувати можливе збільшення потужності ВДЕ в сторону $+20\%$ за рахунок відповідного зменшення потужності ГЕС.

Граничні потужності (за даними 2015-2016):

Сезон	Tmin (МВт)	Vmin (МВт)	Vтах (МВт)	Vу (МВт)
Зима	5200	1700	4600	5900
Весна	4700	2400	2800	3800
Літо	3700	1200	3000	3900

Осін	3900	1300	3800	5000
Ь				

З урахуванням відокремленої частини ОЕС граничне значення потужності ВДЕ оцінюється в 4600 МВт.

7. Імовірнісний підхід до оцінки резервів

Надійність енергетичного забезпечення розглядається як здатність електроенергетичної системи генерувати таку кількість електроенергії, яку потребують споживачі в даний момент часу.

Статистичний підхід:

Базується на розрахунках імовірності певних рівнів потужності і похибок прогнозування, а також визначенні функцій щільності розподілу імовірності. Прогноз навантаження не чутливий до горизонту прогнозування, а визначається поточним навантаженням; натомість похибка прогнозу вітру зростає зі збільшенням горизонту.

Метод "трьох сигм":

Якщо моделювати похибки прогнозу стандартними випадковими величинами, то дисперсії похибок потужності ВЕС та споживання складаються. 3-кратне середньоквадратичне відхилення (СКВ) може бути прийнято в якості 99%-довірчого рівня для оцінки випадкової складової, що повинна бути покрита резервами.

Підходи до визначення гарантованої потужності ВЕС:

1. Статистичний: Набирається значний обсяг фактичних даних про роботу ВЕС та ЕЕС у вигляді часових рядів (зазвичай не менше кількох років);
2. Аналітичний: На підставі фактичних даних будуються функції розподілу випадкових величин та розраховуються відповідні імовірності;
3. Імітаційного моделювання: Будується математична модель і застосовуються методи типу Монте-Карло з подальшою статистичною обробкою.

8. Додаткові потреби в резервах при інтеграції ВДЕ

На підставі європейського досвіду розглядаються два основні фактори: поточну нестабільність потужності ВЕС та похибку прогнозу змін потужності.

Збільшення потреб у резерві:

Оцінюють за середньоквадратичним відхиленням до і після інтеграції ВДЕ:

$$\sigma_1 = \sqrt{[(\sigma_{\text{ОЕС}} + \text{ВД})^2 - (\sigma_{\text{ОЕС}})^2]}.$$

За оцінками фахівців ООН для Казахстану (схожі параметри з Україною), при максимальній потужності енергосистеми 23 тис. МВт та інтегруванні 2 тис. МВт вітрової енергії потреба в додаткових резервах внаслідок нестабільності становить близько 80 МВт (4% ВЕС).

Похибка прогнозування:

Точність прогнозу споживання становить близько 1,5% потужності, а точність прогнозу потужності ВЕС – 6-14%, в Україні – близько 10% їх номінальної потужності.

Похибки прогнозу споживання та вітру є незалежними випадковими величинами:

$$\sigma_2 = \sqrt{[(1,5\% \cdot \text{РОЕС})^2 + (10\% \cdot \text{РВД})^2]}.$$

Для Казахстану ця величина також оцінена в 80 МВт. Загальна потреба в додаткових резервах становить приблизно 160 МВт, або 8% номінальної потужності ВЕС.

Міжнародний досвід:

- Ірландія: 10% загальної потужності ВЕС;
- Країни Північного енергетичного пулу: 2-4%;
- При врахуванні тільки погодинної мінливості вітру: близько 3% від встановленої потужності ВЕС при рівні впровадження до 20%;
- При врахуванні 4-годинного прогнозу: збільшення потреб досягає 9-10%;
- При врахуванні 4-годинної мінливості вітру: 15% при 10% впровадження, 18% – при 20%.

9. Етапи інтеграції мінливих ВДЕ за досвідом МЕА

За дослідженнями Міжнародного енергетичного агентства (2014-2016 рр.), інтеграція малих обсягів мінливих ВДЕ (5-10%) в мережу не є проблемою.

Правила інтеграції:

- Не допускати локальних концентрацій мінливих ВДЕ («гарячих точок»);

- Забезпечити, щоб електростанції на ВДЕ допомагали стабілізувати мережу;
- Прогнозувати виробництво електроенергії на основі ВДЕ і використовувати прогнози для планування роботи інших електростанцій.

Великі частки мінливої відновлюваної енергії (до 45% річного обсягу генерації) можуть бути інтегровані без істотного збільшення витрат в енергосистемі в довгостроковій перспективі.

Три ключові етапи трансформації:

1. «Безболісна» для системи інтеграція мінливих ВДЕ;
2. Підвищення гнучкості системи за допомогою використання відповідних «гнучких технологій»;
3. Удосконалення технологій роботи системи.

Шість важливих напрямків інтеграції:

1. Надання сонячними і вітровими електростанціями системних послуг;
2. Розгортання об'єктів ВДЕ в районах з більшою системною цінністю;
3. Диверсифікація джерел енергії, взаємне доповнення сонячної і вітрової генерації;
4. Локальна інтеграція з іншими ресурсами;
5. Оптимізація періоду генерації;
6. Комплексне планування, моніторинг та контроль.

Чотири стадії поширення мінливих ВДЕ (МЕА, 2017):

Стадія 1 (до 3%): Інтеграція не робить помітного впливу на мережу. Нестабільна генерація в межах щоденних «природних» змін попиту. Україна – 3,6% у 2019.

Стадія 2 (3-15%): ВДЕ впливають на систему, але цей вплив регулюється просто шляхом удосконалення методів управління (прогнозування).

Стадія 3 (15-25%): Виникають суттєві виклики для енергосистеми. На перше місце виходить гнучкість – здатність реагувати на невизначеність і мінливість. Головні ресурси: керовані (маневрені) електростанції, управління попитом, технології накопичення енергії.

Стадія 4 (25-50%): Виклики носять «високотехнологічний» характер. Потрібна ще більша гнучкість системи, здатність до самовідновлення після різких коливань генерації.

10. Прогноз щодо можливостей ОЕС України

За розрахунками НЕК «Укренерго», у ситуації дефіциту генеруючих потужностей та відсутності реалізації заходів з підвищення маневрової здатності ОЕС України забезпечити вимоги відповідності можливо лише за рахунок імпорту резервів, що обумовлює додаткові вимоги по збільшенню пропускнуої спроможності на перетинах між ОЕС України та енергосистемами суміжних країн.

Критерії достатності:

Оскільки в Україні законодавчо поки не визначені цільові значення критеріїв достатності, встановлено за прийнятне:

- LOLP: не перевищує 0,03% (вимоги Польщі, Франції, Бельгії);
- LOLE: не перевищує 0,125 доби на рік.

Кореляційний зв'язок:

Існує тісний кореляційний зв'язок між достатністю генеруючих потужностей ОЕС України та межуючими енергетичними системами. У випадку дефіциту потужності в ОЕС України аналогічна ситуація з високою ймовірністю настає і в енергетичних системах суміжних країн.

Особливості суміжних країн:

- Майже всі (крім Польщі) є чистими імпортерами;
- Енергетичні системи (крім Польщі) несумірні з ОЕС України;
- У випадку дефіциту накладаються обмеження на використання імпортованих потужностей та транзитних ЛЕП.

Контрольні питання

1. Які три зони виділяють на добовому графіку навантаження ОЕС України та яка оптимальна структура їх розподілу?
2. У чому полягає різниця між первинним, вторинним та третинним регулюванням потужності?

3. Які регулюючі можливості мають блокові ТЕС та чому саме вони є основними для взаємодії з ВДЕ?
4. Як розраховується гранична робоча потужність ВДЕ на основі технічного мінімуму блокових ТЕС?
5. Які коефіцієнти використовуються при переході від граничної робочої до установленної потужності ВДЕ?
6. Як точність прогнозування впливає на допустиму потужність ВДЕ в енергосистемі?
7. Які додаткові потреби в резервах виникають при інтеграції ВДЕ та як їх оцінюють?
8. Які чотири стадії поширення мінливих ВДЕ виділяє Міжнародне енергетичне агентство?
9. Які шість важливих напрямків «безболісної» інтеграції вітряної і сонячної енергетики в систему?
10. Які критерії достатності (LOLP, LOLE) прийняті для оцінювання ОЕС України за міжнародним досвідом?

Лекція 13

Тема: «Математичне моделювання комбінованої енергосистеми на базі вітрових електростанцій»

План

1. Імовірнісна модель роботи ВЕС у складі енергосистеми
2. Моделювання поточної потужності випадковим процесом
3. Модель електричного навантаження
4. Виробництво вітряної електроенергії
5. Контрольоване виробництво електроенергії
6. Визначення параметрів математичної моделі
7. Особливості врахування групи ВЕС
8. Імовірнісне моделювання потужності ЕЕС України

9. Циклічний характер випадкових значень потужності

10. Результати моделювання системи «ОЕС-ВЕС»

1. Імовірнісна модель роботи ВЕС у складі енергосистеми

Для коректного бачення сумісної роботи вітрових та традиційних електростанцій у складі електроенергетичної системи (ЕЕС) необхідно описати їх роботу в однакових параметрах, що відображали б поточну потужність, темп її зміни, гарантовані з різною імовірністю максимальні та мінімальні значення потужності. Це дозволить оцінити вплив ВЕС на загальний стан енергосистеми, зокрема для визначення потреб у додаткових резервних потужностях, їх обсягах та швидкодії.

Дослідження інституту «Укренергомережпроект» (2007 р.):

Було зазначено, що некоректно розглядати участь ВЕС в роботі ОЕС за аналогією з режимами роботи традиційних електростанцій через імовірнісний характер роботи ВЕС, який залежить від швидкості вітру в кожний конкретний момент часу.

Концепція еквівалентної ВЕС:

Розглядалася дія умовної ВЕС, яка за своєю номінальною потужністю дорівнює сумі встановлених потужностей усіх ВЕС України, а за режимом генерації у певну годину відповідає сукупній генерації окремих ВЕС на цю ж годину. Добові режими робочої потужності отримані на підставі середньомісячних погодинних значень швидкостей вітру.

Результати розрахунків:

Проведені розрахунки перспективних режимів ЕЕС за участі ВЕС потужністю 3–6 ГВт показали сумісність роботи ВЕС з іншими типами електростанцій за умови введення в дію запланованих маневрових потужностей (гідроакumuлюючих станцій). Вітрові режими протягом доби мають певний регулюючий ефект – потужність ВЕС зростає під час максимального електричного навантаження, та зменшується у години його мінімуму.

Обмеження моделі:

Модель еквівалентної ВЕС прийнятна лише як перший крок, адже вона оперує з осередненими («трендовими») показниками і не враховує випадкову поточну складову потужностей як вітростанцій, так і самої енергосистеми.

2. Моделювання поточної потужності випадковим процесом

Моделювання роботи енергосистеми можливе у різних часових вимірах – помісячно, щодобово, погодинно. Оскільки можуть виникнути аварійні ситуації, коли прийняття рішень на погодинній основі недостатньо, важливо виконувати передбачення роботи енергосистеми в режимі неперервного часу.

Стохастичні диференціальні рівняння:

Таке моделювання здійснено, зокрема, стосовно Північного енергетичного пулу (об'єднаної енергосистеми Норвегії, Швеції, Фінляндії). З огляду економічної доцільності, часовий масштаб моделі узгоджено з умовами енергетичного ринку.

Погодинне планування:

Для Північного пулу характерне погодинне планування з відповідним укладанням контрактів. Швидкість реагування енергосистеми оцінюється як півгодинна – введення (виведення) додаткових потужностей починається за 15 хвилин до зазначеного часу і закінчується через 15 хвилин. Така модель потребує наявності прогнозу на дві години вперед.

Циклічність споживання:

Повинна також враховуватись певна циклічність споживання енергії (добова, тижнева, сезонна, річна).

Вимога балансування:

Вимога щодо поточного балансування виробництва та споживання електроенергії формулюється як різниця:

$$D(t) = P(t) - L(t),$$

де $P(t)$ – виробництво енергії; $L(t)$ – електричне навантаження.

Складові виробництва:

- Контрольована складова: традиційні генеруючі станції (телові, гідро- чи атомні);
- Неконтрольована складова: вітрові станції (а загалом і сонячні).

3. Модель електричного навантаження

Базове навантаження $L(t)$ моделюється як сума функцій, що представляють середні значення навантажень і певний стохастичний процес:

$$L(t) = \mu(t) + X(t), t \geq 0.$$

Середнє значення $\mu(t)$:

Приймає позитивні раціональні значення і визначає неперервну зміну базового навантаження, імітуючи його типові характеристики.

Стохастичний процес $X(t)$:

Вибирається у відповідності з припущеннями:

- $L(t)$ має нормальний розподіл згідно з центральною граничною теоремою, оскільки відповідає сумі значної кількості різних навантажень (споживачів);
- Величина $L(t)$ не може зростати протягом тривалого часу, і має швидко повертатись до певного середнього значення.

Рівняння Орнштейна-Уленбека:

Випадкова складова $X(t)$ задовольняє стохастичному диференційному рівнянню:

$$dX(t) = -\alpha X(t)dt + \sigma dB(t),$$

де $B(t)$ є вінерівським процесом (броунівським рухом).

Параметри процесу:

- **α (параметр зсуву):** Визначає швидкість повернення до середнього значення;
- **σ (волатильність):** Характеризує розмах відхилень, які мають нормальний розподіл.

При малих значеннях α процес близький до вінерівського блукання, при великих значеннях α та σ траєкторія часто перетинає рівноважний рівень та нагадує білий шум.

Розв'язок рівняння:

Може бути знайдено за формулою Іто:

$$X(t) = e^{-\alpha t} [X(0) + \int_0^t e^{\alpha s} \sigma dB(s)].$$

Багатовимірний процес:

У випадку окремих частин енергосистеми з різними властивостями, пов'язаних спільною електромережею, можна визначити багатовимірний процес, розглядаючи рівняння Орнштейна-Уленбека як векторне.

Функція середніх значень $\mu(t)$:

Може бути визначена різними способами. Для апроксимації можна використати наближення тригонометричними функціями, в залежності від вигляду графіка навантажень.

4. Виробництво вітрової електроенергії

Генерована енергія визначається контрольованою (традиційною) складовою $Q(t)$ та неконтрольованою (вітровою) потужністю $W(t)$:

$$P(t) = Q(t) + W(t).$$

Складність моделювання:

Обумовлюється як випадковим характером енергоносія (вітру), так і нелінійним характером перетворення вітрової енергії в електричну, що вносить додаткову невизначеність через особливості роботи вітроелектричних установок в різних кліматичних умовах.

Розподіл швидкості вітру:

Розподіл швидкості вітру найчастіше описують функцією Вейбула. За наявності певної специфіки пропонуються також інші види: розподіл Релея, експоненційний розподіл за методом максимуму ентропії, комбінування кількох розподілів.

Потужність ВЕС:

Обмежена номінальною (установленою) потужністю W_m незалежно від сили вітру, має певний коливальний характер. Однак добова циклічність не виражена так явно, як у випадку споживання електроенергії.

Модель стохастичного процесу:

Вирібок вітрової електроенергії представляється у вигляді суми детермінованої та випадкової складових:

$$W(t) = \omega(t) + U(t),$$

де $\omega(t)$ – алгебраїчна функція середнього значення потужності ВЕС; $U(t)$ – стохастичний процес Орнштейна-Уленбека.

5. Контрольоване виробництво електроенергії

Чисте (без урахування вітростанцій) базове виробництво енергії моделюється у вигляді суми алгебраїчної функції та стохастичного процесу:

$$Q(t) = \pi(t) + Y(t), t \geq 0,$$

де $\pi(t)$ – планова продуктивність генеруючих потужностей; $Y(t)$ – стохастичний процес, що відображає непередбачувані відключення виробників енергії.

Особливості $\pi(t)$:

- Не є середнім значенням $Q(t)$, оскільки відхилення можуть бути лише від'ємними;
- Залежить від рішень операторів системи;
- Якщо оператори працюють на підставі прогнозів, то погодинний інтеграл від $\pi(t)$ має дорівнювати різниці між прогнозованим споживанням та виробітком на ВЕС.

Стохастична складова $Y(t)$:

Відображає випадкове ступінчате зменшення генеруючої потужності і моделюється стрибкоподібним стохастичним процесом. Цей процес має передбачати повернення до $\pi(t)$, адже при вимкненні певної електростанції її потужність компенсується іншими станціями.

Характеристики процесу:

Стохастичний процес є узагальненням процесу Пуассона і характеризується інтенсивністю λ та функцією розподілу fV величини стрибків.

Оцінка параметрів:

Зазвичай використовуються два підходи:

1. Збір досконалої інформації про об'єкти енергосистеми – номінальні потужності, режими роботи, напрацювання на відмову;
2. Використання історичних даних та статистичних методів.

Результати імітаційного моделювання:

Використовуючи стохастичну модель для симуляції методом Монте-Карло, було отримано масив реалізацій процесу. Наявність вітростанцій номінальною потужністю до 10% від загального рівня (середня за час дослідження потужність

ВЕС становила близько 2%) істотно не впливає на стабільність роботи енергосистеми.

6. Визначення параметрів математичної моделі

Розв'язок стохастичного диференційного рівняння Орнштейна-Уленбека записується за формулою Іто. Модифікуємо його для зручності подальшого моделювання, виразивши вінерівський процес через стандартний нормальний розподіл $\varepsilon \sim N(0,1)$:

$$B(t) = \sqrt{t} \cdot \varepsilon.$$

Розв'язок у вигляді:

$$X(t) = X(0)e^{(-\alpha t)} + \sigma \varepsilon \sqrt{[(1 - e^{(-2\alpha t)}) / (2\alpha)]}.$$

Таким чином, процес $X(t)$ описано як нормально розподілену випадкову величину з середнім значенням та дисперсією, залежними від часу.

Функція середніх значень:

Апроксимується тригонометричними функціями:

$$\mu(t) = A_0 + \sum_{j=1}^n [A_j \cos(2\pi t / T_j) + B_j \sin(2\pi t / T_j)].$$

Приклад для України:

Для споживання електроенергії в Україні за лютий 2012 року отримано: $A_0=26,86$; $A_1=-2,07$; $B_1=-1,62$; $A_2=-1,45$; $B_2=-0,17$ (ГВт). Середньоквадратична похибка апроксимації – 0,29.

Оцінка волатильності:

Наближену оцінку волатильності процесу $L(t)$ можна отримати з формул:

$$\sigma^2 = (1/K) \cdot \sum_{j=1}^K [(L_{j+1} - L_j)^2] / [(1 - e^{(-\alpha)})^2 / (2\alpha)(1 - e^{(-2\alpha)})].$$

Модель ітераційного процесу:

$$X(t_j) = X(t_{j-1})e^{(-\alpha)} + \sigma \sqrt{[(1 - e^{(-2\alpha)}) / (2\alpha)]} \cdot \varepsilon, \varepsilon \sim N(0,1).$$

7. Особливості врахування групи ВЕС

Для опису сукупної роботи декількох випадкових частково залежних процесів використовується диференційне векторне рівняння як векторний аналог рівняння Орнштейна-Уленбека.

Модель для кількох ВЕС:

$$U^{(i)}(t_k) = U^{(i)}(t_{k-1})e^{(-\beta_i \Delta t)} + \sqrt{[(1 - e^{(-2\beta_i \Delta t)}) / (2\beta_i)]} \cdot \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} \varepsilon_j,$$

де i – номер ВЕС, n – їх кількість, ε_i – стандартні нормально розподілені випадкові величини.

Географічна дисперсія:

Рівень коливань поточної потужності ВЕС залежить від кількості вітроустановок та розміру регіону, на якому вони розосереджені. При синхронному складанні потужностей ВЕС, розташованих в різних регіонах, проявляється ефект географічної дисперсії – при віддаленні площадок їх кореляція зменшується, а графік сукупної потужності згладжується.

Кореляційний аналіз:

Розрахунок коефіцієнтів кореляції між поточними потужностями ВЕС вказує на зникнення статистично значимої залежності на відстанях понад 500 км.

Класифікація тісноти кореляції:

- 0,1...0,3 – слабкий зв'язок;
- 0,3...0,5 – помірний зв'язок;
- 0,5...0,7 – помітний зв'язок;
- 0,7...0,9 – тісний зв'язок;
- понад 0,9 – дуже тісний зв'язок.

Приклад розрахунку:

Якщо це одинична ВЕС в районі Сімферополя, то СКВ її потужності складає 37% від номінального значення. Для суми трьох віддалених ВЕС (Донецьк, Сімферополь, Одеса) СКВ дорівнює 20% номінальної потужності. Для всіх шести ВЕС СКВ складає 24%.

Імовірнісні оцінки:

Для окремо взятої ВЕС у районі Сімферополя ймовірність того, що потужність перебуватиме в межах від 10 до 90% номінальної, становить 0,71; для трьох ВЕС – 0,90; для шести площадок – 0,82. Розосередженість ВЕС по регіонах зменшує ймовірність екстремальних значень принаймні в півтора рази, а при максимальному рознесенні – майже втричі.

8. Імовірнісне моделювання потужності ЕЕС України

У вітчизняних умовах важливішими є умови забезпечення стабільності енергосистеми, а нормативна швидкодія вторинного резерву має бути не більшою

15 хвилин. Пропонована математична модель дозволяє дослідити варіативність енергосистеми в режимі реального часу, а інтервал осереднення даних обирається на рівні 10-15 хвилин.

Модельовані величини:

Розглядаються як випадкові процеси, що складаються з суми детермінованої функції як осередненої (трендової) кривої та певного стохастичного процесу, який відображає нерегулярні відхилення від трендового значення.

9. Циклічний характер випадкових значень потужності

Якщо проаналізувати фактичні дані про потужність енергосистеми (офіційну статистику НЕК «Укренерго»), то послідовний ряд значень виглядає як випадковий процес, в якому явно простежується добова, тижнева та річна циклічності.

Модель з урахуванням сезонності:

Для адекватного математичного моделювання потужності ЕЕС пропонується:

$$L(t) = \mu(t) + \varphi\sigma + X(t)**,$$

де $\mu^*(t)$ – середньомісячна складова; φ – випадкова величина з сезонною дисперсією σ^* (середньодобова складова); $X(t)$ – власне випадковий процес впродовж доби.

Середньомісячні потужності ЕЕС та їх стандартні відхилення (приклад 2012-2013, МВт):

Місяць	Потужність	СКВ добове	СКВ міждобове	СКВ місячне
Січень	23539- 23892	2181-2186	1069-1921	2429-2910
Липень	18831- 19683	1713-1736	542-720	1819-1858
Середн є	20727- 21266	1843-1942	870-1125	2138-2179

10. Результати моделювання системи «ОЕС-ВЕС»

При математичному моделюванні системи розглянуто наступні варіанти:

1. Лише традиційна ОЕС (без вітростанцій);
2. ОЕС плюс локалізована ВЕС потужністю 1000 МВт (1 ГВт);
3. ОЕС плюс розосереджена по півдню України (до 6 площадок) ВЕС потужністю 1000 МВт;
4. ОЕС плюс розосереджена ВЕС потужністю 2000 МВт.

Результати для ВЕС:

Влітку потужність групи ВЕС з імовірністю 95% знаходиться в межах від 1% до 60% номінальної потужності, взимку – від 2% до 80%.

Додатковий резерв:

Результати розрахунку додаткового резерву з імовірністю 99%:

- Для одної ВЕС потужністю 1 ГВт: 110 МВт;
- Для групи ВЕС 2 ГВт: 100 МВт.

Варіативність розосередженої групи ВЕС приблизно така ж, як удвічі менш потужної, але сконцентрованої на одній площадці.

Сезонні особливості:

Влітку варіації потужності дещо більші, ніж взимку, але при цьому середня потужність ЕЕС менша на 5 ГВт, отже забезпечено більше вільних потужностей для регулювання.

Загальний висновок:

Потреба у додаткових резервах, спричинена нестабільністю роботи ВЕС, становить до 10% номінальної потужності вітростанцій; до цього значення слід додати складову впливу похибок прогнозування.

Моделювання вітру з подальшим перерахунком у потужність ВЕС дає дещо завищені потреби в резервах для одиночної площадки, проте для сумарної ВЕС, розосередженої по значній території, результати близькі до фактичних.

Контрольні питання

1. Які основні параметри потрібні для опису сумісної роботи вітрових та традиційних електростанцій у складі ЕЕС?
2. Чому модель еквівалентної ВЕС є обмеженою та які її недоліки?

3. Як формулюється модель електричного навантаження та які її основні складові?
4. Що таке рівняння Орнштейна-Уленбека та які параметри його характеризують?
5. Які функції розподілу використовуються для опису швидкості вітру?
6. Як моделюється контрольоване виробництво електроенергії та що відображає стохастична складова $Y(t)$?
7. Як визначається розв'язок стохастичного диференційного рівняння за формулою Іто?
8. Що таке ефект географічної дисперсії та як він проявляється при об'єднанні групи ВЕС?
9. Як впливає відстань між ВЕС на рівень їх кореляції та стабільність сумарної потужності?
10. Які результати отримано при моделюванні додаткових резервів для локалізованої та розосередженої ВЕС?

Лекція 14

Тема: «Особливості моделювання комбінованої енергосистеми, до якої входять сонячні електростанції»

План

1. Характер сонячної радіації та потреба в моделюванні
2. Оцінка потенціалу сонячної енергії
3. Джерела даних про сонячну радіацію
4. Характер випадкових коливань сонячної радіації
5. Класифікація днів за рівнем хмарності
6. Математична модель коливань сонячної енергії
7. Параметри моделі для різних сезонів
8. Вплив трекерних систем на продуктивність
9. Сумісна робота вітрових та сонячних установок
10. Результати моделювання комбінованої системи

1. Характер сонячної радіації та потреба в моделюванні

Робота сонячних та вітрових електростанцій, на відміну від інших напрямів відновлюваної енергетики, має безпосередню залежність від погоди. Як швидкість вітру, так і стан хмарності (від якого залежить рівень сонячної радіації) в кожен момент часу можна розглядати як випадкові величини, які можуть бути передбачені лише з деякою імовірністю.

Вимоги до передбачуваності:

Разом з тим режим роботи цих електростанцій має бути достатньо передбачуваним. Доцільною є розробка математичних моделей поточної потужності СЕС, з допомогою яких можна оцінити можливість певних робочих режимів з заданим довірчим рівнем.

Сумісність моделей:

Багато, щоб моделі ВЕС та СЕС були сумісними та враховували такі важливі параметри їх роботи, як:

- Імовірність критичних рівнів потужності;
- Розмах можливих перепадів потужності в одиницю часу;
- Тривалість різних режимів роботи.

Особливості локальних систем:

Особливої уваги потребують локальні (особливо автономні) енергетичні системи, в яких обмежена чи відсутня можливість компенсувати нестачу електроенергії чи її надлишок. Мінімальна конфігурація автономної системи передбачає наявність вітроелектричної установки чи фотоелектричного модуля для виробництва електроенергії, та споживача електричної енергії.

Ефективність системи:

Ефективність може бути незначною внаслідок тривалих простоїв чи неповного завантаження як споживача, так і генеруючого обладнання при неналежній кількості вітрової чи сонячної енергії.

Підхід до моделювання:

Для моделювання роботи ВЕС було застосовано представлення її миттєвої потужності у вигляді:

- Осередненого значення для заданого сезону (трендової кривої);

- Середньодобового значення як випадкової величини;
- Поточних короткотермінових змін як випадкового процесу типу Орнштейна-Уленбека.

Застосуємо аналогічний підхід до моделювання сонячної радіації.

2. Оцінка потенціалу сонячної енергії

Сонячні батареї, як і ВЕУ, можуть працювати в мережевому та автономному режимах.

Переваги:

Можливість більш стабільного живлення в часи відсутності вітру.

Недоліки:

- Можливість використання тільки в денний час;
- Лише в ясну погоду;
- Порівняно висока вартість фотопанелей.

Залежність від радіації:

Поточна потужність СЕС цілком залежить від рівня сонячної радіації, отже має максимально досяжні значення, залежні від природних умов (головним чином географічної широти місцевості та пори року), і змінюється впродовж дня випадковим чином.

Проблема вимірювань:

Фіксація рівня сонячного випромінювання (радіації, або інсоляції) виконується способом, відмінним від решти показників – вітчизняні гідрометеостанції реєстрували якісний стан хмарності. Для розрахунку очікуваної потужності потрібні цифрові показники в одиницях енергії.

3. Джерела даних про сонячну радіацію

Дані NASA для Київської області (1983-2005 рр.):

Місяць	Інсоляція (кВт·год/м ² /день)
Січень	1,07
Лютий	1,87

Березень	2,95
Квітень	3,96
Травень	5,25
Червень	5,22
Липень	5,25
Серпень	4,67
Вересень	3,12
Жовтень	1,94
Листопад	1,02
Грудень	0,86

Супутникові дані:

Використано дані про рівень сонячної радіації в районі Києва за 1996-2000 роки, фіксовані з дискретністю 30 хвилин.

Місячний обсяг сонячної радіації (МДж/м²):

Джерело	Березень	Червень	Вересень	Грудень
	Б	Б	Б	Б
Satellite 1996	343	671	263	80
Satellite 1997	355	608	354	88
Satellite 1998	301	619	397	98
Satellite 1999	331	760	389	73
Satellite 2000	258	640	303	78
ДСТУ (ясно)	504	830	515	127
ДСТУ (середня хмарність)	270	590	340	60

Осереднений рівень сонячної радіації за результатами багаторічних спостережень в районі Києва дещо вищий, ніж при середній хмарності, але помітно нижчий від умов ясної погоди.

4. Характер випадкових коливань сонячної радіації

Характер випадкових коливань сонячної радіації, спричинених змінною хмарністю, досліджувався рядом авторів, однак усталеного висновку щодо розподілу імовірності нема.

Дослідження в Західній Африці (2013):

Розподіл імовірності рівня сонячної радіації відрізняється від нормального. Досліджуючи погодинні дані за 14 років, автори перевіряли на придатність такі розподіли: експоненційний, Вейбула, логнормальний, геометричний, гама- та бета-розподіли. Помітної переваги ніякий не отримав.

Індекс прозорості:

Нормалізація максимально досяжною інсоляцією відображала б стан хмарності аналогічно індексу хмарності:

$$n = (\rho - \rho_{\min}) / (\rho_{\max} - \rho_{\min}),$$

де ρ_{\min} , ρ_{\max} – мінімальна та максимальна затінююча здатність хмар.

Коефіцієнт проходження:

Для оцінки прозорості атмосфери: $kt = 1 - n$ як коефіцієнт проходження світла через атмосферу.

Тоді пряма сонячна радіація на поверхні землі: $G = kt \cdot G_{\text{clear}}$, де G_{clear} – радіація при чистому небі.

5. Класифікація днів за рівнем хмарності

За характером хмарності визначено 4 основних типи поведінки сонячної радіації протягом дня:

Клас 1 – ясний день:

Індекс прозорості kt близький до 1 протягом більшої частини дня.

Клас 2 – частково ясний день:

Індекс прозорості коливається в межах 0,6-0,9.

Клас 3 – хмарний день:

Індекс прозорості нижче 0,4 протягом більшої частини дня.

Клас 4 – частково хмарний день:

Значні коливання індексу прозорості впродовж дня.

Марківська властивість:

Послідовність днів певного класу протягом року схожа на дискретний ланцюг Маркова, тобто рівень хмарності не залежить від погоди попередніх днів.

Аналіз для району Києва:

Розглянемо взяті навмання значення освітленості протягом двох днів (16-те та 19-те березня), зафіксовані з півгодинним інтервалом. На графіках представлено два типи кривих – що змінюється навколо осереднених даних або суттєво відхиляється від них.

Кореляційний аналіз:

Автокореляційна функція для розглянутих прикладів швидко затухає, і для лагів понад 3 знаходиться в межах білого шуму. Вид функції вказує на стаціонарність часового ряду.

Часткова автокореляція:

Часткова автокореляційна функція вказує на значимий зв'язок лише на першому лазі для обох розглядуваних днів, тобто поведінка ряду відповідає ознаці Маркова.

Флуктуації:

Якщо розглядати відхилення від попереднього значення (характер поточних коливань), то часткова автокореляційна функція вказує на відсутність значимого зв'язку, тобто дані відхилення є цілком незалежними.

Структура варіативності:

У випадковому характері сонячної освітленості можна виділити:

- Середньодобову випадкову складову;
- Поточні флуктуації, які носять стохастичний характер.

Розподіл добової радіації:

Розподіл добового рівня радіації має ознаки нормальності (характерні розподіли для літніх та зимових місяців близькі до нормального).

6. Математична модель коливань сонячної енергії

Випадковий характер поведінки рівня сонячної радіації має ознаки марковості (залежності кожного значення лише від попереднього) та певний розподіл стохастичної складової.

Формула моделі:

$$y_i(t_j) = u_i(t_j)[1 + C_v \cdot \varepsilon] + b[x(j) - 0,5],$$

де y_i – рівень сонячної радіації ($\text{Вт}/\text{м}^2$) i -го дня; j – номер часового інтервалу впродовж дня; $u_i(t)$ – осереднена для даної пори крива; ε – стандартна нормально розподілена випадкова величина, постійна для даної доби; C_v – коефіцієнт варіації середньодобового рівня; b – розмірний параметр ($\text{Вт}/\text{м}^2$), що забезпечує визначений розмах поточних флуктуацій; x – рівномірно розподілена на інтервалі $(0, 1)$ випадкова величина.

Обмеження:

Поточне значення y_i не може бути від'ємним і перевищувати максимального для даної пори доби.

7. Параметри моделі для різних сезонів

Розмірний параметр b :

$$b = k \cdot 0,5[u_i(t_j) + y_i(t_{j-1})],$$

де k – емпіричні значення, характерні для сезону та місцевості.

Числові коефіцієнти k :

- $k = 0,35$ для літнього сонцестояння (червень);
- $k = 1,0$ для зимового сонцестояння (грудень);
- $k = 0,5$ для рівнодення (березень, вересень).

Коефіцієнт k визначає варіацію набору даних стосовно певного часу доби.

Коефіцієнти варіації C_v :

- $C_v = 0,3$ для червня;
- $C_v = 0,4$ для березня;
- $C_v = 0,5$ для грудня.

Фізичний сенс:

Перша складова в квадратних дужках визначає зростання розмаху незалежних флуктуацій з ростом абсолютних значень імовірної радіації, а друга – деяку залежність від попереднього значення.

Перетворення в електричну енергію:

Фотомодуль має постійний коефіцієнт корисної дії (зазвичай на рівні 16-18%). Електрична потужність СЕС вважається пропорційною рівню сонячної радіації зі сталим коефіцієнтом пропорційності, і залежить від загальної площі фотомодулів та температури.

Приклад:

Для батареї з 4-х модулів потужністю 250 Вт і площею 1,6 м² коефіцієнт пропорційності приблизно становитиме 1,0 (1,6×4×0,16).

8. Вплив трекерних систем на продуктивність

Основною причиною зменшення інсоляції взимку, окрім більшої хмарності, є низький кут підйому сонця над горизонтом. Однак в перпендикулярній до напрямку сонячних променів площині, за наявності слідкуючої (трекерної) системи, цей фактор частково нівелюється.

Трекер:

Система автоматичного стеження за переміщенням і положенням сонця на небосхилі, що забезпечує постійне положення фотогальванічних модулів щодо сонячних променів під кутом, близьким до 90°. Вмонтований двигун забезпечує спрямований рух трекер-панелі в одній чи двох площинах.

Зростання продуктивності:

- 25% при одноосній корекції орієнтації;
- 45% при двоосній.

При моделюванні випадкової складової потужності сонячної електростанції слід враховувати:

- Залежність від стану атмосфери;
- Доступний обсяг сонячної радіації;
- Температуру повітря;
- Географічне положення;
- Сезон;
- Спосіб орієнтації.

9. Сумісна робота вітрових та сонячних установок

Для комплексної оцінки розглядаються тривалі (хоча б річні) синхронні записи швидкості вітру та сонячної інсоляції. Вважаємо ці дані суміщеними в часі та просторі для подальшого статистичного аналізу сумарної потужності вітро- та фотоелектричних станцій.

Нормалізація показників:

Для зручності подальших розрахунків значення швидкості вітру та сонячної радіації нормуються за допомогою відповідних величин номінальної потужності:

- $k_w = P(v)/P_n$ – показник вітрової енергії;
- $k_s = P(\rho)/P_n$ – показник сонячної енергії.

Сумарна потужність:

$$k_{\Sigma} = \alpha_1 \cdot k_w + \alpha_2 \cdot k_s,$$

де α_i – вагові коефіцієнти, пропорційні номінальним потужностям відповідних станцій.

Для коректності порівняння різних конфігурацій прийнято: $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

Приклад для Запорізької області (2016 р.):

Розглянемо сумарну відносну потужність однакових за номінальною потужністю ВЕС та СЕС ($\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$).

Показники потужності ФМ та ВЕУ (відносні величини):

Параметр	Станці	Січен	Квітень	Липень	Жовтень
	я	ь	ь	ь	ь
Середня потужність	ВЕУ	0,41	0,44	0,28	0,56
	ФМ	0,17	0,33	0,38	0,26
	Сумарна	0,24	0,32	0,26	0,35
СКВ	ВЕУ	0,33	0,36	0,27	0,37
	ФМ	0,22	0,28	0,28	0,25
	Сумарна	0,17	0,21	0,19	0,21

Кореляція ВЕУ та ФМ		-0,28	-0,08	-0,05	-0,15
Вироблена енергія	ВЕУ	305	320	208	430
	ФМ	53	135	172	90
	Сумарна	179	228	190	260
Максимум	Сумарна	0,76	1,0	0,89	0,87

Аналіз результатів:

Середнє значення сумарної потужності не співпадає з півсумою потужностей ВЕУ та ФМ, оскільки осереднення по ФМ ведеться тільки впродовж світлового часу, а вітру та сумарної потужності – впродовж усієї доби.

Взаємна компенсація:

Сумарна вироблена енергія дорівнює сумі енергій, отриманих ВЕУ та ФМ, але розкид значень (СКВ) при складанні двох випадкових величин помітно зменшується. Цьому сприяє також від'ємність коефіцієнта кореляції, хоча загалом ці величини можна вважати слабо корельованими або ж незалежними.

Сезонні особливості:

Взимку кореляція дещо помітніша – більше сонячних днів приходить на безвітряну погоду.

Методика моделювання:

Моделювання сумісної роботи ВЕС та СЕС як одиничної еквівалентної потужності недоцільне: тривалості дії сонячного освітлення та вітру різняться. Розділене моделювання дозволяє варіювати ваговими коефіцієнтами кожної станції, змінюючи конфігурацію генеруючої системи.

10. Результати моделювання комбінованої системи

Для перевірки адекватності моделі сумісної роботи сонячної та вітрової електростанцій порівнюємо результати моделювання сумарної потужності та суміщення фактичних синхронізованих даних за умови $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$.

Моделювані показники сумарної потужності (відносні величини):

Параметр	Січен	Квітень	Липень	Жовтень
	ь	ь	ь	ь
Середня потужність	0,24	0,32	0,26	0,35
СКВ	0,18	0,21	0,20	0,21
Вироблена енергія	182	232	195	264
Максимум	0,86	0,99	0,98	0,94

Порівняння з фактичними даними:

Порівняння вказує на високу збіжність результатів. Модель дещо завищує показники розкиду значень, що може бути обумовлене більшою кількістю реалізацій випадкового процесу при числовому моделюванні (1000 модельованих добових реалізацій проти 30-31 фактичних).

Точність моделі:

Сумарна вироблена за місяць енергія за моделлю відрізняється від фактично можливої на 1,5-2,5%.

Адекватність моделі:

Оскільки стрибки потужності за одиницю часу в моделі задаються відповідно до фактичних даних, то така модель може вважатися адекватною.

Контрольні питання

1. Чому робота сонячних електростанцій потребує імовірнісного моделювання?
2. Які джерела даних про сонячну радіацію доступні для України?
3. Що таке індекс прозорості атмосфери та як він розраховується?
4. Які чотири класи днів виділяють за рівнем хмарності?
5. Яку структуру має математична модель коливань сонячної радіації?
6. Які значення коефіцієнта варіації C_v характерні для різних сезонів?
7. Як трекерна система впливає на продуктивність сонячної електростанції?
8. Як розраховується сумарна потужність комбінованої системи ВЕС та СЕС?
9. Чому СКВ сумарної потужності менше, ніж у окремих компонентів?

10. Яка точність моделювання сумарної виробленої енергії комбінованої системи?

Лекція 15

Тема: «Оптимізація комбінованих енергосистем з мінливими відновлюваними джерелами та з використанням акумулювання енергії»

План

1. Постановка задач оптимізації комбінованих енергосистем
2. Критерії оптимізації та цільові функції
3. Фізичні обмеження та математичні моделі ВДЕ
4. Оцінка спільної роботи ВЕС та СЕС
5. Оптимальні співвідношення потужностей ВЕС і СЕС
6. Вплив ВДЕ на варіативність навантаження
7. Приклади оптимізації для різних споживачів
8. Вплив небалансу потужності на потребу в акумулюванні
9. Вибір параметрів акумулювання енергії
10. Імітаційне моделювання та практичні розрахунки

1. Постановка задач оптимізації комбінованих енергосистем

Природна вимога при побудові комбінованої енергосистеми на базі мінливих відновлюваних джерел (вітру та сонця) – мінімізація неконтрольованого розкиду значень генерованої потужності при максимізації виробленої енергії. В економічній постановці задачі оптимізації роль і вага середньої потужності ВДЕ та середньоквадратичного відхилення (СКВ) різна, вона визначається вартістю електроенергії і засобів резервування та/чи акумулювання.

Фактори оптимізації:

Оптимальне співвідношення окремих елементів визначається з урахуванням багатьох факторів:

- Забезпеченості традиційними джерелами енергії;

- Кліматичними (метеорологічними) умовами;
- Структурою систем енергопостачання і енергоспоживання;
- Вимогами до якості електричної і теплової енергії;
- Вимогами до графіка енергопостачання;
- Екологічними та економічними факторами.

Особливість локальних енергосистем:

Потреба в оптимізації складу генеруючих потужностей та їх характеристик, режимів сумісної роботи. Така оптимізація має враховувати особливості споживання енергії, вимоги до надійності забезпечення, наявний потенціал відновлюваних джерел енергії (сонячної, вітрової), вартісні показники.

Баланс потужності:

Представимо баланс потужності в автономній електроенергетичній системі у вигляді:

$$P_{\Delta}(t) = P_{Ren}(t) + P_{Ak}(t) - P_L(t),$$

де $P_{Ren} = P_W + P_{PV}$ – потужність відновлюваних джерел енергії (вітру та сонця); P_{Ak} – потужність (стан зарядки) акумуляторної батареї; P_L – потужність навантаження (споживання). P^0_W , P^0_{PV} , P^0_{Ak} – відповідні номінальні (максимальні) потужності.

2. Критерії оптимізації та цільові функції

Критерій оптимізації, або цільова функція, виходячи з найбільш уживаних вимог до комплексних енергосистем на базі ВДЕ, може мати наступні формулювання:

1) М-модель:

Сумарна генерована енергія практично рівна спожитій: $M(P_{\Delta}) \rightarrow \min$ або $M(P_{\Delta}) = 0$.

2) Мінімізація дисперсії:

Значення небалансу потужності мають бути мінімальними: $D(P_{\Delta}) \rightarrow \min$.

3) А-модель:

Передбачено резервне джерело (дизель-генератор чи міні-ГЕС) з заданим режимом роботи: $P_{\Delta} = fD(t)$.

4) ММ-моделі:

Обмеження по надлишку енергії: $\min(\max P\Delta)$, або обмеження по дефіциту енергії: $\max(\min P\Delta)$.

5) Мінімізація вартості обладнання:

Детермінований критерій: $CW \cdot P^0W + CPV \cdot P^0PV + CAk \cdot P^0Ak \rightarrow \min$, де Cx – питома вартість обладнання.

6) Собівартість електроенергії:

Цільова функція має вид:

$$f(T) = \sum_i^{N_i} \int_0^T c_i y_i(t) dt \rightarrow \min,$$

де c_i – питома вартість одиниці електричної енергії від i -го генеруючого елемента; $y_i(t)$ – кількість одиниць електричної енергії від i -го елемента; N – кількість елементів; T – час експлуатації.

3. Фізичні обмеження та математичні моделі ВДЕ

Фізичні обмеження у вигляді рівнянь стану мають вигляд енергетичних характеристик для відповідних джерел:

Модель вітрової енергії:

$$PW = PW(v), \text{ де } v(t) \text{ – поточна швидкість вітру (м/с).}$$

Модель ВЕС задається кривою потужності:

$$PW(V) = \{ p(V), V \in (V_0, V_m); 0, V \notin (V_0, V_m) \}.$$

Модель сонячної енергії:

$$PPV = PPV(\rho), \text{ де } \rho(t) \text{ – поточна сонячна радіація (Вт/м}^2\text{).}$$

Традиційна модель потужності СЕС:

$$PPV = \eta_{PV} \cdot APV \cdot Gt,$$

де APV – площа фотопанелей (м^2); Gt – сонячна радіація (Вт/м^2); η_{PV} – коефіцієнт ефективності, залежний від температури модуля та повітря.

Обмеження для акумуляторної батареї:

- $PAk_{\min} \leq PAk(t) \leq PAk_{\max}$ – обмеження заряду/розрядки;
- $PAk(t+1) - PAk(t) \leq P' Ak$ – обмеження по швидкості заряду/розрядки.

Вироблена електроенергія:

$$E = T \cdot \int_0^\infty P(x) \cdot f_x(x) dx,$$

де $f_x(x)$ – диференціальна функція імовірності розподілу змінної x ; $P(x)$ – потужність як функція координати x ; T – загальний час роботи.

Для вітру зазвичай приймається розподіл Вейбула, для сонячної радіації – бета-розподіл.

Потреба оцінювати випадкову складову:

Значне впровадження ВДЕ без достатнього акумулювання потребуватиме балансування поточних коливань генерованої енергії. Баланс споживання електроенергії та регулювання частоти – основні технічні проблеми в енергосистемах зі значним рівнем впровадження вітрової та сонячної енергетики.

4. Оцінка спільної роботи ВЕС та СЕС

Розглянемо сумісну роботу вітрової та сонячної станцій незалежно від способу споживання їх енергії. Для даних щодо швидкості вітру та сонячної радіації враховано нормовані показники потужності ВЕС та СЕС, сумарна відносна номінальна потужність – одиниця.

Позначення:

- w – відносна частка номінальної потужності ВЕС;
- s – відповідно СЕС;
- При цьому: $w + s = 1$.

Значення $w=1$ відповідає наявності лише ВЕС у складі ВДЕ, а $w=0$ – наявності лише СЕС.

Показники генерованої потужності ВДЕ (відносні величини):

Місяць	Параметр	$w=1$	$w=0,7$	$w=0,5$	$w=0,2$	$w=0$
Січень	P_c	0,41	0,32	0,24	0,16	0,07
	СКВ	0,33	0,24	0,17	0,13	0,16
Квітень	P_c	0,44	0,38	0,32	0,25	0,19
	СКВ	0,36	0,27	0,21	0,21	0,27
Липень	P_c	0,28	0,27	0,26	0,24	0,23
	СКВ	0,27	0,21	0,19	0,22	0,29
Жовтень	P_c	0,57	0,46	0,35	0,24	0,12
	СКВ	0,37	0,28	0,20	0,18	0,21

За рік	Рс	0,42 5	0,358	0,293	0,223	0,15 3
	СКВ	0,33 3	0,25	0,193	0,185	0,23 3

5. Оптимальні співвідношення потужностей ВЕС і СЕС

При врахуванні повної доби мінімальне СКВ середньорічних значень досягається при частці ВЕС на рівні 0,32 загальної потужності ВДЕ, а мінімум коефіцієнта варіації C_v відповідає частці $w=0,56$.

Коефіцієнт варіації:

Якщо за критерій брати коефіцієнт варіації потужності як комбінований показник відхилень та середньої потужності, то мінімум досягається при частці ВЕС 0,56 від загальної номінальної потужності ВДЕ.

Сезонні особливості:

- Січень: Мінімум СКВ при частці ВЕС 0,25, мінімум C_v – при 0,48;
- Липень: Відповідні частки – 0,52 та 0,58.

Метод пошуку:

Пошук оптимальних співвідношень потужностей ВЕС і СЕС виконувався методом «поверхні відгуку» (response surface), в даному випадку кривої, тобто графічно.

6. Вплив ВДЕ на варіативність навантаження

Розглянемо сумісні коливання рівнів генерування електричної енергії від ВДЕ та синхронного навантаження споживання. Рівень поточного споживання електроенергії має певні відхилення (флуктуації) відносно осередненого графіка.

"Чисте" навантаження:

Поточне споживання за вирахуванням надходжень від ВДЕ іменують «чистим» навантаженням (net base load).

Формула побудови місячного набору даних:

$$p_{ij} = (a_{ij} - a_i) - [(w_{ij} - w_i) + (s_{ij} - s_i)],$$

де a_x – рівень споживання електроенергії; w_x та s_x – потужність ВЕС та СЕС відповідно; i – індекс часу; j – номер доби; p_{ij} – відхилення від графіка навантаження.

Перехід до робочої потужності:

$$r = R \cdot (k_{ww} + k_{ss}) = R[k_{ww} + k_s(1-w)],$$

де k_x – коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) відповідного ВДЕ; R – номінальна потужність; r – ефективна потужність.

Двокритеріальна задача:

Розв'язками задачі оптимізації будуть $\operatorname{argmax}_{R,w} r$ та $\operatorname{argmin}_{R,w} D\{p_{i,j}\}$ при умові виконання відповідних обмежень.

Комбінований критерій:

Коефіцієнт варіації $CV = \sigma/r$ як відношення СКВ до математичного очікування; його мінімум є результатом як зростання ефективної потужності ВДЕ, так і зменшення варіативності.

7. Приклади оптимізації для різних споживачів

Окремий населений пункт (село в Запорізькій обл., січень):

Очевидним є зменшення відносної потужності ВДЕ при зменшенні частки ВЕС через традиційно вищий КВВП для вітроустановок порівняно з фотомодулями.

Результати для січня:

Мінімальна абсолютна дисперсія спостерігається при частці ВЕС $w=0,1$ (взимку роль сонячної енергії мінімальна). Відносна варіація мінімальна при частці ВЕС в межах від 0,2 до 0,3.

Коефіцієнт додаткової варіації:

$$CV = (\sigma_R - \sigma_0)/R, \quad CV_r = (\sigma_r - \sigma_0)/r,$$

де σ – СКВ; індекс R стосується системи з ВДЕ, а 0 – «чиста» енергосистема; R – номінальна потужність ВДЕ; r – середня робоча потужність ВДЕ.

Приклад з обмеженнями:

Середньорічне навантаження 800 кВт, СКВ відхилень від графіка по сезонах: 90, 54, 67, 88 (кВт), розмах флуктуацій ± 200 кВт.

Умови оптимізації:

Максимум ефективної потужності ВДЕ при обмеженнях на флуктуації навантаження 250 кВт протягом 90% часу: $P\{|p_{ij} - p_i| \leq p_0\} \geq 0,9$, де $p_0=250$ кВт.

З умови випливає: $\sigma_{\max} = 150$ кВт.

Результат:

Для січня область, для якої СКВ не перевищує 150 кВт, обмежена кривою з максимумом $R=1150$ кВт при частці ВЕС $w=0,12$. Максимум ефективної потужності ВДЕ досягається при частці ВЕС $w_0=0,2-0,4$; абсолютне значення на рівні $r=155-160$ кВт.

Дніпровська енергосистема (ДнЕС):

Середньорічна потужність 5100 МВт. Для січня: СКВ флуктуацій без ВДЕ 170 МВт, діапазон відхилень ± 460 МВт.

Обмеження:

$p_0 = 500$ МВт, $\sigma_{\max} = 300$ МВт.

Результати імітаційного моделювання:

Мінімум $C_{\text{тг}}$ досягається при $w_0=0,26$ за фактичними даними. При оптимізації з ізоляції максимальних значень R за умови $\sigma \leq 300$ МВт: $w_0=0,28$. Максимальне допустиме значення $R=2700$ МВт, оптимальне по максимуму r : $R=2100$ МВт при $r=260$ МВт.

Липень:

СКВ флуктуацій без ВДЕ 125 МВт, діапазон ± 350 МВт. Оптимальне $w_0=0,2$. Максимальне допустиме значення $R=1800$ МВт, оптимальне $R=1650$ МВт при $r=400$ МВт.

Загальний висновок:

Якщо критерієм є мінімізація сукупної дисперсії або додаткової варіативності навантаження при впровадженні ВДЕ, то оптимальним рішенням буде певна пропорція вітрової та сонячної складової (як правило, частка ВЕС має складати 10-40% сукупної номінальної потужності ВДЕ залежно від загальної частки ВДЕ).

8. Вплив небалансу потужності на потребу в акумулюванні

Випадкова складова в різниці генерації та споживання електроенергії, тобто небаланс потужності, є вирішальним фактором при визначенні потреб в акумулюванні як засобі забезпечення надійності енергопостачання.

Небаланс енергії:

Як інтегральна характеристика небалансу потужності залежить від тривалості та знаку відхилень генерованої потужності від споживаної. Графік накопичених обсягів надлишкової та недостатньої енергії дозволяє зробити висновки щодо потреб у акумулюванні енергії.

Резервування vs акумулювання:

Резервування потужностей дозволяє уникнути недопоставок енергії (компенсує негативну складову небалансу). Натомість позитивна частина може бути збережена шляхом акумулювання, яке одночасно слугуватиме і як резерв потужності.

Особливість акумулювання:

На відміну від резервування, для якого важливим є розмах відхилень навантаження від графіка, для роботи акумуляторів енергії важлива також послідовність відхилень.

Модель дискретного блукання:

Розглянемо процес поточних відхилень від середнього значення як дискретну модель блукання:

$$u_i = u_{i-1} + \varepsilon_i, \text{ де } u_i = \int_{[t_{i-1} \text{ to } t_i]} U(t)dt.$$

Такий процес має властивості процесу Орнштейна-Уленбека, який описується стохастичним диференціальним рівнянням:

$$dU(t) = -\alpha U(t)dt + \eta dW.$$

9. Вибір параметрів акумулювання енергії

Для розглянутих споживачів природний режим споживання (без ВДЕ) характеризується наявністю трендової лінії та випадкових відхилень від неї як флуктуацій поточної потужності.

Два варіанти планування:

1. З щоденним прогнозуванням середньодобових значень (добова циклічність небалансів);
2. Без поточного прогнозування з орієнтацією на середньомісячні дані (місячна циклічність).

Розподіл небалансу:

Розподіл відхилень (флуктуацій) як при наявності щоденного прогнозу, так і при його відсутності близький до нормального.

Порогові обмеження:

Акумулювати пропонується розпочинати при значеннях небалансу понад P_2 , а розряджати акумулятори при небалансі нижче P_1 . Площі заштрихованих областей мають бути рівними (результуючий баланс акумулювання прямує до нуля).

Визначення обсягу акумульованої енергії:

$$\int_{[-\infty \text{ to } P_1]} p \cdot f(p) dp = -\int_{[P_2 \text{ to } \infty]} p \cdot f(p) dp = E_1 T,$$

де $f(p)$ – функція щільності розподілу небалансу потужності; E_1 – доцільна кумулятивна енергія при заданих порогових обмеженнях.

10. Імітаційне моделювання та практичні розрахунки

Приклад 1 – без ВДЕ:

Традиційне споживання має параметри $\sigma_0=35$ кВт, $\sigma_K=152$ кВт·год (споживач 700-1100 кВт), прогнозування щоденне.

Для довірчої імовірності $\gamma=0,9$ при нормальному розподілі: $|\chi|_{0,9}=\chi_{0,95}=1,65$.

Результат:

Гарантоване з імовірністю не нижче 90% збереження надлишкової енергії потребує:

- Ефективної ємності акумулювання: 250 кВт·год;
- Потужності: 60 кВт.

Приклад 2 – з ВДЕ:

При $R=400$ кВт, $w=0,5$ маємо $\sigma_\Sigma=55$ кВт, $\sigma_K=244$ кВт·год.

Результат:

За довірчої імовірності $\gamma=0,9$:

- Ефективна ємність акумулювання: 400 кВт·год;
- Потужність: 90 кВт.

Додаткова потреба: 30 кВт, або 8% від потужності ВДЕ.

Обсяг не акумульованої енергії:

$$E_{na} = t \cdot \int_{[\chi \text{ to } \infty]} p \cdot f_P(p) dp = t \cdot I(\chi),$$

де функція $I(\cdot)$ визначає математичне сподівання нормальної випадкової величини на обмеженому зліва інтервалі.

Уточнений розрахунок:

Якщо $\gamma_0=0,9$ при відсутності ВДЕ, то $\chi\gamma=1,88$ для $w=0,5$ і $R=400$ кВт, а $\gamma\Sigma=0,94$. Тоді потрібна потужність акумулювання становитиме 103 кВт, або додаткових 43 кВт (11% потужності ВДЕ).

Обернена задача:

Для заданої ємності акумулювання АК знайти довірчу імовірність запобігання небалансу енергії:

$$\gamma = \Phi(AK/\sigma K),$$

де $\Phi(\cdot)$ – інтеграл імовірності.

Додаткові уточнення:

При оцінці кількості збереженої енергії потрібно враховувати:

- Нелінійну характеристику процесів акумулювання;
- Втрати при процесах зарядки та розрядження;
- Відповідність швидкодії акумулювання та градієнту зміни потужності небалансу.

Ідеалізована схема дозволяє оцінити порядок величин, їх взаємозалежність, та порівнювати різні варіанти енергосистеми.

Контрольні питання

1. Які основні критерії оптимізації використовуються при проектуванні комбінованих енергосистем на базі ВДЕ?
2. Як формулюється баланс потужності в автономній електроенергетичній системі з ВДЕ?
3. Які фізичні обмеження накладаються на роботу акумуляторної батареї в комбінованій енергосистемі?
4. При якому співвідношенні ВЕС та СЕС досягається мінімальне середньоквадратичне відхилення сумарної генерації?
5. Що таке "чисте" навантаження енергосистеми та як воно розраховується?
6. Як визначається коефіцієнт додаткової варіативності при впровадженні ВДЕ?

7. Яка типова частка ВЕС є оптимальною у складі комбінованої системи ВДЕ залежно від сезону?
8. Чим відрізняються вимоги до резервування потужностей від вимог до акумулювання енергії?
9. Як розраховується необхідна ємність акумулювання при заданій довірчій імовірності забезпечення енергобалансу?
10. Яка додаткова потреба в потужності акумулювання виникає при впровадженні ВДЕ порівняно з традиційною енергосистемою?

Лекція 16

Тема: «Системи акумулювання енергії відновлюваних джерел. Комбіновані енергетичні системи на основі відновлюваних джерел з комплексним використанням систем акумулювання»

План

1. Системи акумулювання енергії ВДЕ та якість функціонування мережі
2. Вимоги до систем акумулювання електричної енергії
3. Електрохімічні накопичувачі енергії
4. Альтернативні технології акумулювання
5. Гідроакумулюючі станції (ГАЕС) та їх роль в ОЕС України
6. Теплове акумулювання енергії
7. Гібридні системи зберігання енергії (HESS)
8. Практичні застосування акумуляторних батарей в енергосистемах
9. Критерії вибору системи накопичення енергії
10. Схемо-технічні рішення зарядження акумуляторних батарей від ВЕУ

1. Системи акумулювання енергії ВДЕ та якість функціонування мережі

У сучасній відновлюваній енергетиці все більше уваги приділяється якісним показникам енергії. Якість функціонування електричної мережі характеризується надійністю, якістю електричної енергії, втратами електроенергії. Це її властивість зберігати в часі у встановлених межах значення

всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих межах.

Ключові показники якості:

- Імовірність забезпечення балансової надійності;
- Імовірність відповідності фактичних режимів «ідеальному» за втратами активної потужності;
- Імовірність забезпечення нормативних відхилень напруги у вузлах мережі;
- Імовірність забезпечення нормативних спотворень синусоїди напруг.

Балансова надійність:

В умовах розбудови ВДЕ в розподільних електричних мережах необхідно в першу чергу оцінювати балансову надійність, тобто визначення імовірності неспівпадіння графіків споживання і генерування, зумовлену нестабільністю таких ВДЕ, як сонце та вітер.

Роль акумуляторів:

При цьому великого значення набуває використання акумуляторів енергії, що забезпечують вирішення цілого ряду проблем накопичення, зберігання та перетворення енергії ВДЕ. Актуальною стає проблема розробки і створення високоефективних засобів для акумуляування електричної та теплової енергії.

Основні характеристики накопичувачів:

При виборі накопичувачів енергії для конкретної енергетичної системи необхідно враховувати енергетичні та експлуатаційні показники:

- Питома потужність;
- Питома енергія;
- Питома вартість накопичувача енергії;
- Термін заряду-розряду;
- Термін служби;
- ККД;
- Саморозряд;
- Безпека;
- Простота обслуговування;
- Вид виробленої та споживаної енергії.

2. Вимоги до систем акумулювання електричної енергії

Системи акумулювання електричної енергії призначені для накопичення і зберігання електричної енергії, отриманої на об'єктах відновлюваної енергетики, та позапікової енергії промислової електромережі на об'єктах традиційної енергетики з подальшим живленням споживачів.

Режими роботи:

При роботі з генеруючим обладнанням на основі ВДЕ системи акумулювання, працюючи в режимі постійного підзаряду, вирівнюють добові коливання та забезпечують стабільне живлення споживачів електроенергії.

При роботі з промисловою електромережею системи накопичують позапікову електроенергію в нічний час і забезпечують електроживлення споживачів у періоди відключення від неї.

Вимоги до систем:

Система акумулювання при застосуванні в комплексних енергосистемах повинна відповідати таким вимогам:

1. Забезпечувати стабільне електроживлення споживачів незалежно від періодичності роботи відновлюваних джерел енергії та в періоди відключення промислової електромережі;
2. Мати оптимальну енергоємність, що залежить від потреб енергосистеми в кожному конкретному випадку і забезпечується набором акумуляторів з послідовним або паралельним підключенням;
3. Забезпечувати необхідну робочу напругу та автоматичне регулювання режимами роботи.

3. Електрохімічні накопичувачі енергії

Найбільш популярними є електрохімічні накопичувачі енергії. Вибір марки електрохімічних акумуляторів проводиться на основі аналізу їх технічних характеристик, які повинні забезпечувати ефективну роботу систем акумулювання з енергетичним обладнанням на основі відновлюваних джерел енергії.

Визначення енергоємності:

При визначенні енергоємності акумуляторної батареї необхідно орієнтуватися на створення резервного запасу електроенергії для стабільного живлення споживачів. Розрахунки проводяться або уточнюються в кожному окремому випадку. Необхідна енергоємність забезпечується набором певної кількості акумуляторів у певному їх підключенні – послідовному чи паралельному.

Настінні акумулятори (Tesla):

Приклад домашніх (настінних) акумуляторів – вироби компанії Tesla. Tesla знижує вартість виробництва на 30-50% протягом 3-6 років (на 16% в рік). Це без урахування технічних інновацій, що дадуть ще до 5% в рік.

Електромобілі як накопичувачі:

В якості накопичувача енергії можна використовувати електромобілі (для споживання надлишкової енергії). Ефективність двигуна внутрішнього згоряння близько 20%, 80% запасеної енергії відлітає в дим. Електромотор має ефективність 90-95% – у чотири рази ефективніший.

Популярні технології батарей:

Популярні технології акумуляторних батарей для стаціонарних системних розробок включають:

- Свинцево-кислотні;
- Сірчано-натрієві (NaS);
- Хлорид натрію-нікелю (NaNiCl₂, ZEBRA);
- Нікель-кадмієві (Ni-Cd);
- Літій-іонні (Li-іон);
- Бромистий цинк (Zn-Br);
- Полісульфідний бром (PSB);
- Ванадій-редокс (VRB);
- Нові системи: VRLA, свинцево-вуглецеві, метало-повітряні, UltraBattery.

4. Альтернативні технології акумулявання

Стиснене повітря (CAES):

Варіантом накопичувача енергії може бути стиснене повітря. Для закачування повітря в резервуари використовується енергія від офшорних ВЕС.

Використання офшорних ВЕС є зручним, оскільки біля них є сприятлива глибина для розташування резервуарів.

Розробники Energy Bag проводили випробування резервуара діаметром 20 метрів на глибині 600 метрів. Обсяг акумульованої енергії склав 70 МВт·год.

Інерційні акумулятори (Flywheel):

З точки зору швидкодії ефективним є використання інерційних механічних акумуляторів flywheel (маховиків). Вони забезпечують швидку реакцію на зміни потужності – від мілісекунд до секунд.

5. Гідроакумулюючі станції (ГАЕС) та їх роль в ОЕС України

Найбільш уживаним варіантом акумулювання електроенергії в промислових масштабах є гідроакумулюючі станції (ГАЕС, PHS).

Перевага ГАЕС:

Міжнародне енергетичне агентство (IEA, 2014) в своїй Дорожній карті з акумулювання енергії надає перевагу використанню ГАЕС як єдино можливого комерційному проекту за потреби акумулювання електроенергії в значних промислових обсягах з урахуванням вартості та ризиків технології.

ГАЕС з вітронасосом:

Особливо цікавим є використання ВДЕ для зарядки ГАЕС, тоді акумулювання максимально наближене до джерела мінливої енергії і перетоки електроенергії мінімальні.

Дослідження ДПВ НДІ «Укренергомережпроект» (2007):

При впровадженні ВЕС 300 МВт:

- Не погіршується режим енергосистеми;
- Збільшується добове споживання електроенергії ГАЕС на 0,1 ГВт·год;
- Зменшується вироблена на ТЕС електроенергія на 2,1 ГВт·год;
- Робоча площадка ГАЕС збільшується з 2-х годин до 7 годин на добу.

При впровадженні ВЕС 1500 МВт:

- Майже не призводить до збільшення добового споживання електроенергії ГАЕС;
- Суттєво зменшується енергія, яку виробляють ТЕС, на 11,5 ГВт·год щодобово;

- Робоча площадка ГАЕС не збільшується (3 години на добу).

При впровадженні ВЕС 3000 МВт:

- Дещо збільшує участь ГАЕС;
- Зменшується енергія ТЕС на 22,8 ГВт·год щодобово;
- Робоча площадка ГАЕС збільшується до 7 годин на добу;
- Виробнича енергія на ГАЕС зростає з 1,67 до 2,04 ГВт·год на добу.

В усіх режимах зимового сезону дія ВЕС призводить до витіснення блоків ТЕС із графіка покриття навантажень, при цьому втрата маневрової потужності ТЕС компенсується потужністю ГАЕС. Це призводить до певного збільшення витрат електроенергії на закачку води для ГАЕС, що зменшує енергетичну ефективність використання ВЕС в енергосистемі (на 3% 2010 року і 5% в 2015-2020 роки).

Рекомендації щодо впровадження ВЕС:

«В якості орієнтира для планування розвитку генеруючих потужностей можна рекомендувати таку частку встановленої потужності ВЕС в структурі електростанцій (в % від очікуваного максимального навантаження):

- До 1% в період 2010 р.;
- 8-9% до 2015 р.;
- 14-15% на рівні 2020 р.»

6. Теплове акумулювання енергії

Однією з актуальних проблем відновлюваної енергетики є також питання акумулювання теплової енергії, в першу чергу, в сонячній теплоенергетиці. Теплові акумулятори також ефективно використовуються в комплексі з вітроелектричними агрегатами, фотобатарейми та в традиційній енергетиці для зняття пікових навантажень.

Визначення:

Теплове акумулювання – це фізичні або хімічні процеси, за допомогою яких відбувається накопичення тепла в тепловому акумуляторі енергії. Тепловими акумуляторами (ТА) називають пристрої, які забезпечують зворотні

процеси накопичення, зберігання та віддачі теплової енергії відповідно до потреб споживача.

Мета акумулювання:

Акумулювання тепла в різних енергосистемах проводиться з метою забезпечення потреб опалення та гарячого водопостачання. Акумулювання тепла в будь-якій водонагрівальній системі дозволяє пристосовувати її до умов попиту на гарячу воду, що змінюється протягом доби.

Застосування в сонячній енергетиці:

Застосування різних засобів для накопичення енергії при використанні сонячних енергетичних установок дозволяє також подолати проблему, пов'язану з нерівномірною інтенсивністю сонячної енергії протягом доби. Сонячні установки для опалення підтримують температуру теплоносія на рівні 60°C лише близько трьох годин на добу.

Проект Siemens Gamesa (2017):

Компанія Siemens Gamesa приступила до будівництва термального накопичувача для зберігання вітрової електроенергії на території алюмінієвого заводу Trimet неподалік Гамбурга.

Проект FES (Future Energy System):

- Перетворює енергію від ВЕС у теплову;
- Зберігання в кам'яній породі масою близько 1000 тонн;
- Температура зберігання 600°C;
- Ємність близько 30 МВт·год;
- Генератор потужністю 1,5 МВт здатен виробляти електроенергію цілодобово;
- Може жити 1500 середніх німецьких домогосподарств.

Водневий супер-центр в Австралії (проект Neoen, 2021):

- Електролізери потужністю 50 МВт;
- Виробництво 21000 кг водню на добу;
- ВЕС і СЕС сумарною потужністю 300 МВт;
- Батарейний накопичувач ємністю 400 МВт·год (Tesla);
- Загальна вартість проекту \$600 млн.

7. Гібридні системи зберігання енергії (HESS)

Розробка гібридних систем зберігання енергії (HESS – hybrid energy storage systems) відноситься до найбільш інноваційної галузі. HESS характеризує вигідне сполучення двох або більше технологій зберігання енергії з взаємодоповнюючими експлуатаційними характеристиками.

Основні конфігурації HESS:

Для застосування в децентралізованих системах з ВДЕ вважаються найбільш придатними чотири конфігурації:

1. Нагрівач/акумуляторна батарея;
2. Нагрівач/акумуляторна батарея/водень;
3. Суперконденсатор/акумулятор;
4. Акумуляторна батарея/акумулятор.

Перспективні програми HESS:

- HESS в електричних транспортних засобах з гібридним приводом та паливними елементами;
- Системи відновлюваного автономного енергозабезпечення;
- Використання на домашньому, районному чи регіональному рівнях;
- HESS для управління потужністю великих ВЕС та СЕС;
- Спеціальні конфігурації (маховик/акумулятор).

Параметри систем акумуляування:

- Номінальна потужність (Вт, кВт);
- Ємність (кВт·год, джоуль);
- Життєвий цикл (роки);
- Ефективність (%);
- Час розряду (год);
- Час реагування (сек);
- Кількість циклів заряду/розрядки;
- Розміри (м³);
- Щільність енергії чи потужності.

Роль різних технологій:

Електрохімічні акумуляторні батареї, зокрема літій-іонні, відіграють ключову роль у багатьох HESS-розробках. Суперконденсатори та маховики характеризуються ще більшою щільністю потужності, ефективністю та тривалістю циклу. Батареї редокс-проточні є перспективною технологією завдяки їх властивостям відокремлювати параметри потужності та ємності.

Значення теплопостачання:

Схеми прямого теплопостачання та накопичення енергії у вигляді тепла також займають важливе місце. Зберігання тепла, виробленого з надмірної енергії ВДЕ, підвищить загальний рівень використання поновлюваних джерел енергії.

8. Практичні застосування акумуляторних батарей в енергосистемах

1. Крупні ВЕС з розподілим енергозбереженням:

Поєднання вітрового ресурсу з розподілим акумуляуванням допоможе вирішити проблему нерівномірності генерації вітрової енергії.

2. Комунальні системи зберігання енергії:

Система батарей для спільного зберігання енергії може бути розроблена для острівних енергосистем, коли локалізований сектор розподільної енергетичної системи ізольовано від мережі.

3. Розподілена інтегрована до мережі PV-система:

Система акумуляування допомагає регулювати швидкі зміни генерації, добові коливання, питання якості постачання енергії.

4. Транспортні засоби з накопичувачами енергії:

Система розподілених акумуляторних батарей, встановлених до електричних транспортних засобів, може бути частиною локалізованої стратегії енергетичної системи.

5. Управління рівнем споживання кінцевого користувача:

Регульовані (зонні) тарифи на енергію спонукають використовувати системи зберігання для зменшення витрат на електроенергію при зміщенні часу заряджання в зону низького тарифу.

6. Гнучкий піковий ресурс:

Використання модульного акумулятора для обслуговування максимального попиту може бути економічно ефективним.

7. Регулювання частоти:

Акумуляування електроенергії має потенціал забезпечити регулювання частоти за мілісекунди, має економічну перспективу.

8. Обертний резерв:

Системи зберігання енергії забезпечують можливість резерву через спеціальні перетворювачі, які взаємодіють з енергосистемою.

9. Відстрочка на модернізацію систем передачі та розподілу (T&D):

Модульна конфігурація системи зберігання може бути використана для обслуговування невеликої кількості пікового попиту без необхідності збільшення потужностей T і D.

10. Системи безперебійного живлення (UPS):

Акумуляторні системи є важливим компонентом UPS-технологій для забезпечення стабільної та надійної потужності.

Приклад в Україні:

Навесні 2021 р. компанія ДТЕК завершила монтаж першої в Україні промислової системи накопичення енергії (СНЕ) потужністю 1 МВт і ємністю 2,25 МВт·год. СНЕ встановлена в Енергодарі на майданчику біля Запорізької ТЕС.

9. Критерії вибору системи накопичення енергії

Необхідно розглянути певні змінні параметри системи акумуляування та конкретної батареї:

Економічні показники:

- Початкові витрати;
- Термін служби;
- Вартість установки;
- Вартість технічного обслуговування;
- Вартість доставки;
- Вартість заміни та утилізації.

Технічні показники:

- Безпека;
- Кількість циклів заряду/розрядки;
- Ефективність відновлення;
- Надійність;
- Екологічність.

Вартісні співвідношення:

Вартість акумулятора становить 40-46% від загальної вартості мікромережі. Оптимальне рішення щодо батареї – це та, що має найнижчу вартість за повний життєвий цикл, тобто \$/кВт·год.

Технології на основі водню:

Найкраще підходять для акумулювання електроенергії в мегаватному масштабі від погодинного до сезонного періодів, що найбільш сприятливо для балансування енергосистеми.

Водневий акумулятор LAVO (2021):

Австралійська компанія LAVO у співпраці з Університетом Нового Південного Уельсу розробили першу у світі домашню батарею на водні.

Характеристики:

- Електрична ємність: 40 кВт·год (втричі більше ніж Tesla Powerwall 2);
- Вага: 324 кг;
- Розміри: 1,68×1,24×0,4 метра;
- Вартість: \$34000;
- Один заряд забезпечує енергією домогосподарство впродовж 2-3 днів;
- Термін експлуатації: до 30 років.

10. Схемо-технічні рішення зарядження акумуляторних батарей від ВЕУ

В більшості випадків накопичувачами енергії, що виробляється вітроагрегатами, є електрохімічні акумуляторні батареї (АБ) різних типів.

Проблема «нижньої межі»:

Швидкість вітру є змінною величиною в широкому діапазоні. Існує частина діапазону швидкості вітру («нижня межа») для кожного вітроагрегату, де зарядні пристрої не можуть функціонувати через зниження вихідної напруги і

потужності генератора. Для різних регіонів України ця невикористана енергія може складати від 8,8 до 54%.

Режими роботи при «нижній межі»:

1. Напруга генератора при холостому ході вища за напругу АБ, проте потужності генератора недостатньо для функціонування традиційного зарядного пристрою;
2. Напруга генератору при холостому ході відрізняється від номінального рівня напруги АБ.

Схема для першого режиму:

Застосовується схемо-технічне рішення з конденсатором та транзисторним ключем:

- Транзисторний ключ К спочатку розімкнений;
- Відбувається накопичення енергії в конденсаторі С;
- При досягненні певного рівня вмикається ключ К;
- По ланцюгу С – К – АБ – С протікає зарядний струм;
- Конденсатор розряджається до напруги АБ;
- Ключ К замикається;
- Процес повторюється.

Універсальна схема для обох режимів:

Схема з випрямлячем (В) та стабілізатором напруги (СН) дозволяє заряджувати АБ практично у всьому діапазоні зміни швидкості вітру:

При високій швидкості вітру:

- Генератор виробляє енергію з напругою, що перевищує напругу АБ;
- Зарядження традиційним способом через керований стабілізатор напруги;
- СН виконує функцію понижуючого пристрою;
- Ключі К1 і К2 постійно замкнені.

При низькій швидкості вітру:

- Вихідна напруга випрямляча В стає нижчою за напругу АБ;
- Ключі К1 і К2 розмикаються;
- Стабілізатор СН переходить в режим підвищення напруги;
- При досягненні необхідного рівня замикається ключ К1;

- Відбувається зарядження конденсатора С;
- Після закінчення зарядження К1 розмикається, К2 замикається;
- Зарядний струм протікає за ланцюгом С – К2 – АБ – С;
- Процес повторюється.

Переваги універсальної схеми:

Дозволяє заряджувати АБ практично у всьому діапазоні зміни швидкості вітру (до критичного нижнього значення напруги), що підвищує ефективність перетворення енергії вітру.

Контрольні питання

1. Які ключові показники характеризують якість функціонування електричної мережі з ВДЕ?
2. Які основні характеристики повинні враховуватися при виборі накопичувачів енергії?
3. Які основні вимоги висуваються до систем акумулювання електричної енергії в комплексних енергосистемах?
4. Як впливає впровадження ВЕС на роботу ГАЕС в ОЕС України?
5. Які рекомендації щодо частки встановленої потужності ВЕС надані ДПВ НДІ «Укренергомережпроект»?
6. Що таке гібридні системи зберігання енергії (HESS) та які їх основні конфігурації?
7. Які практичні застосування акумуляторних батарей в енергосистемах на основі ВДЕ ви знаєте?
8. Які критерії є визначальними при виборі системи накопичення енергії?
9. Чому технології на основі водню найкраще підходять для акумулювання електроенергії в мегаватному масштабі?
10. Як працює універсальна схема зарядження акумуляторних батарей від ВЕУ в діапазоні «нижньої межі»?

Лекція 17

Тема: «Фактори впливу відновлюваної енергетики на надійність та стійкість енергосистеми»

План

1. Основні фактори впливу ВДЕ на енергосистему
2. Вимоги щодо захисту електричних мереж у точці приєднання
3. Умови приєднання ВДЕ до електромереж
4. Вимоги до роботи при нормальних та аварійних умовах експлуатації
5. Функції обмеження активної потужності ВДЕ
6. Статична та коливальна стійкість енергосистеми
7. Динамічна стійкість та нормативні збурення
8. Запас статичної стійкості та його оцінка
9. Характер випадкових коливань потужності в Україні
10. Вплив ВЕС на динамічну стійкість енергосистеми

1. Основні фактори впливу ВДЕ на енергосистему

Директивними документами щодо розвитку вітчизняної енергетики передбачено зростання потужностей вітрових та сонячних електростанцій, причому досяжні рівні очікуються на рівні принаймні десятка гігават в перспективі ближчого десятиліття.

Проблема мінливості:

Змінний та непередбачуваний характер видачі потужності, притаманний вітровій енергетиці, може призвести до негативного впливу на режими роботи об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України. Це зокрема стосується стійкості динамічних процесів в системах енергопостачання і відповідно організації диспетчерського керування енергосистемами.

Потреба в регулюванні:

Значне впровадження вітрової та сонячної енергетики, якщо воно не супроводжується технологіями акумулювання енергії, неминуче потребує регулювання поточної потужності енергосистеми, щоб збалансувати коливання енергії вітру. Баланс споживання електроенергії та регулювання частоти – основні технічні проблеми в енергосистемах зі значним рівнем впровадження вітрової енергетики.

Важливі характеристики ВДЕ:

При сумісній з ОЕС роботі важливі наступні характеристики:

1. Поточна потужність та розподіл її імовірності, в тому числі мінімальне, максимальне та середнє значення, які необхідні для передбачуваності і визначення потреб у резерві;
2. Темп зміни потужності – він впливає на стійкість енергосистеми і на параметри необхідного резерву.

Вплив на інерцію системи:

Значне збільшення частки ВДЕ в енергосистемі буде витіснити в першу чергу теплові електростанції, що ускладнить можливість регулювання частоти. При цьому зменшується також механічна інерція системи генераторів, оскільки СЕС є безінерційними, а ВЕС також працюють через електронний міст (випрямляч-інвертор).

Географічний розподіл:

При збільшенні частки ВДЕ в енергосистемі природні коливання потужності можна врівноважити різними способами. Наприклад, сумарні коливання групи ВЕС та СЕС можуть бути згладжені за рахунок географічного розподілу цих електростанцій в межах енергосистеми.

Джерела збурень:

Величини необхідних резервів у енергосистемі визначаються обсягом тих збурень (небалансів потужності), які має компенсувати вторинне регулювання:

- Нерегулярні коливання активної потужності, зумовлені випадковим характером навантаження;
- Похибка регулювання балансу потужності, обумовлена розбіжністю в часі прогнозного і фактичного графіків навантаження;
- Розрахунковий небаланс потужності.

2. Вимоги щодо захисту електричних мереж у точці приєднання

Згідно вказівок нормативних документів, зокрема «Кодексу системи передачі» і «Кодексу систем розподілу» (НКРЕКП, 2018) та СОУ НЕК 341.001:2019 «Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їхній роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України» вимоги до

облаштування пристроями захисту повинні бути направлені на захист електростанції та забезпечення стабільної роботи електричної мережі.

Відповідальність власника:

Власник електростанції є відповідальним за оснащення електростанції таким чином, щоб вона:

- Була захищена від пошкоджень внаслідок збоїв або аварійних ситуацій у електричній мережі загального призначення (симетричного або несиметричного короткого замикання, відновлення напруги після ліквідації аварійних ситуацій, підвищення напруги у неушкодженій фазі при несиметричному короткому замиканні, обривів фаз);
- Була захищена від пошкодження внаслідок несинхронного підключення;
- Максимально захищала електричну мережу від небажаних впливів з боку вітрової та фотоелектричної електростанції;
- Була захищена від відключення у некритичних випадках для електростанції.

Функції захисту:

Функції захисту електростанції та інші відповідні налаштування повинні бути задані по діючому значенні показників. Електростанція повинна бути відключена або зупинена, якщо виміряні значення відрізняються від встановлених номінальних значень.

Час відключення електростанції у разі виникнення аварійних ситуацій повинен бути чітко визначений функціями захисту. Частота та напруга мають вимірюватися для усіх трьох фаз як лінійна напруга.

3. Умови приєднання ВДЕ до електромереж

Нормативні вимоги стосуються вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій, які використовують статичні електронні перетворювачі енергії, розподіляються відповідно до загальної номінальної потужності в точці приєднання:

Класифікація за потужністю:

1. 150 кВт – 2 МВт: Електростанції малої потужності, які можуть впливати на режими роботи локальних вузлів розподільчих мереж середньої напруги;
2. 2 МВт – 25 МВт: Електростанції середньої потужності, які можуть впливати на режими роботи місцевих (локальних) електричних мереж середньої та високої напруги;
3. Більше 25 МВт: Електростанції значної потужності, які можуть впливати на режими роботи місцевих електричних мереж, магістральних електричних мереж, а також помітно впливати на баланси потужності енергосистем.

Загальні вимоги:

Вітрова та фотоелектрична електростанції повинні витримувати відхилення частоти і напруги в точці приєднання при робочих та аварійних умовах експлуатації. При цьому потужність генерації електростанції повинна зменшуватися на мінімально можливу величину.

4. Вимоги до роботи при нормальних та аварійних умовах експлуатації

Нормальне виробництво:

В межах, визначених як «нормальне виробництво» (нормальні умови експлуатації) повинна забезпечуватись можливість безперебійного пуску та генерації електростанції згідно існуючих проектних режимів, які обмежені тільки уставками релейного захисту.

В області «нормального виробництва»:

- Робоча напруга має знаходитись в визначених межах;
- Частота має знаходитись в діапазоні від 49,6 Гц (гранично допустиме зниження частоти) до 50,2 Гц (нормально допустиме підвищення частоти).

Автоматичне підключення:

Може бути виконано не раніше, ніж через три хвилини після того, як напруга буде відновлена до робочої напруги, а частота буде знаходитись в діапазоні від 47,0 до 50,2 Гц.

Вимоги для електростанцій потужністю більше 2 МВт:

Схема видачі потужності повинна бути спроектована таким чином, щоб при нормативних аварійних відключеннях було виключено перевантаження елементів мережі.

Електростанція повинна:

- Витримувати стрибкоподібні зміни фаз до 20° в точці приєднання без відключення чи зниження потужності генерації;
- Після періоду регулювання, відновити нормальну потужність генерації не пізніше ніж через 5 с після того, як режимні параметри повернуться до нормальних.

Вимоги щодо падінь напруги:

ВЕС та СЕС потужністю більше 2 МВт повинні витримувати короткочасне падіння напруги до $20\% U_{ном}$ в точці загального приєднання без відключення чи зниження потужності генерації.

Області роботи під час падінь напруги:

- Область А: Електростанція повинна залишатись підключеною до мережі і підтримувати нормальну генерацію;
- Область В: Електростанція повинна залишатись підключеною до мережі. Електростанція повинна забезпечувати максимальне підтримання рівня напруги шляхом контрольованої генерації реактивної потужності;
- Область С: Дозволено відключення електростанції.

Типи аварійних ситуацій та їх тривалість:

Тип аварії	Тривалість
Трьохфазне коротке замикання	150 мс
Двохфазне коротке замикання	150 мс, нове через 0,5-3 с, також 150 мс
Однофазне коротке замикання	150 мс, нове через 0,5-3 с, також 150 мс

5. Функції обмеження активної потужності ВДЕ

Усі ВЕС та СЕС потужністю 2 МВт і більше повинні мати функцію регулювання активної потужності, що дозволяла б за командами з ЦДП системи

розподілу управляти активною потужністю, з заданим градієнтом обмеження максимальної швидкості її зниження, який, як правило, становить 10% Рн/хв.

Для електростанцій менш 2 МВт:

Повинні бути оснащені автоматичним регулюючим пристроєм, що спрацьовує на зниження активної потужності у разі підвищення частоти до задалегідь заданої уставки. Рекомендується уставка 50,2 Гц або вище за рішенням ЦДП.

Для електростанцій 25 МВт і більше:

Має бути оснащена автоматичною системою регулювання активної потужності, яка б дозволяла дистанційно з ЦДП регулювати активну потужність електростанції.

Функції обмеження генерації:

1. Абсолютне обмеження генерації – обмеження активної потужності електростанцій до наперед визначеного ліміту потужності (уставки) в точці загального приєднання для захисту мережі від перевантажень;
2. Дельта обмеження генерації – резерв активної потужності електростанцій, що створюється для регулювання частоти та задається уставкою у відсотках від можливої генерації електростанцій;
3. Обмеження градієнту потужності – обмеження максимальної швидкості, з якою активна потужність може змінюватися у разі зміни швидкості вітру для ВЕС або інтенсивності сонячного випромінювання для СЕС.

6. Статична та коливальна стійкість енергосистеми

Окрім розрахункових аварійних ситуацій при проектуванні вітрових та фотоелектричних електростанцій необхідно враховувати всі групи нормативних збурень відповідно до СОУ-Н МЕВ 40.1.00100227-68:2012 «Стійкість енергосистеми. Керівні вказівки».

Визначення стійкості:

Стійкість енергосистеми – це здатність повертатися до усталеного режиму після різного роду збурень без переходу до асинхронного режиму, тобто зберегти синхронізм між електростанціями.

Види стійкості:

1. Статична стійкість – здатність енергосистем повертатися до усталеного режиму після малих збурень, за яких зміни параметрів дуже малі проти їх середніх значень;
2. Динамічна стійкість – здатність енергосистем повертатися до усталеного режиму після значних збурень (коротке замикання, відключення будь-якого елемента енергосистеми).

Коливальна стійкість:

Є особливим видом статичної стійкості. Невеликі збурення (флуктуації генерації чи навантаження, перемикання в схемах) кожен мить відбуваються в будь-якій енергосистемі. Коливання роторів генераторів при малих збуреннях повинні бути ефективно демпфовані для того, щоб уникнути розгойдування та втрати коливальної стійкості.

Характерні частоти:

Проведені дослідження показали, що для ОЕС України характерні (домінуючі) частоти коливань знаходяться в межах 0,2-1,2 Гц. Це стосується генераторів, безпосередньо приєднаних до електромережі, в яких електричні коливання в мережі пов'язані з механічними коливаннями роторів.

7. Динамічна стійкість та нормативні збурення

Визначення динамічної стійкості:

Згідно визначенню, динамічна стійкість – це здатність системи повертатися до усталеного режиму роботи після значних збурень, за яких зміни параметрів режиму порівнюють із значеннями цих параметрів.

Нормативні збурення:

Перевірка динамічної стійкості енергосистеми здійснюється для нормативних збурень, до яких відносяться:

- Вимкнення будь-якого елемента мережі або окремих зв'язків контрольованого перетину дією основного захисту внаслідок короткого замикання;
- Одночасне відключення двох повітряних ліній при однофазному короткому замиканні;
- Раптове виникнення аварійного небалансу потужності.

Причини аварійного небалансу:

Згідно з СОУ-Н МЕВ, можуть бути:

- Відокремлення локальної енергосистеми від ОЕС;
- Короткочасне порушення електропостачання через КЗ;
- Вимкнення генератора або блока генераторів;
- Раптова зміна перетоку потужності;
- Вимкнення вузла навантаження.

Вимоги до ВЕС:

Для ВЕС, що не використовують приєднані до мережі синхронні генератори, під поняттям «повертатися до усталеного режиму» слід розуміти здатність роботи без відключення від мережі при значних короткострокових спадах напруги.

Сценарії впровадження:

Можливі два гіпотетичні сценарії:

1. Зростання потужності ВДЕ слідом за зростанням споживання електроенергії (кількість підключених синхронних машин залишиться незмінною);
2. Збільшення потужності ВДЕ відбувається за рахунок заміщення традиційних генераторів (число синхронних машин в мережі зменшиться).

8. Запас статичної стійкості та його оцінка

Коефіцієнт запасу:

Відповідно до СОУ-Н, вплив перепадів потужності на стійкість визначається за таким показником, як коефіцієнт запасу статичної стійкості з активної потужності в перетині:

$$K_p = (P_{GR} - P - \Delta P) / P_{GR},$$

де P_{GR} – активна потужність, яка передається через контрольований перетин, у граничному за статичною стійкістю режимі (МВт); P – перетік потужності в контрольованому перетині в режимі, що розглядається, $P > 0$ (МВт); ΔP – амплітуда нерегулярних коливань активної потужності в контрольованому перетині (МВт).

Нормативні значення:

Відповідно до СОУ-Н Кр має бути не меншим ніж:

- 0,2 в нормальному чи обважненому режимі;
- 0,08 у післяаварійному режимі.

Максимально допустимий перетік:

$$PMD = PGR(1 - K_p) - \Delta P.$$

Визначення ΔP :

Значення ΔP в перетині звичайно визначають за результатами вимірювань (нерегулярні коливання мають період від 2 хв до 60 хв); за відсутності вимірювань розраховують за формулою:

$$\Delta P = K \cdot \sqrt{(P_{H1} \cdot P_{H2})},$$

де P_{H1} , P_{H2} – сумарні потужності навантаження з кожної із сторін перетину (МВт); $K = 1,50$ – за ручного регулювання перетоку потужності в перетині; $K = 0,75$ – за автоматичного регулювання та обмеження перетоку.

9. Характер випадкових коливань потужності в Україні

Аналіз фактичних даних:

Аналіз фактичних змін поточної потужності енергосистеми України показує наявність стійкого добового осередненого рівня споживання, характер якого залежить від пори року (тривалості світлового часу, температурного режиму).

Робота ВЕС також характеризується наявністю деякої середньої потужності PW та стохастичної складової ΔPW .

Допустима стохастична складова:

Враховуючи мінімальні значення коефіцієнта запасу статичної стійкості в нормальному та післяаварійному режимах, отримаємо максимально допустиму величину стохастичної складової:

$$\Delta PW \leq 0,12 \cdot PP \approx 0,15 \cdot PH \text{ (або 15\%)}.$$

Темп змін потужності:

Як показує досвід, зміна потужності ВЕС не може відбуватися миттєво:

- Середній темп змін – 5% на годину (для груп вітростанцій в окремих регіонах);
- Максимальні значення за одну хвилину – 0,5-0,8% номінальної потужності.

Дані для ОЕС України:

Аналіз місячних обсягів даних потужності ОЕС України в цілому, фіксованих з годинним інтервалом, вказує на зміну потужності енергосистеми в межах $\pm 20\%$ середнього значення, а з імовірністю 0,95 – $\pm 16\%$.

Одиничні неконтрольовані стрибки потужності за годину становлять близько 4%, а з імовірністю 0,95 – 3%, або 0,9 та 0,7 ГВт відповідно.

Вплив ВЕС 2 ГВт:

Якщо розглядати енергосистему з інтегрованими ВЕС сумарною потужністю до 2 ГВт, то одиничні стрибки потужності за годину зростуть до 1,0 ГВт (з імовірністю 0,95 – до 0,4 ГВт).

Максимальне зростання неконтрольованої зміни потужності за годину становитиме до 100 МВт (а з імовірністю 0,95 – до 40 МВт) при робочій потужності енергосистеми на рівні 20-30 ГВт, тобто не більше 0,5%.

Групові ВЕС:

Для вітчизняних ВЕС, розташованих уздовж північного узбережжя Азовського та Чорного морів:

- Максимальний стрибок потужності одиничної ВЕС досягає 38% номінальної потужності, з імовірністю 0,95 не перевищує 25%;
- Для групової ВЕС (6 станцій) максимальні стрибки не вищі за 20%, а з імовірністю 0,95 – 10%.

10. Вплив ВЕС на динамічну стійкість енергосистеми

План дослідження:

План проведення дослідження впливу ВЕС на динамічну стійкість передбачає:

- Аналіз динамічної стійкості блоків електростанцій в поточній схемі;
- Аналіз в перспективній схемі, що відповідає часу вводу в експлуатацію ВЕС;
- Аналіз в перспективній схемі з урахуванням ВЕС.

Результати аналізу:

Якщо розглядати зміну мінливості існуючої електроенергетичної системи при приєднанні до неї вітрових потужностей, то зростання максимальних

стрибків потужності (в годинному інтервалі) при приєднанні 2 ГВт потужностей ВЕС становитиме близько 0,3% максимальної потужності енергосистеми.

Показники потужності ОЕС та розподілу фактичних стрибків (ГВт):

Генерація	Макс. потужність	Середня потужність	СКВ стрибків	Макс. 99,9%	Макс. 95%
Червень, лише ОЕС	21,65	18,51	0,333	0,85	0,69
ОЕС+ ВЕС 2 ГВт	22,55	18,85	0,362	0,96	0,73
Лютий, лише ОЕС	31,78	26,44	0,380	0,93	0,76
ОЕС+ ВЕС 2 ГВт	33,14	27,11	0,400	1,03	0,79

Динамічні процеси в системі енергопостачання, спричинені наявністю мінливої відновлюваної енергетики, можуть впливати на рівень запасів статичної стійкості, коливальної та динамічної стійкості:

1. Вплив на коливальну стійкість вважається неістотним через відсутність періодичного збурення на критичних частотах;
2. Вплив на межу статичної стійкості також незначний, але додаткове навантаження перетину певним чином впливає на запас стійкості;
3. Що стосується динамічної стійкості, то усунення загрози аварійного небалансу досягається створенням резерву потужностей та заходами прогнозування.

Правила зниження ризиків:

Потрібно дотримуватись певних правил, що знижують ризики аварійних ситуацій:

- При проектуванні ВЕС попередньо розраховувати показники стійкості в можливих перетинах;
- Уникати високих концентрацій ВЕС на обмеженій території;
- Забезпечувати прогнозування швидкості вітру;

- Узгоджувати уставки спрацьовування ВЕС з операторами мереж.

Майбутнє вітроенергетики:

З часом вітроенергетиці доведеться взяти на себе відповідальність у підтриманні напруги та частоти в енергосистемі у разі широкого впровадження ВЕС. Це технічно можливо, оскільки сучасні вітротурбіни є дійсно програмованими, і вони досить гнучкі щодо швидкого керування генеруванням активної і реактивної потужностей в проектних межах.

Контрольні питання

1. Які основні фактори впливу ВДЕ на надійність та стійкість енергосистеми?
2. Які вимоги висуваються до захисту електричних мереж у точці приєднання ВДЕ?
3. Як класифікуються вітрові та сонячні електростанції за потужністю згідно нормативних вимог?
4. Які функції обмеження активної потужності повинні мати ВЕС та СЕС?
5. У чому полягає різниця між статичною та динамічною стійкістю енергосистеми?
6. Що таке коефіцієнт запасу статичної стійкості і як він розраховується?
7. Які нормативні значення коефіцієнта запасу статичної стійкості встановлені для нормального та післяаварійного режимів?
8. Який темп зміни потужності характерний для ВЕС в Україні?
9. Як впливає географічний розподіл ВЕС на стрибки сумарної потужності?
10. Які заходи необхідні для зниження ризиків аварійних ситуацій при впровадженні ВЕС?

Лекція 18

Тема: «Моделі спільної роботи теплових та вітро-сонячних електростанцій. Вітро-дизельні електростанції»

План

1. Розробка структури систем енергопостачання на основі ВЕС та теплових генераторів
2. Класифікація вітро-дизельних електростанцій (класи 1-3)

3. Призначення електричних машин у вітро-дизельній системі
4. Алгоритм роботи системи керування ВДЕС
5. Визначення рівня проникнення енергії від ВДЕ в систему
6. Досвід експлуатації автономних ВДЕС (Аляска, Австралія)
7. Приклади фото-дизельних електростанцій
8. Комбіновані системи на основі мікро-ГЕС і ВЕУ
9. Системи стабілізації частоти струму
10. Моделювання гібридних систем з акумуляторами

1. Розробка структури систем енергопостачання на основі ВЕС та теплових генераторів

Побудова систем енергопостачання на базі відновлюваних джерел енергії базується на вирішенні сукупності питань задачі «джерело–споживач». В залежності від умов роботи з навантаженням та способу побудови алгоритму керування, дані системи можна поділити на:

Сингулярні системи:

Використовують один вид відновлюваних джерел енергії, де потужність генеруючого обладнання або співмірна, або більше сумарної потужності споживачів (навантаження).

Локальні системи:

До складу таких систем крім генеруючого обладнання на базі ВДЕ входять і генеруючі установки з тепловими двигунами – дизель-, бензо- та газогенераторні установки. При цьому утворюються два незалежні джерела живлення електропостачання, що можуть працювати окремо або паралельно на споживача.

Алгоритм функціонування:

Алгоритм функціонування системи, як сукупність залежностей, що визначає необхідне виконання заданого процесу забезпечення енергією споживача, описується за допомогою орієнтовних графів. Вузлами графа є структурні складові системи, ребра – потоки енергії між вузлами:

- X_1 – потік надходження енергії вітру;

- X_2 – потік надходження традиційного виду енергії (пальне, газ);
- Y_1 – потік потреб енергії від споживача.

Категорії споживачів:

З точки зору періоду часу обслуговування споживача, робота блоків визначається його категорією за надійністю енергопостачання:

- Перша категорія: Час очікування дорівнює тільки часу автоматичного відновлення живлення;
- Друга категорія: Не більше 0,5; 4 та 10 годин в залежності від впливу електроприймача на технологічний процес;
- Третя категорія: Не більше 24 годин.

Принцип роботи:

Система забезпечення споживача від відновлюваних джерел енергії повинна бути упорядкованою – енергоживлення проводиться спочатку від вітроенергетичного блоку і тільки тоді, коли він не здатен виконати вимоги споживача, приєднується резервний блок (з тепловим двигуном).

2. Класифікація вітро-дизельних електростанцій (класи 1-3)

ВДЕС класу 1 (найпростіша):

Склад обладнання:

- Стандартний вітровий агрегат (ВА) з асинхронним генератором (АГ);
- Автоматичне регульоване навантаження (РН);
- Стандартна дизель-електрична установка (ДЕУ).

Принцип роботи:

Вітровий агрегат працює з постійним включенням на збірні шини споживача. Автоматичне регульоване навантаження запобігає перевантаженню ВА при високих швидкостях вітру за рахунок зниження частоти обертання. ДЕУ працює постійно, забезпечує реактивною енергією асинхронний генератор.

Переваги та недоліки:

Повна (100%) частка участі у графіку навантаження вітроагрегату вважається допустимою. Економія палива буде визначатися ступенем зниження споживання палива при частковому завантаженні дизельного двигуна. Економія

палива невелика, але система гранично проста і прийнятна, коли фактор максимуму надійності більш важливий, ніж максимум економії палива.

ВДЕС класу 2:

Особливості конструкції:

В конструкцію ДЕС внесені зміни – між дизельним двигуном (ДД) і синхронним генератором (СГ) встановлені сполучна муфта (СМ) і невеликий інерційний акумулятор (ІА).

Принцип роботи:

Коли вітер сильний і ВА один здатний забезпечити необхідну споживачем потужність, ДЕУ припиняє роботу і муфта СМ від'єднує інерційний акумулятор ІА з генератором СГ від дизельного двигуна ДД. Генератор СГ продовжує обертання, забезпечуючи АГ реактивною енергією.

Роль інерційного акумулятора:

При перевищенні потужності ВА потреб споживачів, автоматично включається регульоване навантаження РН. Інерційний акумулятор ІА забезпечує згладжування коливань частоти струму і прискорює процес запуску ДД при спадах швидкості вітру. Інерційний акумулятор може забезпечити розрахункову потужність тільки протягом 1-2 секунд під час запуску ДД.

ВДЕС класу 3 (найефективніша):

Відмінності від класу 2:

Введення до складу ВДУ акумулятора енергії АЕ, яким може служити акумуляторна батарея, гідравлічний акумулятор та інші джерела енергії.

Ємність акумулятора:

Може бути різною: в одних випадках розраховується на забезпечення працездатності ВДУ при перервах енергопостачання протягом декількох хвилин, в інших – на 2-3 години. В останньому випадку ДЕС не працює тривалий період часу без шкоди для споживачів.

Ефективність:

Економія палива при використанні ВДУ класу 3 у районах із сприятливими умовами досягає високого рівня. Можлива частка енергії, яку може забезпечити

вітроагрегат при сприятливих вітрових умовах досягає 50%. До цього рівня наближається і економія дизельного палива.

Вимоги до експлуатації:

Система контролю і управління роботою комплексу повинна бути комп'ютерною. Експлуатація ВДУ вимагає наявності штату кваліфікованих фахівців, які зможуть проводити її налагодження та технічне обслуговування.

Демпфуюче навантаження:

Коли електрична енергія від ВЕУ більша за навантаження споживача, необхідно забезпечити демпфування надлишкової потужності. При можливості зайва потужність направляється на деяке вторинне використання типу обігрівачів приміщень або в систему гарячого водопостачання.

3. Призначення електричних машин у вітро-дизельній системі

Найчастіше вітродизельна система складається з таких компонентів:

- Одна або декілька вітроустановок;
- Одна або декілька дизельних установок;
- Навантаження споживача;
- Додаткове кероване або демпфуюче навантаження;
- Система акумуляування енергії;
- Блок управління (включаючи управління навантаженням).

Дизельні генератори:

ВДЕС повинна бути обладнана декількома дизельними генераторами різних потужностей. Вони є основними електричними машинами, які забезпечують безперервну подачу електроенергії споживачам.

Номінальна потужність:

Найбільшого дизеля визначається піком навантаження від споживача. Сума номінальних потужностей решти дизель-генераторів повинна бути на рівні номінальної потужності найбільшого дизеля. Цим досягається ефективне використання дизельних двигунів та резервування.

Мінімальне навантаження:

Ліміт мінімального навантаження дизелів діє як бар'єр, що обмежує збільшення використання вітрової енергії. Щоб досягти більш високий рівень

проникнення вітру, необхідно впровадити дизельні двигуни, які можуть працювати при дуже низькому навантаженні, як правило нижче 10% від номінальної потужності.

Вітрові електричні установки:

ВЕУ відносяться до основного енергетичного устаткування електростанції. ВЕУ в ВДЕС являють собою стандартні електричні установки, призначені для видачі електричної енергії в мережу.

Приклад ВЕУ:

ВЕУ моделі NW100/19 (компанія Northern, США) спеціально розроблена для роботи в екстремальних умовах, включаючи холодний клімат. Відрізняється:

- Відсутністю трансмісії;
- Постійним кроком лопатей;
- Мінімальною кількістю рухомих частин;
- Простою конструкцією ротора;
- Відсутністю гідравлічних вузлів.

Показники надійності:

Готовність ВЕУ 0,92, середнє значення коефіцієнта використання встановленої потужності 0,26.

Пристрій компенсації та фільтрації:

Призначений для обмеження спотворень форми напруги в мережі, які викликаються роботою інвертора, і для компенсації реактивної потужності споживачів і інверторів. Пристрій повинен мати 5-8 ступенів компенсації, сумарною потужністю близько 800 квар.

Акумуляторна батарея та інвертор:

Є джерелом стабілізації параметрів електроенергії. Використовуються, коли потрібно забезпечити якість електроенергії при наявності різких коливань потужності навантаження. Забезпечують компенсацію коливального характеру навантаження і енергії від ВЕУ.

Баластне навантаження:

Включається в роботу, коли потужність ВЕУ перевищує навантаження споживача, а регулятор частоти не в змозі підтримувати її в необхідних межах.

Звичайно використовуються потужні резистори, які підключаються ступенями за допомогою програмно-керованого інвертора. Кількість ступенів – 12, номінальна потужність дорівнює сумі максимальних потужностей ВЕУ.

Вторинне навантаження:

При виконанні розрахунків приймається понижуючий коефіцієнт 0,85. Це означає, що тільки 85% виробленої електростанцією енергії може використовуватися первинними споживачами, решта 15% енергії можуть бути використані вторинними споживачами (системи обігріву, теплового водопостачання).

4. Алгоритм роботи системи керування ВДЕС

У штатному режимі роботи електростанції здійснюється оптимізація розподілу функцій з генерування електроенергії між окремими електричними машинами станції шляхом управління ними від автоматичної системи керування.

П'ять основних режимів роботи:

Режим 1 – «Тільки дизелі»:

Коли вітер відсутній, система включає в роботу дизельні генератори певної номінальної потужності. Вибір потужності дизелів здійснюється в залежності від навантаження. За рахунок цього досягається робота дизельних двигунів в режимі з високим ККД.

Режим 2 – «ВЕУ і дизелі»:

При наявності вітру, достатнього для роботи ВЕУ, з метою максимального використання енергії від ВЕУ знижується потужність дизельних генераторів. Вибирається оптимальний по потужності дизельний генератор або їх комбінація.

Режим 3 – «ВЕУ і тільки малий дизель»:

Якщо швидкість вітру зростає до такого ступеня, що ВЕУ можуть самостійно задовольняти вимоги по навантаженню, система встановить один дизельний генератор на мінімальний рівень потужності і забезпечить поглинання надлишкової вітрової електроенергії баластним або тепловим навантаженням.

Режим 4 – «ВЕУ і батарея»:

При достатній швидкості вітру включення в роботу накопичувача на базі акумуляторної батареї повністю відключає дизельні генератори.

Режим 5 – «Тільки ВЕУ»:

Коли електроенергія, що виробляється ВЕУ, достатня для надійного забезпечення споживачів, система керування відключить всі інші джерела енергії і підключить баластне або теплове навантаження для поглинання надлишкової кількості енергії від ВЕУ.

Переваги збалансованої ВДЕС:

Забезпечує скорочення споживання дизельного палива до 60-80%, збільшуючи життєвий цикл дизельних двигунів в 2-3 рази, залежно від реальних швидкостей вітру і величини попиту на енергію від споживачів. Перехід з одного режиму в інший відбувається без переривання подачі електроенергії або зміни її якості.

5. Визначення рівня проникнення енергії від ВДЕ в систему

Майже у всіх випадках вимоги до ефективності роботи системи керування зростають із збільшенням обсягу енергії, яка виробляється ВЕУ. Рівень проникнення енергії від ВДЕ в систему є питомою величиною кількості енергії, яка виробляється ВЕУ в загальному обсязі споживання.

Класифікація NREL:

Національна лабораторія США (National Renewable Energy Laboratory – NREL) запропонувала класифікацію проникнення вітрової енергії:

Миттєве проникнення:

Частка від ділення величини потужності ВЕУ на величину загального електричного навантаження системи від споживачів (кВт).

Усереднене проникнення:

Частка від ділення величини енергії, яка вироблена ВЕУ, на загальне споживання енергії (кВт/год) від навантаження системи. Показники розраховуються протягом певного періоду часу, як правило, місяця або року.

Класи проникнення:

Клас	Пікове миттєве	Усереднене річне
Низький	<50%	<20%
Середній	50-100%	20-50%

Високий	100-400%	50-150%
---------	----------	---------

Значення показників:

Фактор миттєвого проникнення дозволяє визначити складність системи живлення і необхідний рівень керування. Фактор усередненого проникнення дозволяє надати оцінку економії палива та потреб в обсягах зберігання палива, основних експлуатаційних характеристик системи і потенційної довгострокової фінансової дії.

6. Досвід експлуатації автономних ВДЕС

Коцебу (Kotzebue), Аляска:

Характеристики:

- Населення: 3332 жителів (2012);
- Середнє навантаження: близько 2,5 МВт;
- Мінімум: 700 кВт;
- Встановлена потужність дизельної частини: 11 МВт.

ВЕС потужністю 0,915 МВт:

- 15 ВЕУ АОС 15/50 і Entegriy EW15 (50 кВт);
- Одна ВЕУ Vestas V17 (65 кВт);
- Одна ВЕУ Northwind 100/19 (100 кВт).

Результати:

За рік було вироблено 668000 кВт·год електроенергії, що дозволило отримати економію приблизно 172 тис. літрів дизельного палива. Готовність системи близько 92%.

Затока Токсук (Toksook Bay), Аляска:

Характеристики:

- Населення: близько 1160 чоловік;
- Середнє навантаження: трохи менше 370 кВт;
- Три ВЕУ Northwind 100/19 (по 100 кВт).

Результати:

Готовність ВЕУ 92,4%. Середнє значення коефіцієнту використання встановленої потужності 0,26. Середнє проникнення енергії ВДЕ більше 24,2%, із значенням середньомісячних проникнень більше 30% під час сильних вітрів у

зимові місяці. За рік ВЕС вироблено майже 700 МВт·год, економія 185 тис. літрів дизельного палива.

Острів Святого Павла (St. Paul Island), Аляска:

Високе проникнення ВДЕ:

Основні компоненти:

- Одна ВЕУ Vestas V27 (225 кВт);
- Два дизельних генератори Volvo (по 150 кВт);
- Синхронний компенсатор;
- Термічно ізольований бак для гарячої води (27000 літрів);
- Система керування на основі мікропроцесора.

Принцип роботи:

Конструкція системи передбачає зупинку усіх дизельних двигунів, якщо достатньо енергії від вітру. Система керування підтримує баланс між потужністю ВЕУ і загальним споживанням, скидаючи надлишкову енергію через теплові обігрівачі в резервуар для води.

Результати:

Середнє проникнення енергії майже 55%. З січня 2005 року енергія вітру надала економію приблизно 570 тис. літрів дизельного палива. ВЕУ у 2004 році працювала з готовністю 100%, коефіцієнт використання потужності більше ніж 0,4.

Затока Корал (Coral Bay), Австралія:

Характеристики:

- 140 постійних жителів;
- Три ВЕУ Vergnet GEV MP потужністю 275 кВт з підйомно-поворотними вежами;
- Сім дизельних генераторів Detroit Series 60 (по 320 кВт) типу LLD;
- Технологія стабілізації мережі PowerStore™ 500 кВт (АБВ).

Особливості:

Дизельні двигуни можуть працювати при навантаженні 10% від номінальної потужності, що дозволяє отримати високу частку проникнення енергії вітру. ВДЕС забезпечує енергією до 95% потреб міста.

7. Приклади фото-дизельних електростанцій

ФДЕС (Греція, Афон):

Склад обладнання:

- Два дизель-генератори по 180 KVA (144 кВт);
- Три ФЕС – 17, 66 та 100 кВт;
- Три акумуляторні батареї (свинцеві) – 3222Ah/48V (154,6 кВт·год), 3000Ah/48V (144 кВт·год), 300Ah/12V (3,6 кВт·год).

Критерії проектування:

Головним критерієм при визначенні основних характеристик системи розглядалося задоволення нічних навантажень і мінімізація невикористаної електричної енергії від ФЕС в поєднанні зі зменшенням використання дизельних генераторів.

Параметри роботи:

Сумарне середньодобове навантаження прийнято 1410 кВт·год. Навантаження забезпечується в першу чергу за рахунок фотоелектричних станцій. Ефективність при навантаженні 94%, при розвантаженні також 94%. Глибина розряду акумуляторних батарей 40% від номінальної ємності. Максимальний заряд акумуляторних батарей – 90% номінальної ємності.

8. Комбіновані системи на основі мікро-ГЕС і ВЕУ

Гідроенергетичний потенціал малих рік України складає близько **12,5 млрд. кВт·год**. Цей потенціал може бути використано при створенні автономних систем електрозабезпечення окремих об'єктів і для розподіленої генерації. Комбіноване використання мікро-ГЕС чи міні-ГЕС і вітрових електроустановок дозволяє більш повно використати наявні відновлювані ресурси.

9. Системи стабілізації частоти струму

Важливим елементом мікро-ГЕС є система стабілізації частоти струму. Виділяють наступні основні класи систем стабілізації:

1. Системи зі стабілізацією частоти обертання гідротурбіни шляхом впливу на елементи гідротехнічного обладнання;
2. Системи, в яких між турбіною і генератором встановлюються приводи постійної частоти обертання;

3. Системи зі стабілізацією частоти вихідної напруги генераторами, що здатні за змінної частоти обертання генерувати напругу стабільної частоти;
4. Системи зі статичними перетворювачами частоти;
5. Системи з регулюванням гальмівного моменту генератора додатковим (баластним) навантаженням.

Комбіновані системи:

Ефективна стабілізація частоти досягається комбінуванням першої і п'ятої з зазначених систем.

Вибір типу генератора:

При включенні асинхронного генератора (АГ) ВЕУ на паралельну роботу з синхронним генератором (СГ), що обертається гідротурбіною, останній буде забезпечувати реактивною потужністю АГ і стабілізувати напругу в системі.

Конфігурації:

- «СГ з приводом від ГТ – АГ з приводом від ВТ»: Висока перевантажувальна здатність та простота електричної частини ВЕУ;
- «АГ з приводом від ГТ – АГ з приводом від ВТ»: Відсутність ковзних контактів в АГ та більша надійність в аварійних ситуаціях.

Регулювання частоти:

Задача регулювання частоти струму в гідро-вітрових електростанціях (ГВЕС), як правило, на ВЕУ не покладається, за виключенням нетривалих періодів часу (в межах декількох секунд). Натомість ВЕУ працюють переважно в так званому МРРТ режимі (максимальний аеродинамічний ККД турбіни).

Приклад ГВЕС:

Гідро-вітро-дизельна автономна система острова Ель Іерро (Іспанія) номінальної потужності 35,9 МВт, з яких:

- 13 МВт – ДГ;
- 11,32 МВт – 4 гідрогенератори;
- 11,48 МВт – 5 ВЕУ змінної частоти обертання;
- Решта – сонячні батареї.

Мінімізація витрат:

Вартість електроенергії, що виробляється ДГ, є суттєвою (від 9 грн за кВт·год), що спонукає мінімізувати їх частку. В умовах обмеженості гідроресурсів це може бути досягнуто акумулюванням гідроенергії в непікові часи, збільшенням кількості ГТ і ВЕУ, підвищенням енергоефективності їх роботи.

10. Моделювання гібридних систем з акумуляторами

Використовуючи генератор випадкових чисел, можна моделювати процеси генерації та споживання, формуючи добові реалізації.

Основні параметри моделювання:

- SOC (State of Charge) – стан зарядки акумулятора;
- Gen – резервний генератор;
- Energy – накопичення енергії.

Блок-схема розрахунку:

Моделювання включає формування енергобалансу з резервним генератором та розрахунок гібридної системи з акумулятором. Це дозволяє оцінити ефективність різних конфігурацій системи та оптимізувати її роботу.

Контрольні питання

1. Які типи систем енергопостачання на базі ВДЕ та теплових генераторів виділяють за способом організації?
2. У чому полягають основні відмінності між ВДЕС класів 1, 2 та 3?
3. Які функції виконує інерційний акумулятор у ВДЕС класу 2?
4. Які п'ять основних режимів роботи має ВДЕС та в чому їх особливості?
5. Що таке миттєве та усереднене проникнення енергії від ВДЕ в систему?
6. Яка класифікація класів проникнення вітрової енергії запропонована NREL?
7. Які результати економії палива досягнуто на ВДЕС Коцебу та Токсук (Аляска)?
8. Які основні класи систем стабілізації частоти струму існують для мікро-ГЕС?

9. Які переваги має конфігурація «СГ з приводом від ГТ – АГ з приводом від ВТ» в гібридних системах?
10. Яка номінальна потужність гідро-вітро-дизельної системи острова Ель Ієрро (Іспанія)?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Renewables 2024 global status report. *REN21 - Building the sustainable energy future with renewable energy*. URL: <https://www.ren21.net/gsr-2024/>.
2. World energy outlook 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>.
3. Renewable power generation costs in 2023. *403 Forbidden*. URL: <https://www.irena.org/publications/2024/Sep/Renewable-power-generation-costs-in-2023>.
4. GWEC's global wind report 2026. *Homepage*. URL: <https://www.gwec.net/reports/globalwindreport> (date of access: 07.05.2026).
5. Snapshot 2024 - IEA-PVPS. *IEA-PVPS*. URL: <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2024/>.
6. Sadovoy O., Koshkin D., Martynenko V., Sokolik V. Electricity generation from biogas: Modern technologies and prospects for Ukraine's energy independence. *Machinery and Energetics*. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 173–185. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.173>
7. Renewable energy opportunities in Ukraine in the context of blackouts / E. Shahini et al. *International journal of environmental studies*. 2024. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2320021>.
8. Rebuilding Ukraine's energy supply in a secure, economic, and decarbonised way / T. Tröndle et al. *Environmental research: infrastructure and sustainability*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad6738>.
9. Why renewables should be at the center of rebuilding the Ukrainian electricity system / I. Doronina et al. *Joule*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.08.014>.
10. Calculation of optimal geometric parameters electrical apparatus for controlling the irrigation system / O. Sadovoy et al. *IEEE 5th international conference on modern electrical and energy system (MEES)*. 2023. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402456>.

11. Obtaining electricity through the use of biogas, investments and perspectives / V. Hruban et al. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 27–30 September 2023. IEEE, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402480>
12. Prospects of biogas for high-temperature heat-technological complexes in glass industry / O. Koshelnik et al. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 27–30 September 2023. IEEE, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402452>
13. Відновлювані джерела енергії в електричних мережах : лабораторний практикум / В. В. Кулик та ін. Вінниця : ВНТУ, 2021. 117 с.
14. The promotion of renewable energy technologies in the former Soviet bloc: why, how, and with what prospects? / M. Karatayev et al. *Energy reports*. 2021. Vol. 7. P. 6983–6994. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.10.068>
15. The technical state of engineering systems as an important factor of heat supply organizations management in modern conditions / N. Verstina et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 3. P. 1015. URL: <https://doi.org/10.3390/en15031015>
16. Ahmadi Z., Zabetian Targhi M. Thermal performance investigation of a premixed surface flame burner used in the domestic heating boilers. *Energy*. 2021. Vol. 236. P. 121481. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121481>
17. IRENA – international renewable energy agency. *IRENA – International Renewable Energy Agency*. URL: <https://www.irena.org/>.
18. Відновлювана енергетика та енергоефективність у ххі столітті / ред.: С. О. Кудря та ін. Київ : ТОВ «НВП «ІНТЕРСЕРВІС», 2021. 1104 с.
19. Риндюк Д. В., Шелешей Т. В., Беднарська І. С. Нетрадиційні джерела енергії. Практичні заняття : навч. посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 81 с.
20. Сиротюк С. В., Боярчук В. М., Гальчак В. П. Альтернативні джерела енергії. Енергія вітру : навч. посіб. / Львів : Магнолія 2006, 2025. 182 с.
21. СОУ НЕК 341.001:2019. Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з ОЕС України. [Чинний від 2020-01-01]. Київ : НЕК «Укренерго», 2019. 68 с.

Навчальне видання

АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ
Конспект лекцій

Укладачі:

Садовий Олексій Степанович

Мартиненко Володимир Олександрович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 12,37.

Тираж 20 прим. Зам. № _____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.