

020.9(073.8)
088

Сегеда М.С., Олійник М.Й., Дудурич О.Б.



НЕТРАДИЦІЙНІ ТА ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ



620.9/075.8
С28

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

М. С. Сегеда, М. Й. Олійник, О. Б. Дудурич

НЕТРАДИЦІЙНІ ТА ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Навчальний посібник

*Рекомендувала Науково-методична рада
Національного університету “Львівська політехніка”*



620.9(075.8) С28 2019

Сегеда М.С. Нетрадиційні та відновлювальні дж

Львів
Видавництво Львівської політехніки
2019

Рецензенти:

Лежнюк П. Д., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету;

Варецький Ю. О., доктор технічних наук, професор кафедри електроенергетики та систем управління Національного університету “Львівська політехніка”;

Денисюк С. Л., доктор технічних наук, професор, директор Інституту енергозбереження НТУ України “КПІ” імені Ігоря Сікорського

*Рекомендувала Науково-методична рада
Національного університету “Львівська політехніка”
як навчальний посібник для студентів спеціальності
141 “Енергетика, електротехніка та електромеханіка”
(протокол № 42 від 23.05.2019 р.)*

Сегеда М. С.

484842

С 283

Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії:
навч. посібник / М. С. Сегеда, М. Й. Олійник, О. Б. Дудурич. –
Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 204 с.

ISBN 978-966-941-404-5

У навчальному посібнику розглянуто теоретичні засади та основні способи раціонального перетворення та використання відновлюваної енергії, отриманої із нетрадиційних джерел, для генерування електроенергії. Висвітлено економічні та екологічні аспекти використання відновлюваних джерел енергії на сучасному етапі. Зміст навчального посібника відповідає робочій програмі навчальної дисципліни “Нетрадиційні та відновлювальні джерела електроенергії” для студентів спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” усіх форм навчання.

Посібник може бути корисним для викладачів, слухачів магістерських програм і студентів інших технічних спеціальностей, що вивчають навчальні дисципліни: “Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії”, “Енергоощадність” тощо та для широкого кола читачів.

УДК 620.92:[621.311.212+621.311.243]/245



© Сегеда М. С., Олійник М. Й.,
Дудурич О. Б., 2019
© Національний університет
“Львівська політехніка”, 2019

ЗМІСТ

Вступ	6
Умовні скорочення	8
Розділ 1. Енерговикористання у світовій економіці	9
1.1. Використання традиційних і нетрадиційних енергоносіїв у світовій економіці	9
1.2. Класифікація нетрадиційних джерел енергії	14
1.3. Відновлювані джерела енергії	16
1.4. Потенціал нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в Україні	19
Контрольні запитання	24
Розділ 2. Традиційні та нетрадиційні джерела енергії для генерування тепла та електроенергії	25
2.1. Традиційні енергоносії для генерування тепла й електроенергії	25
2.2. Технології використання палив для генерування електроенергії	28
2.3. Паливні біоенергетичні ресурси для генерування тепла й електроенергії	31
2.3.1. <i>Загальні відомості про біоенергетичні ресурси</i>	31
2.3.2. <i>Способи перероблення біомаси</i>	38
2.4. Використання біогазу в енергетиці	40
2.5. Переваги та недоліки біоенергетики	43
2.6. Тверді побутові відходи як енергетичний ресурс	44
2.6.1. <i>Спалювання підготовлених горючих ТПВ у котлах і печах для генерування теплової та електричної енергії</i>	46
2.6.2. <i>Газифікація (піроліз</i>	47
2.6.3. <i>Збирання звалищного газу</i>	48
2.7. Негативний вплив традиційної тепло- й електроенергетики на довкілля	52
Контрольні запитання	54
Розділ 3. Традиційна та нетрадиційна гідроенергетика	55
3.1. Використання гідроресурсів в Україні та у світі	55
3.2. Класифікація та типи гідроелектростанцій	59

3.3. Типи турбін гідроелектростанцій	64
3.4. Малопотужна гідроенергетика	68
3.4.1. Мікрогідроелектростанції	69
3.4.2. Мінігідроелектростанції	70
3.5. Гідроенергія хвиль та припливів–відпливів	72
3.5.1. Використання енергії хвиль	72
3.5.2. Використання енергії морських течій.....	73
3.5.3. Використання енергії припливів.....	75
3.6. Генератори електричної енергії на гідроелектростанціях.....	77
3.7. Вплив ГЕС на довкілля.....	79
Контрольні запитання	80
Розділ 4. Використання сонячної енергії.....	81
4.1. Загальні положення	81
4.2. Пряме перетворення енергії сонячного випромінювання на електроенергію	86
4.3. Розрахунок інтенсивності сонячного випромінювання.....	94
4.4. Типи сонячних панелей та їх ефективність	97
4.5. Термодинамічні СЕС.....	102
4.6. Переваги та недоліки сонячної електроенергетики	110
4.7. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні.....	111
Контрольні запитання	114
Розділ 5. Вітроенергетика	115
5.1. Енергетичні характеристики вітру	115
5.2. Перетворення енергії вітру вітротурбінами	122
5.3. Виробництво електроенергії вітроенергетичними установками.....	127
5.3.1. Фізичні процеси перетворення енергії вітру	127
5.3.2. Регулювання потужності вітроенергетичних установок	131
5.3.3. Особливості роботи генераторів ВЕУ.....	135
5.4. Розрахунок параметрів ВЕУ	145
5.5. Переваги та недоліки використання вітроенергетики	147
Висновки	149
Контрольні запитання	149
Розділ 6. Інші види неградиційних енергоресурсів	151
6.1. Воднева енергетика	151

6.2. Використання метану із вугільних шахт	154
6.3. Використання метану зі сміттєзвалищ	155
6.4. Використання геотермальної енергії	158
6.5. Переваги та недоліки відновлюваних джерел енергії	162
Контрольні запитання	164
Розділ 7. Особливості експлуатації відновлюваних джерел в електричних мережах	165
7.1. Умови приєднання ВДЕ в енергосистемі	165
7.2. Вплив ВДЕ на показники якості електроенергії	169
7.3. Вплив місця приєднання ВДЕ на втрати енергії в ЕЕС	171
7.4. Можливості регулювання потужності та частоти вітровими електростанціями	175
7.5. Вплив інерції рухомих мас генераторів на швидкість зміни частоти	178
Контрольні запитання	181
Розділ 8. Проблема взаємодії енергетики та екології	182
8.1. Екологічні наслідки розвитку сонячної енергетики	182
8.2. Вплив вітроенергетики на природне середовище	184
8.3. Можливі екологічні прояви геотермальної енергетики	187
8.4. Екологічні наслідки використання енергії океану	189
8.5. Екологічна характеристика використання біоенергетичних установок	191
Контрольні запитання	193
Словник термінів (глосарій)	194
Список літератури	200

ВСТУП

Сучасний стан світової економіки потребує нарощування виробництва та використання енергоресурсів для забезпечення потреб усіх галузей господарства, які зростають. Тривалий час потребу в енергоресурсах задовольняли використанням органічних палив, запаси яких прогнозовано вичерпуються. Вкрай нерівномірне розташування енергоресурсів на планеті спричиняє підвищення їхньої вартості, а також вносить напруженість у міждержавні стосунки. Світова енергетична криза 70-х років минулого століття змусила переглянути в останні десятиліття напрям розвитку економіки і спонукала до переходу від політики інтенсивного використання енергоресурсів до політики енергоощадності та заміщення традиційних ресурсів іншими, дешевшими доступними ресурсами, які періодично відновлюються у природі.

Загострення питання про доцільність використання традиційних органічних палив (вугілля, нафти, природного газу) спричинене також зростанням тривоги за стан довкілля. Викиди забруднювальних речовин традиційних енергетичних об'єктів (на думку багатьох фахівців) призвели до посилення глобального потепління, що загрожує глобальними катастрофами. Саміт світових лідерів у Парижі у грудні 2015 р. ухвалив доленосне рішення стосовно використання органічних палив. “Це (прийняте рішення) знаменує кінець епохи викопного палива”, – заявила один із лідерів Міжнародної кліматичної організації 350.org.

Потреби в енергоресурсах повинні задовольнити нетрадиційні та відновлювані джерела енергії, зокрема, енергія сонячного випромінювання, енергія вітру та рухомих мас води, енергія біомаси, геотермальна енергія, тепло повітря, води Світового океану та інших водойм. Основна перевага названих джерел енергії – невичерпність, періодичне поновлення протягом незначного відрізка часу, екологічна чистота.

У цьому навчальному посібнику розглянуто питання використання енергії відновлюваних джерел для перетворення на тепло та на електричну енергію, висвітлено практичні методи використання енергії цих джерел, теоретичні засади розрахунку обсягів енергоресурсів та можливі перспективні способи перетворення енергії.

Посібник призначений для студентів вищих закладів освіти, що спеціалізуються в енергетичній сфері, його також можуть використовувати у практичній діяльності інженерно-технічні працівники.

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

АГ	– асинхронний генератор
АЕС	– атомна електрична станція
ВВЕР	– водо-водяний енергетичний реактор
ВДЕ	– відновлюване джерело енергії
ВЕС	– вітрова електрична станція
ВЕУ	– вітроенергетична установка
ГАЕС	– гідроакумулювальна електрична станція
ГЕС	– гідроелектростанція
ЕЕ	– електрична енергія
ЕНС	– енергетична система (енергосистема)
ЕНУ	– енергетична установка
ЕМ	– електрична мережа
КЕС	– конденсаційна електрична станція
ККД	– коефіцієнт корисної дії
НДЕ	– нетрадиційне джерело енергії
НС	– навколишнє середовище
ОР	– органічні речовини
ПЕ	– перетворювач енергії
РГ	– розподілена генерація
РЕМ	– розподільні електричні мережі
СВ	– сонячне випромінювання
СГ	– синхронний генератор
СДЕ	– скінченне джерело енергії
СЕС	– сонячна електрична станція
СП	– споживач енергії
ТВЕЛ	– тепловидільний елемент (на атомній станції)
ТЕС	– теплова електрична станція
ТЕЦ	– теплоелектроцентраль
ТКЕС	– теплова конденсаційна електростанція
ТПВ	– тверді побутові відходи
ФЕС	– фотоелектрична станція
ЯЕ	– якість електричної енергії

Розділ 1

ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯ У СВІТОВІЙ ЕКОНОМІЦІ

1.1. Використання традиційних і нетрадиційних енергоносіїв у світовій економіці

Основою для розвитку народного господарства сьогодні є енергетика, яка забезпечує енергією технологічні процеси в промисловості, сільському господарстві, комунальному господарстві та дає тепло і світло людям. До енергетики належать паливна промисловість та електроенергетика з їх підприємствами, комунікаціями, системами управління, науково-дослідною базою.

Енергетичну галузь оцінюють за рівнем забезпечення країни енергоносіями, енергоспоживанням в окремих регіонах, паливно-енергетичним балансом країни і світу загалом. Для енергозабезпечення господарства використовують традиційні й нетрадиційні джерела енергії (рис. 1.1).

Традиційними називають джерела енергії, використання яких уже стало звичним. Це може бути перетворена енергія відновлюваних чи невідновлюваних природних ресурсів, але об'єднує їх те, що процеси і технології усталені, а промислове виробництво налагоджене. Тривалий час для виробничих потреб використовували енергію мускульної сили, деревину як джерело тепла і в обмеженому обсязі енергію Сонця, вітру, рухомої води тощо. Тепер традиційними енергоносіями стали вуглеводні та їх сполуки (нафта, газ, вугілля), а також ядерне паливо.

На відміну від традиційних сьогодні набувають поширення *альтернативні, нетрадиційні* джерела енергії, особливістю яких є те, що вони відновлювані й порівняно безпечні для довкілля. У них використовують технології, які обмежують шкідливий вплив підприємств енергетичної галузі на довкілля, а також джерела енергії, які доступні, неперервно чи періодично відновлюються: енергію

Сонця, вітру, потоку води, біомаси, припливів, хвиль, геотермальну енергію Землі, водень як паливо, енергію термоядерного синтезу тощо.

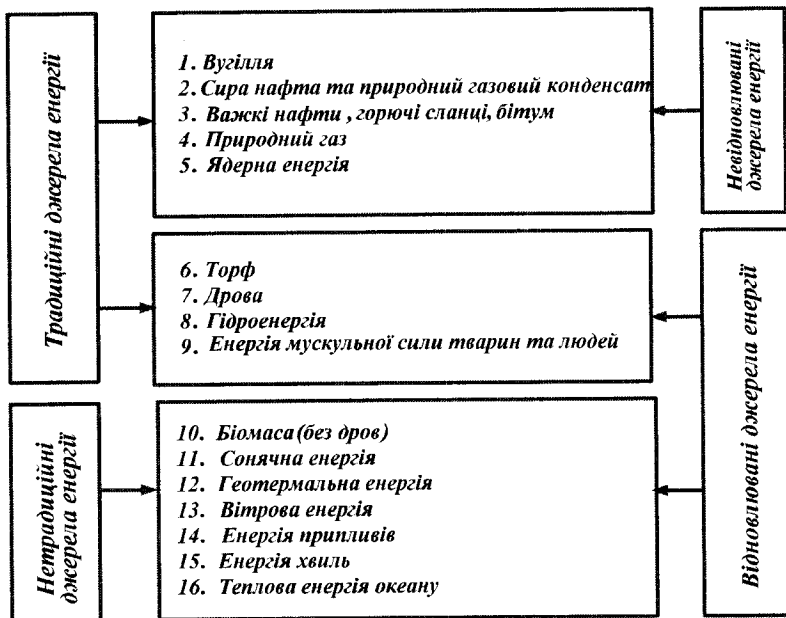


Рис. 1.1. Класифікація джерел енергії за даними Всесвітньої ради з енергетики

Українська електроенергетика стикається із такими самими проблемами, що і європейська, – енергозалежність, вплив на довкілля, безпека експлуатації, економіка. Існує також вітчизняна специфіка, зокрема:

– недостатні запаси газу, що нерідко спричиняє кризові ситуації з поставками цього енергоносія. Єдиний вид органічного палива, якого у нас достатньо, – це вугілля. Але у вугілля наших родовищ висока зольність і низька теплотворна здатність. Внаслідок цього доводиться застосовувати спеціальні капіталомісткі технології його спалювання, щоб зменшити

емісію шкідливих речовин. Це спричиняє збільшення собівартості електроенергії ТЕС;

– на більшості теплових електростанцій фізичне і моральне зношення обладнання сягає майже ста відсотків. Для заміни обладнання ТЕС потрібно багато коштів. Недержавні інвестори не ризикують вкладати кошти в генерацію електроенергії через сумніви щодо стабільності поставок енергоносіїв і економічної ефективності відповідних проєктів;

– промислова галузь потребує великої кількості електроенергії;

– висока частка ТЕС у структурі генерування електроенергії (більш ніж 40 %) спричиняє емісію в атмосферу значної кількості речовин, шкідливих для здоров'я людей і для довкілля. Енергетика України серед світових “лідерів” із обсягів викидів парникових газів у розрахунку на одиницю вартості валового внутрішнього продукту;

– Чорнобильська катастрофа сформувала негативну громадську думку щодо будівництва АЕС, яка стала (і завжди буде) перешкодою для розвитку атомної енергетики. Відсутній замкнений технологічний цикл забезпечення атомної електроенергетики – немає ні заводів із виробництва паливних елементів, ні заводів із дезактивації радіоактивних відходів. Не створено також ліквідаційного фонду, призначеного для акумулювання коштів на ліквідацію АЕС після закінчення нормативного терміну служби (витрати на ліквідацію АЕС доволі великі й сягають 20 % від вартості спорудження АЕС).

Названі проблеми привертають увагу до використання енергоресурсів малої вартості та із мінімальним впливом на довкілля.

До країн, які використовують найбільші обсяги енергії, належать: США – 25 % світового обсягу енергоспоживання, Росія – близько 10 %, Китай – 9 %, Японія – 5,5 %, ФРН – 7,3 %. Енергоспоживання України (близько 3 %) співмірне із показниками Великої Британії, Франції, Канади та Індії.

Найбільші темпи енерговикористання в світі спостерігалися у другій половині ХХ ст. Енергетика розвивалася випереджувальними темпами, енергомiсткість виробництва (тобто затрати палива та електроенергії на одиницю продукції) на перших етапах науково-технічної революції (НТР) була високою. На межі 80–90-х років темпи приросту енергоспоживання знизилися – світ розпочав упроваджувати енергоощадні технології, тобто технології, які потребують менше затрат енергії на виробництво такої самої кількості продукції.

Протягом ХХ ст. істотно змінилася структура паливно-енергетичного балансу світового господарства. Якщо в першій половині ХХ ст. в енергобалансі світового господарства як енергоносії переважало вугілля, однак ще широко використовували дрова, то в останні десятиліття провідне місце зайняли нафта і газ, а також ядерна енергетика. На їх частку припадало 3/5 обсягу енерговикористання. Вважають, що на початку ХХІ ст. частка цих енергоносіїв знизиться, водночас збережуться обсяги споживання вугілля і суттєво зросте роль нетрадиційних (альтернативних) джерел енергії.

За деякими оцінками, очікуваний приріст споживання нафти в світі в найближчі 20 років буде істотним і становитиме близько 30–40 млн барелів на день (більше ніж на 40 %). Країни Організації країн-експортерів нафти (ОПЕК) збережуть свою провідну роль у забезпеченні очікуваного приросту попиту. Унаслідок зростання цін на вуглеводневі енергоносії та зважаючи на прогнозоване їх вичерпання, динамічно розвиватиметься відновлювана енергетика.

Із наведених у табл. 1.1 даних видно, що майже 90 % світової енергії забезпечує органічне паливо. Багато дослідників занепокоєні неухильним зростанням видобування нафти і газу і можливим виснаженням їх природних запасів уже до середини поточного сторіччя. Про вичерпність запасів традиційних енергоресурсів свідчать дані, наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.1

**Структура енергоносіїв для виробництва
електроенергії у світі в 2006 р., %**

Країна	Млрд кВт·год на рік	Вугілля	Нафта	Газ	Атомна енергія	Гідро-енергія	Інші види
США	4003,5	52,7	3,1	15,7	20,0	6,2	2,2
Франція	535,8	5,8	1,4	2,1	77,5	12,5	0,7
Німеччина	567,1	52,7	0,8	9,3	29,9	3,8	3,4
Англія	372,2	33,4	1,5	39,4	22,9	1,4	1,4
Італія	269,9	11,3	31,8	37,5	–	16,4	3,0
Іспанія	221,7	36,5	10,2	9,1	28,1	12,8	3,4
Україна	173,0	31,9	0,6	16,8	45,1	5,6	1,0
Швеція	145,9	2,1	1,2	0,3	39,3	54,1	3,0
Норвегія	142,4	0,1	–	0,1	–	99,5	0,3
Данія	36,2	46,0	12,2	24,3	–	0,1	17,4

Таблиця 1.2

Світові запаси вичерпних енергоресурсів*

Паливо	Розвідані запаси енергоресурсів, млрд т у. п.	Потенційні запаси енергоресурсів (розвідані та прогнозні), млрд т у. п.	Термін вичерпання енергоресурсів, років	
			розвіданих	прогнозних
Вугілля	867	4862	200	1120
Нафта	196	286	36	53
Природний газ	155	315	36	73
Ядерне паливо	53	239	40	210
Разом	1271	5702		

* Запозичено у Мхитарян Н. М. *Енергетика нетрадиційних і відновлюваних джерел. Досвід і перспективи.* – К.: Наукова думка, 1999. – 316 с.

1.2. Класифікація нетрадиційних джерел енергії

До нетрадиційних джерел енергії можна зарахувати такі:

– джерела прямого перетворення різних видів енергії на електричну;

- нетрадиційні види палива;
- вторинні енергетичні ресурси.

У джерелах прямого перетворення тепла чи хімічна енергія перетворюються безпосередньо на електричну. До технологій, що перетворюють теплову енергію на електричну, належать [1]:

– магнетогідродинамічне перетворення енергії;

– використання енергії реакторів-розмножувачів на швидких нейтронах;

- використання енергії термоядерних реакцій;
- термоелектричні технології;
- термоемісійні технології;
- технології із використанням цирконію.

Безпосереднє перетворення теплової енергії на електричну дає змогу уникнути використання проміжних агрегатів, що істотно підвищує енергоефективність теплових процесів.

У класичному циклі використання теплової енергії тепло спочатку перетворюється на внутрішню енергію пари, температура і тиск якої підвищуються. У парових турбінах енергія пари перетворюється на механічну енергію обертального руху, яка відтак перетворюється на електричну енергію в електромагнетному полі генератора. У такому ланцюжку перетворень енергії неминучі втрати, які істотно знижують ефективність процесу. В ідеальному тепловому циклі Карно коефіцієнт корисної дії (ККД) η залежить від максимальної T_1 і мінімальної T_2 температури робочого тіла (отже, $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$). У паливній парогенераторі температура сягає 2000 °С. Температура нагрівання лопаток турбіни обмежується їх теплостійкістю і не може перевищувати 750 °С, що обмежує ККД до 60 %. У реальних умовах через недосконалість паросилового циклу ККД не перевищує 40 %.

У магнетогідродинамічному циклі тепла енергія безпосередньо перетворюється на електричну. Статичні умови роботи МГД-генератора дають змогу використовувати матеріали, на поверхні яких температура може сягати 2700–3000 °С, і, завдяки цьому, істотно підвищити ККД перетворення енергії порівняно із класичним циклом. Електростанції з використанням МГД-генератора вже працюють у світі: у США функціонує електростанція потужністю 200 МВт (паливом слугує вугілля), у Росії – потужністю 70 МВт (паливом є природний газ), провадять розробки в Японії, Канаді, Німеччині.

Перспективи забезпечення людства електричною енергією пов'язують із використанням *реакторів-розмножувачів та термоядерним синтезом*. Реактори-розмножувачі на швидких нейтронах сьогодні уже застосовують, однак реактори термоядерного синтезу для промислового використання ще не придатні.

Термоелектричні генератори уже давно застосовують у техніці. Принцип їх дії ґрунтується на ефекті Зеєбека, який полягає у виникненні електрорушійної сили в електричному колі. Коло складається із послідовно з'єднаних різнорідних провідників, контакти між якими мають різні температури T_1 і T_2 . У таких систем низький ККД (2–3 %), але їхні переваги – автономність, компактність, безпечність, безшумність.

Дія *термоемісійного перетворювача* оснований на емісії електронів із розігрітого тіла – емітера. Принцип дії такого перетворювача подібний до роботи двоелектродної лампи – діода. Джерелом тепла може бути органічне паливо, сонячне випромінювання тощо. Перспективним напрямом такої технології є використання ядерних енергетичних установок з термоемісійним реактором-перетворювачем.

У технології *прямого отримання електричної енергії з хімічної енергії* перспективними є електрохімічні генератори і паливні комірки. У паливних комірках використовують витратні елементи – паливо й окиснювач. Поширена схема таких перетворювачів – застосування водню як палива і кисню як окиснювача.

Продуктом такої електрохімічної реакції є вода, тому таке джерело енергії вважають екологічно чистим. Максимальний ККД таких перетворювачів сягає 50–70 %.

До нетрадиційних енергетичних ресурсів можна зарахувати водень, теплотворна здатність якого у 2,5 разу більша від теплотворної здатності природного газу, а також метан вугільних шахт та сміттєзвалищ, синтез-газ, енергію геотермальних вод тощо.

Немало енергії можна отримати, використовуючи вторинні енергетичні ресурси (ВЕР), а саме відходи виробництва. До них належать горючі, теплові відходи та надлишковий тиск. Горючі відходи застосовують як паливо, теплові – для отримання корисного тепла, а ВЕР надлишкового тиску можна використати для приводу механізмів або для перетворення на електричну енергію.

1.3. Відновлювані джерела енергії

Енергетичні ресурси Землі формувалися й сьогодні формуються у результаті діяльності Сонця. Їх можна поділити на дві групи: давно акумульовані природою, які сьогодні фактично не відновлюються, та неакумульовані, які постійно відновлюються. До першої належать запаси корисних копалин: нафта, природний газ, кам'яне та буре вугілля, а також ядерна енергія. До другої – сонячне випромінювання, вітер, потоки води, морські хвилі та припливи, геотермальна енергія тощо.

На рис. 1.2 наведено типи джерел відновлюваної енергії та способи їх використання.

Відновлюваними джерелами енергії називають енергетичні ресурси, які неперервно або циклічно відновлюють енергетичну цінність і можуть бути перетворені на корисну роботу. Запаси відновлюваних джерел фактично невичерпні, тоді як запаси традиційних палив обмежені.

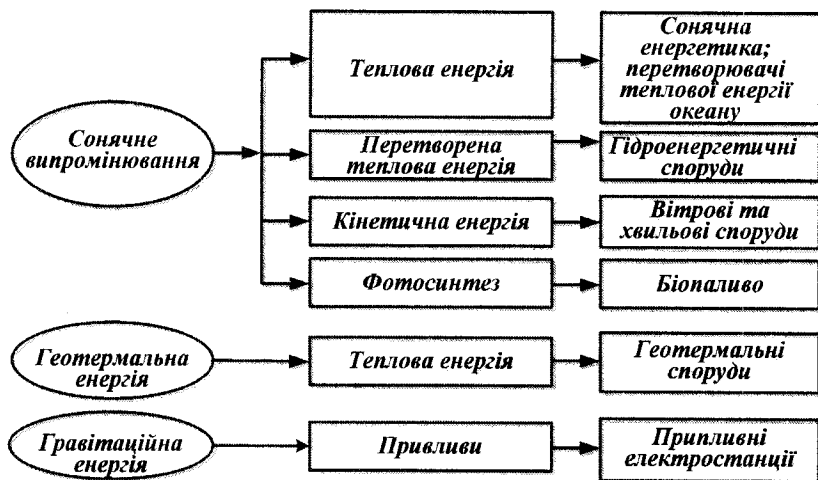


Рис. 1.2. Відновлювані джерела енергії та її перетворення

Відновлюваними джерелами енергії прийнято називати фактично всі природні види енергії. До них належать:

- *сонячна енергетика* – використовує енергію сонячного випромінювання, перетворюючи його із застосуванням термодинамічного або фотоелектричного методу;
- *вітроенергетика* – перетворення кінетичної енергії вітру на електричну;
- *геотермальна енергетика* – вироблення теплової та електричної енергії з використанням теплової енергії, що утворюється у надрах планети Земля;
- *мала гідроенергетика* – використання енергії водяного потоку (зокрема малих річок);
- *хвильова енергетика* – перетворення механічної енергії хвиль на електроенергію;
- *біогазова енергетика* – отримання горючої суміші газів (біогазу), що утворюється в результаті метанового бродіння (анеробного мікробіологічного процесу), спричиненого розкладанням органічних речовин

484842

Порівняння потоків енергії різних джерел

Енергоносії	Густина потоку енергії, МВт/м ²
Гідравлічна енергія за висоти напору $H=100$ м та швидкості води $v=10$ м/с	9,8
Енергія атомної станції	0,2
Енергія припливних течій за $v=4$ м/с	$4 \cdot 10^{-3}$
Сонячна енергія	$1,36 \cdot 10^{-3}$
Вітрова енергія за $v=10$ м/с	$6 \cdot 10^{-4}$
Геотермальна енергія	$3 \cdot 10^{-8}$

Використання відновлюваних джерел енергії обмежується такими чинниками:

- малою густиною енергетичного потоку; у табл. 1.3 наведено порівняльні значення густини потоку енергії різних джерел;
- значною нерівномірністю вироблення енергії залежно від пори року та часу доби;
- нерівномірністю місць розташування об'єктів генерування електроенергії та концентрованих місць її використання;
- високою капіталосмістю енергоустановок та споруд.

Через нерівномірність виробництва електроенергії автономна енергоустановка ВДЕ повинна бути або оснащена акумуляторами, або працювати у парі із установкою-дублером, що використовує інший енергоресурс. У разі паралельної роботи з енергосистемою остання повинна компенсувати нерівномірність постачання електроенергії, тобто мати достатній запас резервної потужності.

У технічній літературі прийнято розрізняти теоретичний, технічний і економічний потенціали енергоресурсів. У табл. 1.4 наведено значення потенціалу відновлюваних джерел світу.

Теоретичний потенціал – максимально можливий обсяг використання енергетичного ресурсу певного виду.

Технічний потенціал – частина теоретичного потенціалу, яку можна практично використовувати за сучасного рівня розвитку

науки і техніки. Він у два–три рази менший від теоретичного, але можливе його збільшення.

Таблиця 1.4

Потенціал відновлюваних джерел у світі, млн ТДж/рік

Вид енергії	Використання	Потенціал	
		теоретичний	технічний
Гідроенергія	10	147	50
Енергія біомаси	50	2900	>276
Сонячна енергія	0,0	390000	>1575
Вітрова енергія	0,3	6000	640
Геотермальна енергія	0,6	140000000	5000
Енергія океану	–	7400	–
Разом	61	144000000	>7600

Економічний потенціал – частина технічного потенціалу, освоєння якого економічно виправдане за фактичного рівня цін на цей момент, наявних матеріалів та обладнання, робочої сили тощо.

1.4. Потенціал нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в Україні

Реальна перспектива вичерпання викопних видів палив як джерел енергії та погіршення стану довкілля істотно підвищили зацікавленість використанням відновлюваних джерел енергії. Велику увагу привертає використання сонячної та вітрової енергії. Від 1990 р. використання енергії сонячного випромінювання у світі зросло більш ніж удвічі, а вітрової енергії – у чотири рази. Особливе поштовхування розпочалося після підписання у 1997 р. Кіотського протоколу. Важливо, що відновлювані джерела – це переважно місцеві джерела, тобто найближчі до місця енергоспоживання, що дає змогу створювати нові робочі місця, знизити витрати на транспортування, зменшити імпорт викопних палив тощо. Це також сприяє регіональному розвитку.

На поверхню планети Земля надходить у десять разів більше енергії, ніж споживається. Виникає потреба у чіткому виявленні й використанні відновлюваних джерел енергії, а також максимально ефективному перетворенні енергії ВДЕ в енергетичних установках на основі мінімізації її втрат.

Переконаливими видаються розрахунки можливостей забезпечення соціальних потреб населення. Якщо E_C – середні витрати на одну людину на рік із колективу N людей, то річні потреби E_P колективу становитимуть

$$E_P = E_C \cdot N. \quad (1.1)$$

Рівень життя людей оцінюють за значенням національного доходу S на душу населення, використовуючи складну нелінійну функцію f , яка визначає ефективність використання енергії для задоволення життєвих потреб людини

$$S = f \cdot E_C. \quad (1.2)$$

Об'єднавши ці дві формули, отримаємо: $E_P = S \cdot \frac{N}{f}$.

Населення Землі налічує приблизно 7 млрд людей, а приріст за рік – $\Delta N = 2-3$ %. Середнє споживання потужності на душу населення становить 0,8 кВт (у США – 10 кВт, у Європі – 4 кВт, у Центральній Африці – 0,1 кВт). Середній темп зростання національного доходу за рік – $\Delta S = 2-5$ %.

Тоді приріст річної потреби населення планети за рік становитиме

$$\Delta E_P = \Delta S \cdot \Delta N / f = (2 \dots 5) \cdot (2 \dots 3) / f = (4 \dots 15) / f. \quad (1.3)$$

Такий приріст потреб населення в енергії можливо забезпечити використанням нових ВДЕ, оскільки з кожного квадратного метра поверхні Землі від ВДЕ можна отримати приблизно 0,5 кВт потужності. Якщо прийняти бажану споживану потужність за 2 кВт на людину та ефективність перетворення енергії приблизно 4 %, то для виробництва зазначених 2 кВт необхідна площа земної поверхні близько 100 м². Якщо з 1 м² одержимо 0,5·0,04 кВт, то для отримання 2 кВт потрібно

$$F = (2 \cdot 1) / (0,5 \cdot 0,04) = 100 \text{ м}^2. \quad (1.4)$$

Навіть у містах, де густина населення сягає 500 осіб на 1 км², для забезпечення потрібних 2 кВт на людину потрібна площа приблизно 0,05 км², що становить 5 % площі заселення. Тому можна стверджувати, що ВДЕ дають змогу забезпечити потрібний рівень енергоспоживання населення.

Освоєння відновлюваних джерел енергії та енергозбереження сьогодні є одними із пріоритетних напрямів розвитку енергетичного сектору економіки України. Зростає кількість нових підприємств, що виробляють устаткування для відновлюваної енергетики, велику частину якого сьогодні ще експортують за кордон, через відсутність попиту в Україні, за винятком вітроенергетики.

За статистичними даними Мінпаливенерго, в Україні доволі незначна частка використання ВДЕ в загальному енергопостачанні – 3 %, ураховуючи велику гідроенергетику, хоч енергетичний потенціал основних видів відновлюваних джерел достатньо високий (табл. 1.5). Досяжний енергетичний потенціал відновлюваних і вторинних джерел енергії становить 73 млн т умовного палива (у перерахунку на газ – 62,7 млрд кубометрів).

Таблиця 1.5

Потенціал відновлюваних джерел енергії в Україні

Вид енергоресурсу	Теоретичний потенціал, МВт·год/рік	Технічний потенціал, МВт·год/рік	Використання сьогодні, МВт·год/рік
Геліоенергетика	$720,0 \cdot 10^9$	$0,13 \cdot 10^9$	$81,0 \cdot 10^3$
Вітроенергетика	$965,0 \cdot 10^9$	$0,36 \cdot 10^9$	$0,8 \cdot 10^3$
Геотермальна енергетика	$5128,0 \cdot 10^9$	$14,0 \cdot 10^9$	$0,4 \cdot 10^3$
Біоенергетика	$12,5 \cdot 10^9$	$6,1 \cdot 10^6$	$0,014 \cdot 10^3$
Мала гідроенергетика	$17,4 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^6$	$0,5 \cdot 10^6$

Перспективні напрями освоєння енергії ВДЕ наведено у табл. 1.6.

**Перспективні напрями і рівні освоєння енергії
відновлюваних джерел в Україні до 2030 р.**

Показники	Виробництво теплової та електроенергії з ПДЕ в 2001–2030 рр.							
	2001		2010		2020		2030	
	млн. т у. п	%	млн. т у. п	%	млн. т у. п	%	млн. т у. п	%
Вітроенергетика	0,012	0,2	0,22	3,15	1,00	6,97	2,15	9,95
Фотоелектрика	–	–	0,001	0,02	0,01	0,07	0,03	0,14
Мала гідроенергетика	0,17	3,1	0,15	2,16	0,48	3,36	0,65	3,01
Велика гідроенергетика	4,36	78,69	4,8	68,69	5,6	39,06	6,53	30,23
Сонячні теплові колектори	0,002	0,04	0,12	1,72	0,7	4,88	1,28	5,93
Біоенергетика	0,99	17,9	1,66	23,76	6,3	43,93	10,13	46,9
Геотермальна енергетика	0,004	0,07	0,034	0,49	0,247	1,73	0,83	3,84
Разом	5,54	100	6,99	100	14,34	100	21,6	100
У перерахунку на млрд м ³ природного газу	4,76		6,01		12,33		18,58	

Згідно із проєктом Енергетичної стратегії України до 2030 р. і подальшими перспективами основні напрями розвитку ВДЕ в нашій країні такі:

- використання енергії вітру і гідроенергії для виробництва електроенергії;
- сонячної та геотермальної енергії – для виробництва тепла;

– утилізація відходів біомаси, твердих побутових відходів тощо – спалюванням або отриманням біогазу для виробництва тепла і електроенергії;

– використання біогазу як моторного палива.

У доповіді Всесвітньої енергетичної ради зазначено, що частка відновлюваних джерел енергії нині перевищує 30 % сукупної потужності й 23 % від усього виробництва електроенергії в світі. Істотно зросло використання енергії вітру і Сонця – за останніх десять років середньорічне збільшення потужностей електростанцій становило 23 % і 51 %, відповідно, а сукупна частка цих видів енергії в загальному виробництві – лише 4 %.

Відновлювана енергія стала великим бізнесом. У 2015 р. в 154 ГВт нових потужностей ВДЕ була інвестована рекордна сума – \$ 286 млрд. На вітрову і сонячну енергетику припало сумарно 76 % інвестицій. Ринок відновлюваної енергії повільно переміщується від розвинених країн до країн, що розвиваються. До кінця 2015 р. у 164 країнах світу сформовано стратегії підтримки відновлюваної енергетики, 95 з них належать до країн, що розвиваються. Для порівняння: у 2005 р. їх було лише 15.

У 2017 р. у виробництві електроенергії за допомогою відновлюваних джерел у світі досягнуто нового рекорду: вона становила четверту частину від загального обсягу її виробництва. Нові рекорди також було встановлено у секторах сонячної та вітрової енергетики із новими генеруючими потужностями 94 ГВт і 47 ГВт відповідно, зокрема збудовано нові морські вітропарки потужністю 4 ГВт. Собівартість виробництва електроенергії із відновлюваних джерел продовжує знижуватись, а технології – вдосконалюватись, попри скорочення глобальних інвестицій у сектор ВДЕ.

Темпи розвитку відновлюваної енергетики в усьому світі необхідно прискорити, щоб запобігти масштабним економічним втратам через неконтрольовані зміни клімату. Про це йдеться у новій доповіді Міжнародного агентства з відновлювальної енергетики (IRENA) “Глобальна енергетична трансформація: Дорожня карта до 2050 року”. В доповіді наголошено на тому, що перехід на

відновлювані джерела енергії та стрімке підвищення рівня енергоефективності – основа реального вирішення проблеми зміни клімату.

Контрольні запитання

1. Назвіть п'ять джерел енергії.
2. Назвіть і поясніть зміст поняття ВДЕ.
3. Які причини спонукають до використання нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії?
4. Які передумови річних потреб в енергії людей у різних країнах світу (США, України, Англії, Росії, країн Африки)?
5. З якою метою можна використати енергію ВДЕ?
6. Назвіть нетрадиційні види палива.
7. Що таке вторинний енергетичний ресурс?
8. Які ВДЕ використовують пряму дію сонячного випромінювання?
9. Які ВДЕ використовують побічну дію сонячного випромінювання?
10. Основні переваги нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії.
11. Перелічіть недоліки нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії.
12. Назвіть причини необхідності використання ВДЕ в енергетиці України.
13. Що характеризує “теоретичний потенціал енергоресурсів”?
14. Що характеризує “технічний потенціал енергоресурсів”?
15. Що таке “економічний потенціал енергоресурсів” та яка його суть?

Розділ 2

ТРАДИЦІЙНІ ТА НЕТРАДИЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ ТЕПЛА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1. Традиційні енергоносії для генерування тепла й електроенергії

Під енергією розуміють кількісну оцінку різних форм руху матерії, які можуть взаємно перетворюватись. За видами енергію поділяють на хімічну, механічну, електричну, ядерну тощо. Енергія, яка придатна для того, щоб її практично використовувала людина, зосереджена в матеріальних об'єктах, які називають енергетичними ресурсами.

Енергоресурси поділяють на відновні та невідновні. До перших належать енергоресурси, неперервно відновлювані природою (вода, вітер тощо), а до других – енергоресурси, які раніше накопичені в природі, але в нових геологічних умовах фактично не утворюються (наприклад, кам'яне вугілля).

Енергію, безпосередньо взятую в природі (енергетичного палива, води, вітру, ядерну), називають первинною.

Енергію, яку отримує людина після перетворення первинної енергії на спеціальних установках-станціях, називають вторинною (електрична енергія, енергія пари, гарячої води).

Для роботи потужних електроустановок потрібна порівняно мала кількість палива, яке називають традиційним. Середня енергоємність усіх видів становить $0,834 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{кг}$ ($3 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$).

Потреби в енергоресурсах швидко зростають, збільшується їх споживання, що зумовлено нарощуванням світового промислового виробництва. Світових запасів енергоресурсів без урахування можливостей ядерної та термоядерної енергетики після 2000 р. вистачить на 100–250 років, за умови споживання 100–240 тис ТВт·год (20–30 млрд т умовного палива). Загальногеологічні запаси палива оцінюють в 200 млн ТВт·год.

Значну частину енергоресурсів витрачають на електростанціях для виробництва електроенергії. Сумарна потужність електростанцій у світі перевищує 2 млрд кВт.

Види енергетичних ресурсів відрізняються за якістю. Паливо характеризує теплотворна здатність, тобто скільки енергії (тепла) може виділити це джерело (табл. 2.1). Щоб порівняти теплотворну здатність ресурсів, потрібно зіставити їх питомі енергоємності, тобто кількість енергії, що припадає на одиницю маси енергоресурсу (табл. 2.2).

Таблиця 2.1

Теплотворна здатність різних палив

Паливо	Сумарна теплотворна здатність		Примітка
	МДж/кг	МДж/л (15 °С)	
1	2	3	4
Спеціально зібране			
Деревина:			Залежить більше від вологості, ніж від сорту деревини
– зелена	8	6	
– сезонна	13	10	
– спеціально висушена	16	12	
Трав'яні рослини (висушені)	15	–	Наприклад, сіно
Відходи врожаю			
Рисова луща Жом із цукрової тростини Коров'ячий гній Торф	15	–	Для сухого матеріалу. На практиці відходи можуть бути вологими
Вторинне біопаливо			
Етанол	30	25	C_2H_5OH ; 789 кг/м ³
Метанол	23	18	CH_3OH
Біогаз	28	$20 \cdot 10^{-3}$	50 % CH_4 +50 % CO_2
Генераторний газ	5–10	$20 \cdot 10^{-3}$	Різний за складом
Деревне вугілля:			
– твердими шматочками	32	11	–
– порошок	32	20	–

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4
Кокосова олія	39	20	–
“кокохол”	39	33	Етиловий ефір кокосової олії
Традиційне паливо			
Метан	55	$38 \cdot 10^{-3}$	Природний газ
Бензин	47	34	Моторне паливо
Гас	46	37	–
Дизпаливо	46	38	Фракції від перегонки нафти
Сира нафта	44	35	–
Вугілля	27	–	Чорне, коксоване

Таблиця 2.2

**Теплотворна здатність (тепловміст) енергоресурсів
порівняно із умовним паливом**

Види палива	Умове паливо	Вугілля антрацит	Дрова сухі	Нафта	Газ пропан	Водень
Тепловміст палива, МДж/кг	29,3	33,5	10,5	41,9	46,1	120,6
Тепловміст палива, ккал/кг	7000	8000	2500	10000	11000	28800

Органічне паливо на Землі видобуваємо в твердій (торф, різні види вугілля тощо), рідкій (нафта) та газоподібній (природний газ) формах.

До твердого органічного палива належить вугілля, яке утворилося внаслідок розкладання відмерлої багатоклітинної рослинності у товщі Землі. Геологічно цей процес відбувався у прадавніх заболочених місцях, де шар води перешкоджав вільному доступу повітря до опалої рослинності, що призвело до утворення темно-бурої маси – торфу, в якому ще трапляються нерозкладені залишки

рослин (листя, стебла). Згодом під дією тиску, температури і мікроорганізмів торф'яна маса перетворилася на буре вугілля. Продуктами наступних стадій перетворення бурого вугілля є кам'яне вугілля й антрацит.

До твердого викопного палива належать і горючі сланці – мінеральні породи, просякнуті органічними речовинами.

Природним рідким паливом є нафта – суміш вуглеводнів та розчинених у ній компонентів, які перебувають у рідкому стані за нормального атмосферного тиску та температури. У ній міститься деяка кількість рідких кисневих, сірчистих і азотистих сполук. Є декілька теорій щодо походження нафти. Згідно із найпоширенішою нафта – це продукт розпаду нижчих рослинних та тваринних організмів, що існували в морях і океанах сотні мільйонів років тому. Із загиблих тварин формувалися відкладення на глибинах від 30 метрів до 8 кілометрів. За іншою теорією, розробленою в Інституті геологічних наук Національної академії наук України, нафта – це продукт синтезу водню та карбону в приповерхневих шарах Землі. Прихильники органічної теорії походження видів горючих копалин дотримуються думки, що нафта і газ є побічними продуктами процесу вуглеутворення.

Природний газ суто газових родовищ складається переважно із метану (95–98 % CH_4). Природний газ, як і нафта та вугілля, утворився у надрах Землі із решток рослин і дрібних тварин.

2.2. Технології використання палив для генерування електроенергії

Теплові конденсаційні електростанції (ТКЕС) перетворюють енергію органічного палива (незалежно від його походження) спочатку на механічну, а потім на електричну.

Станція із використанням вугілля як первинного енергоносія працює так: із бункера вугілля надходить у дробильну установку, де воно перетворюється на пил. Вугільний пил разом із повітрям

подається у палильню. Теплоу, отримувану під час спалювання вугілля, використовують для перетворення води, що циркулює у трубах котла, на пару.

Замість вугілля на теплових станціях можна використовувати природний газ, мазут, біогаз, побутові відходи тощо. Для усіх видів палива перед спалюванням необхідна належна підготовка (осушення, гранулювання, газифікація тощо).

Вторинним енергоносієм (чи робочим тілом), який використовує енергію горіння палива, можуть бути вода, що перетворюється на пару, чи газ продуктів горіння.

Пара, нагріта потоком гарячих газів із високими температурою і тиском, надходить спочатку в перший, а потім у другий ступінь парової турбіни. В турбіні енергія пари перетворюється на механічну енергію обертання ротора генератора, що виробляє електричну енергію. Відпрацьована пара після турбіни надходить у конденсатор, перетворюється на воду (конденсується) і з температурою 30–40 °С циркуляційною помпою подається в котел, і цикл перетворення води повторюється. Охолодження пари в конденсаторі здійснюють завдяки теплообміну з водою, що постачають із водойми. Цю воду, підігріту паром, скидають назад у водойму.

Для підвищення ефективності роботи теплових двигунів намагаються максимально збільшити температуру робочого тіла і його тиск до значень, допустимих за умовами механічної міцності конструкційних матеріалів (пара з температурою $t = 600$ °С і тиском $p = 30$ МПа).

Продукти спалювання палива проходять через очисні споруди, де виділяється зола, тверді частинки неспаленого палива та інші домішки, а гази, що залишилися, видаляють в атмосферу через димову трубу.

Турбіни. Отриману в парогенераторі пару (перегріту) паропроводами передають в сопла турбіни. Сопла призначені для перетворення внутрішньої енергії пари на кінетичну енергію впорядкованого руху молекул. Після виходу із сопла пару подають на робочі лопатки турбіни. Якщо турбіна активна, то між її робочими

лопатками розширення пари не відбувається, а отже, і тиск пари не змінюється. У реактивній турбіні відбувається розширення пари, що проходить через канали робочих лопаток. Залежно від показників розширення пари в каналах турбіни характеризуються ступенями реактивності. Тепер турбіни виконують багатоступеневими, причому в тій самій турбіні можуть бути і активні, й реактивні ступені.

Конденсатори. Пару, що виходить із турбіни, направляють для охолодження і конденсації в спеціальній пристрій – конденсатор – циліндричний корпус, усередині якого міститься велика кількість латунних трубок, якими протікає охолоджувальна вода (на вході її температура $t = 10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на виході із конденсатора – $20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Тиск у конденсаторі підтримується на рівні 3–4 кПа. Якщо воду для охолодження забирають із ріки, а потім скидають туди знову, то таку систему водопостачання називають прямоточною. У замкнених системах водопостачання для охолодження води застосовують градирні (висота цих споруд приблизно 50 м). Унизу градирні басейн, звідки охолоджена вода подають у конденсатор.

Якщо за 100 % взяти енергію спалювання палива, то в середньому тільки 35 % цієї енергії перетворюється на електричну. Найбільші втрати теплоти в конденсаторі (55 % видаляють з охолоджувальною водою).

Виробництво електроенергії на ТЕС супроводжується великими втратами теплоти. Водночас багатьом галузям промисловості, таким як хімічна, текстильна, харчова, металургійна та деяким іншим, теплота необхідна для технологічних потреб. Для опалення житлових будинків потрібна велика кількість гарячої води.

Для цих потреб природно використовувати пару, отриману в парогенераторах на ТЕС, як для виробництва електроенергії, так і для теплофікації споживачів. Електростанції, що виконують такі функції, називають теплоелектроцентралями (ТЕЦ).

Температура відпрацьованої в турбінах конденсаційних станцій пари $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$, тому вона непридатна для використання в технологічних процесах на підприємствах.

Для багатьох виробництв необхідна пара із тиском 0,5–0,9 МПа, а іноді й до 2 МПа для приведення у дію пресів, парових молотів, турбін.

Іноді потрібна гаряча вода, нагріта до температури 70–150 °С.

Для отримання пари з необхідними для споживачів параметрами використовують спеціальні турбіни із проміжним відбором пари. Та частина пари, що залишилась, далі звичайним способом використовується в турбіні й надходить у конденсатор.

Завдяки повнішому використанню теплової енергії ККД ТЕЦ досягає 60–65 %, а ККД КЕС – не більше ніж 40 %.

Гарячу воду та пару під тиском (близько 3 МПа) подають споживачам трубопроводами. Сукупність трубопроводів, призначених для передавання теплоти, називається тепловою мережею.

Ефективність роботи системи тепlopостачання багато в чому залежить від раціонального розташування ТЕЦ. Їх намагаються розташувати якнайближче до потужних споживачів теплоти та електроенергії, оскільки передавання теплоти у вигляді пари на відстань понад 5–7 км неекономічне. Крім того, необхідно враховувати, що ТЕЦ забруднюють довкілля.

Централізоване тепlopостачання на основі комбінованого виробництва теплоти та електроенергії (тобто на ТЕЦ) має істотні переваги: забезпечує теплом і електроенергією споживачів промислового та житлово-комунального господарства, зменшує витрату паливно-енергетичних ресурсів, а також матеріальні й трудові затрати у системах тепlopостачання.

2.3. Паливні біоенергетичні ресурси для генерування тепла й електроенергії

2.3.1. Загальні відомості про біоенергетичні ресурси

Біоенергетика – галузь енергетики, основана на використанні біопалива, яке виробляють із біомаси.

Біомаса – біологічно відновна речовина органічного походження, що зазнає біологічного розкладу (відходи сільського господарства – рослинництва і тваринництва, лісового господарства та технологічно пов'язаних із ним галузей промисловості, а також органічна частина промислових та побутових відходів).

Біомаса – четверте за значенням паливо у світі, його обсяг 1250 млн т у. п., а це становить 25 % світового добування нафти. Її частка у світовому споживанні енергоресурсів сягає 12 %. Згідно із прогнозом Світової енергетичної ради на 2020 р., виробництво електроенергії з біомаси становитиме 42–46 % від загальної кількості електроенергії, виробленої відновними джерелами енергії.

Для України біоенергетика є одним із стратегічних напрямів розвитку сектору відновлюваних джерел енергії, враховуючи високу залежність країни від імпортованих енергоносіїв, насамперед природного газу, і великий обсяг біомаси, доступної для виробництва енергії.

Сьогодні частка біомаси у валовому кінцевому енергоспоживанні становить 1,78 %. В Україні для виробництва енергії витрачають близько 2 млн т у. п./рік біомаси різних видів. На деревину припадає найвищий відсоток використання економічно доцільного потенціалу – 80 %, тоді як для інших видів біомаси (за винятком лушпиння соняшника) цей показник майже у десять разів менший. Особливо повільно (на рівні 1 %) реалізують енергетичний потенціал соломи зернових культур та ріпаку.

В Україні щорічно збирають понад 50 млн т зернових культур, тому утворюються значні обсяги соломи і рослинних відходів як побічних продуктів сільськогосподарського рослинництва. Річний технічно досяжний енергетичний потенціал твердої біомаси в Україні еквівалентний 18 млн т н. е., а його використання дає змогу щорічно заощаджувати близько 22 млрд м куб. природного газу. Найбільші обсяги твердої біомаси зосереджені у Полтавській, Дніпропетровській, Вінницькій та Кропивницькій областях і перевищують 1,0 млн т н. е./рік. Для визначення обсягу соломи і рослинних залишків використовують коефіцієнт відходів – відно-

шення урожаю соломи чи стебел рослин до урожаю зерна. За різними оцінками, на кожну тонну зерна припадає 1,5–2,0 т соломи чи рослинних залишків. 50–60 % соломи пшениці, ячменю, жита використовують для утримання худоби та удобрення ґрунтів, а стебла кукурудзи та соняшнику залишаються на полях після збирання врожаю. Отже, в Україні є достатній енергетичний потенціал соломи і рослинних відходів. Частину соломи після збирання пресують у тюки, брикети та пелети і використовують для опалення. На 14 підприємствах олійної промисловості спалюють понад 500 тис т лушпиння соняшнику й 120 тис т гранулюють.

Ліси в Україні займають близько 16 % її загальної площі. Щорічно заготовляють майже 16–17 млн м куб ділової деревини; відходи перероблення ділової деревини сягають 10 млн м куб. Майже 70 % відходів деревини у вигляді тирси, трісок, пелет і брикетів використовують як біопаливо.

Енергетичні культури – це окремі види дерев та рослин, які спеціально вирощують для виробництва твердого біопалива. Їх поділяють на три окремі групи:

- швидкоростучі дерева;
- багаторічні трави (міскантус – швидкоростуча енергетична культура, багаторічна трава, яку вважають однією із енергетичних рослин європейської кліматичної зони; шавнат – різновид шавлю);
- однорічні трави (сорго, тритікале – злакова культура, отримана внаслідок схрещення жита і пшениці).

До енергетичних рослин також належать традиційні сільськогосподарські культури, що вирощують з метою виробництва біодизельного пального (ріпак, соняшник), біоетанолу (кукурудза, пшениця) та біогазу (кукурудза). Одним із напрямів використання біомаси є її перероблення на рідке біопаливо: біодизель та біоетанол.

Біодизель – метилові та/чи етилові етери вищих органічних кислот, отриманих із рослинних олій чи тваринних жирів, що використовуються як біопаливо чи біокомпоненти.

Біоетанол – спирт етиловий зневоднений, виготовлений з біомаси чи спирту етилового-сирцю для використання як біопалива.

Україна має необхідні умови для виробництва рідких біопалив, як за земельними ресурсами і рослинним потенціалом, так і за наявністю власних виробничих потужностей. Вже сьогодні потенціал біомаси в Україні, придатний для рентабельного виробництва рідких біопалив (біоетанолу і біодизелю), дає підстави стверджувати про перспективність цього напрямку. Річний технічно досяжний енергетичний потенціал рідкого біопалива в Україні еквівалентний 1 млн т н. е. Його використання дає змогу щорічно заощаджувати близько 1,2 млрд м куб. природного газу. Найбільший потенціал рідкого біопалива зосереджений у Вінницькій та Полтавській областях, де він становить понад 90 тис. т н. е. / рік.

Виробництво біоетанолу здійснюють переважно на реконструйованих спиртових заводах. Протягом останніх років виробництво паливного біоетанолу налагоджено на чотирьох спиртових заводах. Заплановано в найближчі три роки залучити до виробництва паливного біоетанолу ще вісім спиртових заводів. Використання рідкого біопалива дасть змогу обмежити викиди в атмосферу парникових газів і позитивно впливатиме на зменшення імпорту нафтопродуктів.

Біогаз – газ, отриманий з біомаси, що використовують як паливо. Виробництво та використання біогазу є ефективним способом доповнення та заміни традиційних паливно-енергетичних ресурсів. Виробництво енергії з біогазу не шкідливе для довкілля, оскільки не спричиняє додаткової емісії парникового газу CO_2 і зменшує кількість органічних відходів. На відміну від енергії вітру і сонячного випромінювання, біогаз можна отримувати незалежно від кліматичних і погодних умов, а на відміну від викопних джерел енергії біогаз в Україні має дуже великий відновний потенціал. Річний теоретичний потенціал біогазу в Україні становить 3,2 млрд м куб. Найбільший потенціал біогазу зосереджений у Дніпропетровській, Донецькій та Київській областях і становить понад 150 тис. т н. е. / рік.

Біогаз утворюється у результаті застосування технології метанового зброджування тваринницької біомаси і на 60–70 % складається із метану. Іншим джерелом біогазу є звалища сміття на полігонах твердих побутових відходів, оскільки відходи складаються із великої кількості органічних речовин. Джерелом біогазу є також стічні води. Утилізація відстоїв міських і промислових стічних вод сприяє вирішенню важливих екологічних, енергетичних і соціальних проблем міст, особливо мегаполісів. Застосування біогазу дає змогу отримувати теплову та електричну енергію, що особливо привабливо для фермерських господарств.

Енергетичний потенціал біомаси в Україні наведено у табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Енергетичний потенціал біомаси в Україні (на 2013 р.)

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн т	Частка, доступна для отримання енергії, %	Економічний потенціал, млн т у. п.
1	2	3	4
Солома зернових культур	30,6	30	4,54
Солома ріпаку	4,2	40	0,84
Відходи виробництва кукурудзи на зерно (стебла, стрижні)	40,2	40	4,39
Відходи виробництва соняшнику (стебла, кошики)	21,0	40	1,72
Вторинні відходи с/г (лушпиння, жом)	6,9	75	1,13
Деревна біомаса (дрова, порубкові залишки, відходи деревооброблення)	4,2	90	1,77
Біодизель (з ріпаку)	–	–	0,47
Біоетанол (з кукурудзи та цукрових буряків)	–	–	0,99

1	2	3	4
Біогаз із відходів та побічної продукції АПК	1,6 млрд м ³ метану (CH ₄)	50	0,97
Біогаз із полігонів ТПВ	0,6 млрд м ³ CH ₄	34	0,26
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)	1,0 млрд м ³ CH ₄	23	0,27
Енергетичні культури:			
– верба, тополя, міскантус	11,5 млрд м ³ CH ₄	90	6,28
– кукурудза (біогаз)	3,3 млрд м ³ CH ₄	90	3,68
Торф	–	–	0,40
Разом	–	–	27,71

Біогазом, отриманим у результаті анаеробної ферментації біомаси, можна замінити такі види палива:

- природний газ та зріджені гази, що використовують для енергозабезпечення промислових і побутових потреб;
- бензин, дизельне паливо та гас у двигунах внутрішнього згоряння.

Істотний негативний вплив на довкілля чинять звалища і полігони твердих побутових відходів (далі – ТПВ). Закриття полігонів і сміттєзвалищ та їх використання для будівництва сучасних систем збирання й утилізації біогазу забезпечать позитивний екологічний та соціальний ефект. Біогаз є багатокомпонентним газом, склад його може змінюватися залежно від морфологічного складу відходів, що потрапляють на звалища, та умов їх захоронення. Проте основними компонентами біогазу є метан (40–60 %) і вуглекислий газ (30–45 %).

Енергетичному використанню біомаси останнім часом приділяють більше уваги, зважаючи на такі аргументи:

- ✓ використання рослинної біомаси не призводить до збільшення обсягу CO₂ в атмосфері;

- ✓ під енергетичні плантації можливо використовувати залишки обробленої землі;
- ✓ енергетичне використання відходів (сільськогосподарських, промислових, побутових) вирішує екологічні проблеми;
- ✓ новітні технології дають змогу ефективно використовувати біомасу.

Основним джерелом біомаси, безперечно, є ліс і сільськогосподарські рослини. Виробництво біомаси ґрунтується на фотосинтезі рослин, за допомогою якого акумулюється сонячна енергія, перетворюючись на хімічну. Фотосинтез відбувається під впливом сонячного випромінювання. Його можна записати у вигляді такої простої формули:



Систему планетарного кругообігу біомаси зображено на рис. 2.1.

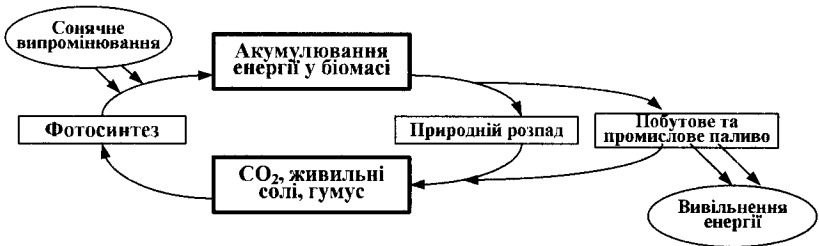


Рис. 2.1. Планетарний обіг біомаси

Утворення біомаси в біосфері відбувається зі швидкістю $\approx 250 \cdot 10^9$ т/рік (у перерахунку на суху масу) в органічному матеріалі внаслідок реакцій, які відбуваються під дією енергії сонячних променів, зв'язуючи також азот (нітроген) N і сірку (сільфур) S, що є в атмосфері та у рослинах. За нинішніми оцінками, внаслідок фотосинтезу рослини щорічно акумулюють близько $2 \cdot 10^{11}$ тонн вуглецю із загальним енергетичним вмістом $3 \cdot 10^{21}$ Дж, а це в десять разів перевищує річне споживання енергії людством.

Тільки за рік ліс виробляє приблизно $7 \cdot 10^9$ м³ біомаси з енергетичним вмістом, який утричі перевищує енергетичне споживання за рік. Україна може щорічно заощаджувати до 20 млрд м³ газу завдяки використанню відходів рослинництва й неліквідної деревини.

Основні інструменти стимулювання біоенергетичних технологій у країнах Європи й Америки такі:

- податок на викиди CO₂ для видобувного палива;
- енергетичний податок на видобуте паливо;
- субсидування вироблення електричної енергії з біомаси;
- система зелених сертифікатів;
- субсидування інвестиційних програм.

2.3.2. Способи перероблення біомаси

Біологічну масу переробляють із метою отримання тепла або палива високої якості. Враховуючи вид виробленого кінцевого продукту (тверде, рідке або газоподібне паливо), використовують різні способи перероблення біомаси: термічний, хімічний, термохімічний, біологічний і біохімічний. Жодний із названих способів не може претендувати на універсальність. Вибір способу перероблення залежить від виду біомаси, кінцевої мети, економічної та екологічної доцільності тощо.

Якість біопалива визначається вмістом у ньому вуглецю і води.

Вміст води визначає вологість біомаси $w = \frac{m - m_0}{m}$, де m – загальна маса матеріалу; m_0 – його маса без води. Матеріал є сухим, якщо він зберігає 10–15 % вологості. Отже, потрібно витратити багато теплової енергії на випаровування води (питома теплота випаровування води $\approx 2,3$ МДж/кг). Нижче наведено класифікацію основних типів енергетичних процесів, які пов'язані із переробленням біомаси (рис. 2.2).

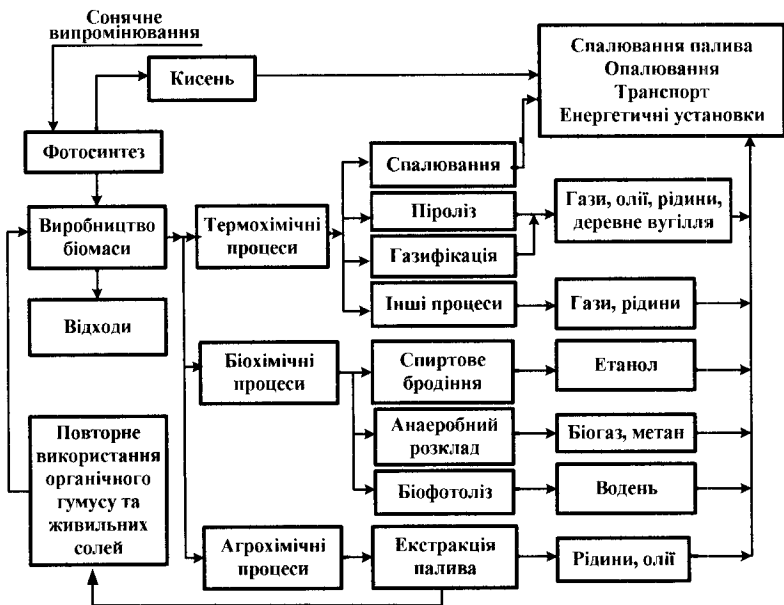


Рис. 2.2. Енергетичні процеси перероблення біомаси

Термохімічні процеси:

- спалювання з метою отримання тепла (сухе гомогенне паливо);

- піроліз (біомасу нагрівають до температури 450–550 °С без доступу повітря; одержують твердий залишок кокс (деревне вугілля), газу (CO , CO_2 , H_2 , H_2O – пару тощо) та рідинну масу (спирти, олії тощо));

- газифікація (процес нагрівання (часткове спалювання) палива з обмеженою кількістю повітря (кисню) за температури 800–1600 °С та тиску 1,0–10,0 МПа; під час газифікації утворюється синтез-газ (CO , H_2 , CH_4 у відповідній пропорції);

- гідрогенізація з різними варіантами попередньої підготовки сировини і проведення самого процесу (гідрогенізація твердого палива – універсальний метод отримання з нього синте-

тичного рідкого палива. Для процесу гідрогенізації найпридатніші тверді горючі корисні копалини, в яких відношення C: H = 8–16, а вихід летких речовин на горючу масу не нижчий за 35–36 %. Гідрогенізація – важливий резерв для заміни сирої нафти на горючі сланці, бітуми, вугілля. За прогностичними оцінками Світової енергетичної ради, у 2050 р. на частку зріджуваного вугілля припадатиме 50 % всього енергетичного вугілля, що видобуватимуть).

Біохімічні процеси:

– спиртова ферментація (етиловий спирт (альтернатива бензинові), як правило, його виробляють мікроорганізми під час ферментації);

– анаеробне перероблення (без кисню мікроорганізмами, які здатні поглинати енергію, безпосередньо переробляючи вуглецевмісні компоненти і виробляючи CO₂ і CH₄; це також ферментація, але називають її бродінням, за аналогією із процесами в тракті перетравлювання їжі; отриману суміш CO₂ і CH₄, а також супутніх газів називають *біогазом*);

– біофотоліз (*фотоліз* – розклад води на водень та кисень під дією світла; якщо водень згоряє чи вибухає як паливо в суміші з повітрям, то відбувається рекомбінація O₂ і H₂; деякі біоорганізми продукують або можуть продукувати водень таким біофотолізом).

Агрохімічні процеси:

– екстракція палива (рідке або тверде паливо можна отримати прямо від живих чи свіжозрізаних рослин, з яких збирають або витискають пресом сік (наприклад, виробництво каучуку)).

2.4. Використання біогазу в енергетиці

Біогаз виробляє група із трьох видів бактерій, що живляться біомасою: гідролізні бактерії, що виробляють їжу для кислотоутворювальних бактерій, які відтак забезпечують їжею метаноутворювальні бактерії, що формують біогаз.

Ферментація вихідного органічного матеріалу (наприклад, гною), продуктом якого і буде біогаз, відбувається без доступу зовнішньої атмосфери, її називають анаеробною. Інший продукт такої ферментації – компостний перегній – добре відомий сільським жителям, які застосовують його як добриво для полів і городів.

Перелік органічних відходів, придатних для виробництва біогазу: гній, пташиний послід, післяспиртова барда, відходи пивного виробництва, буряковий жом, фекальні осади, відходи рибного і забійного цеху (кров, жир, кишки), трава, побутові відходи, відходи молокозаводів – солонина і солодка молочна сироватка, відходи виробництва біодизеля – технічний гліцерин від виробництва біодизеля з ріпаку, відходи від виробництва соків – жом фруктовий, ягідний, овочевий, виноградні вичавки, водорості, відходи виробництва крохмалю і патоки – мезга і сироп, відходи переробки картоплі, виробництва чипсів – шкірки, гнилі бульби, кавова пульпа. Біогаз можна виробляти також зі спеціально вирощених енергетичних культур, наприклад, із силосної кукурудзи або сильфію (сильфій, або лазер, – ароматна та лікарська рослина з роду *Ferula*), родини Окружкові), а також водоростей. Вихід газу може сягати до 300 м³ з 1 тонни.

Розрізняють теоретичний (фізично можливий) і технічно реалізований вихід газу. В 50–70-ті роки XIX ст. технічно можливий вихід газу становив лише 20–30 % від теоретичного. Сьогодні застосування ензимів, бустерів (*бустер* – допоміжний пристрій, що тимчасово збільшує силу чи швидкість дії основного механізму (агрегату)) для шгучної деградації сировини (наприклад, ультразвукових чи рідинних кавітаторів) та інших пристосувань дає змогу збільшувати вихід біогазу від 60 до 95 %.

У біогазових розрахунках використовують поняття сухої речовини (СР) чи сухого залишку (СЗ). Вода, що міститься в біомасі, не дає газу. На практиці з 1 кг сухої речовини отримують від 300 до 500 літрів біогазу. На рис. 2.3 наведено технологічну схему одержання біогазу із продуктів тваринництва.

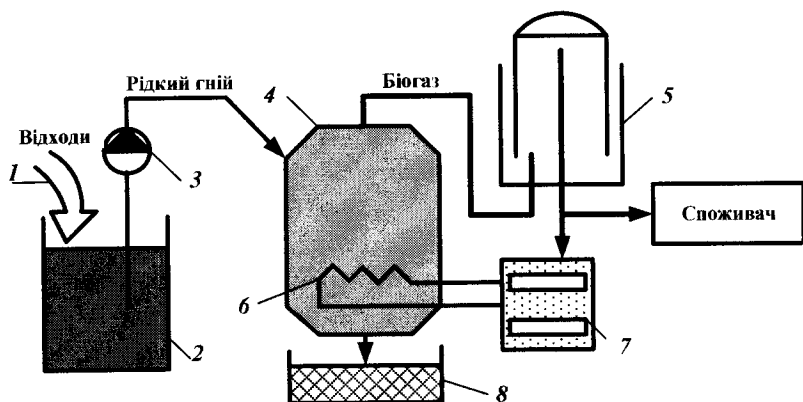


Рис. 2.3. Технологічна схема отримання біогазу з відходів тваринництва:
 1 – надходження відходів; 2 – резервуар для зберігання гною; 3 – помпа;
 4 – метантенк (реактор); 5 – газгольдер; 6 – теплообмінник;
 7 – котел; 8 – сховище добрива

Біомасу (відходи або зелену масу) періодично подають за допомогою помпової станції чи завантажувача в реактор. Реактор – це утеплений резервуар, який підігривається і обладнаний міксером. Будівельним матеріалом для промислового резервуара найчастіше слугує залізобетон чи сталь із покриттям. У малих установках іноді використовують композитні матеріали. В реакторі живуть корисні бактерії, що живляться біомасою. Продуктом життєдіяльності бактерій є біогаз. Для підтримування життя бактерій потрібно подавати корм, підтримувати температуру 35–38 °С і періодично перемішувати. Утворений біогаз скупчується у сховищі (газгольдері), потім проходить систему очищення і подається до споживачів (у котел для отримання теплої води у системі теплопостачання чи пари для роботи турбогенератора). Реактор працює без доступу повітря. Він герметичний і безпечний.

Біогаз використовують як паливо для виробництва електроенергії, тепла чи пари чи як автомобільне паливо.

Біогазові установки можна встановлювати як очисні споруди на фермах, птахофабриках, спиртових заводах, цукрових заводах,

м'ясокомбінатах. Біогазова установка може замінити ветеринарно-санітарний завод, тобто здохлих тварин можна утилізувати в біогаз замість виробництва м'ясо-кісткового борошна.

Серед промислово розвинених країн провідне місце за виробництвом та використанням біогазу за відносними показниками належить Данії – біогаз займає до 18 % в її загальному енергобалансі. За кількістю середніх і великих біогазових установок лідирує Німеччина – 8000 установок. У Західній Європі не менше від половини всіх птахоферм опалюють біогазом.

2.5. Переваги та недоліки біоенергетики

В Україні 98 % всієї енергії, що виробляють із відновлюваних джерел енергії, становить чиста енергія вітру, сонця та води. Фахівці прогнозують стрімкий розвиток чистої енергії з біомаси, яку широко використовують в усьому світі. Нині частка біомаси серед альтернативних джерел енергії становить лише близько 2 %, але вона має великий потенціал використання і є одним із найперспективніших джерел чистої енергії в Україні.

Переваги біоенергетики такі:

- ✓ великий потенціал біомаси в Україні та значні її запаси;
- ✓ різноманітність культур як джерел біомаси;
- ✓ широке застосування отриманих енергоресурсів (транспорт, виробництво електроенергії, побутове господарство);
- ✓ використання біомаси для одержання енергії на основі сучасних технологій екологічно безпечніше порівняно з енергетичним використанням традиційних органічних ресурсів, таких як вугілля;
- ✓ відносна дешевизна порівняно з традиційними паливами, передусім із природним газом;
- ✓ не потребує серйозних модифікацій автомобільних двигунів;
- ✓ легкість одержання та швидке поновлення запасів;
- ✓ ефективне використання супутніх продуктів, відходів та стоків;

- ✓ покращення екологічної ситуації у довкіллі;
- ✓ розвиток сільського господарства;
- ✓ незалежність від імпортованих енергоносіїв;
- ✓ великий світовий потенціал біомаси (особливо у тропіках);
- ✓ виробництво біопалив із біомаси сприяє створенню додаткових робочих місць, що особливо важливо для сільських територій;
- ✓ використання біомаси поліпшує паливний баланс регіону;
- ✓ переорієнтація частини сільськогосподарських площ на одержання біомаси зменшує негативні наслідки від перевиробництва продовольства.

Серед недоліків біоенергетики називають такі:

- ✓ виснаження, збіднення та ерозію ґрунтів;
- ✓ можливу конкуренцію із вирощуванням харчових сільськогосподарських продуктів;
- ✓ використання генної інженерії може спричинити появу невідконтрольних організмів;
- ✓ перевезення біомаси завантажить транспорт;
- ✓ для спалювання біомаси потрібні котли спеціальної конструкції;
- ✓ необхідно комплектувати котельні надійним обладнанням для накопичення і подавання біомаси різної вологості, системою пожежогасіння і підготовки палива до спалювання;
- ✓ не вирішено проблеми зберігання біомаси протягом тривалого часу до перероблення;
- ✓ супротивники наполягають на тому, що викопної енергії в надрах Землі вистачить ще на декілька поколінь і гроші, які вкладають у вивчення і розвиток цієї галузі, можна було б витратити на щось, на їхню думку, актуальніше.

2.6. Тверді побутові відходи як енергетичний ресурс

Одним зі способів заощадження природного газу чи рідкого палива є утилізація твердих побутових відходів (ТПВ), а також відходів виробництва на різних підприємствах. Основним методом

утилізації ТПВ і промислових відходів у нашій державі є складування їх на звалищах, у ґрунтових засипках. Сьогодні в Україні є близько 2000 звалищ ТПВ, утворених без дотримання вимог захисту навколишнього середовища та з порушенням санітарних норм. У розвинених країнах відходи вже давно переробляють для отримання теплової та електричної енергії. У табл. 2.4 наведено морфологічний склад ТПВ (у відсотках) у різних країнах світу.

Таблиця 2.4

Морфологічний склад твердих побутових відходів, %

Складові частини	Росія, Москва	Англія, Лондон	Німеччина	Франція
Папір	47	40	32	48
Дерево	1	–	–	2,5
Текстиль	5	2	3	3
Шкіра, гума	1,8	–	–	1
Пластмаса	2	3	3	5
Кості	0,5	–	–	–
Скло	4	10	–	5
Метал	4,5	10	4	4
Каміння	0,3	–	12	1
Харчові відходи	36,8	16	32	22
Інші відходи	1,1	4	–	–
Частинки, менші від 15 мм	6,3	15	14	8,5

Тверді відходи – залишки речовин, матеріалів, предметів, виробів, товарів, продукції, що не можна надалі використовувати за призначенням.

Звалища і полігони ТПВ доволі негативно впливають на довкілля. Оскільки у складі ТПВ, крім звичайних компонентів – харчових залишків, паперу, пакувальних матеріалів, пластмас, скла тощо, зростає кількість відпрацьованих електроприладів, акумуляторів та елементів живлення, люмінесцентних ламп, які містять токсичні метали, в зоні впливу сміттєзвалищ відбувається забруднення поверхневих водних джерел і ґрунту важкими металами, рівень якого перевищує фонові значення.

Оскільки звалища ТПВ містять чимало органічних відходів, то у товщі звалища в умовах обмеженого доступу кисню, під дією природних метаноутворювальних бактерій відбувається анаеробна ферментація органічних речовин із утворенням біогазу.

Біогаз є багатокомпонентним газом, склад його може змінюватися залежно від морфологічного складу відходів, що потрапляють на звалища, та умов захоронення. Проте основними компонентами біогазу є метан (40–60 %) і вуглекислий газ (30–45 %).

До сучасних способів використання біогазу, отриманого зі звалищ ТПВ, належать: спалювання з метою виробництва енергії; збагачення і використання як палива в газотурбінних установках для комбінованого вироблення теплової та електричної енергії; факельне спалювання для усунення неприємних запахів і зниження пожежної небезпеки на полігонах ТПВ; використання як палива для газових двигунів з отриманням електричної та теплової енергії; використання біогазу як палива для автомобілів; збагачення (підвищення вмісту метану до 94–95 %) і використання у газових мережах загального призначення як заміника природного газу.

2.6.1. Спалювання підготовлених горючих ТПВ у котлах і печах для генерування теплової та електричної енергії

Перед спалюванням ТПВ попередньо сортують – видаляють метали, електроелементи, скло, пластик тощо, висушують та подрібнюють. Вторинну сировину, яку отримують в результаті сортування: вловлений метал, компост, шлак та золу – можна використовувати у виробництві будівельних матеріалів.

У багатьох країнах світу технологію спалювання ТПВ застосовують для отримання тепла й електроенергії (рис. 2.4). В Україні частка спалюваних ТПВ найменша із поданих на рис. 2.4, оскільки поки що ТПВ складують на сміттєзвалищах.

Підвищити ефективність спалювання ТПВ можна одночасним спалюванням суміші традиційних викопних видів палива і ТПВ. Враховуючи економічні та екологічні параметри, орієнтовна

частка ТПВ для котлів на вугіллі становить 10–20 %, для котлів на природному газі – 20–30 %. ТПВ можливо спалювати без додавання традиційного палива за таких параметрів: зольність <60 %, вологість <50 %, вміст горючих речовин >25 %.

Потенціал заміщення природного газу з розрахунку на місто з населенням 1 млн ос. становить 90–100 тис. м³. Питомі інвестиції, необхідні для реалізації цього способу, – 300–400 євро/т ТПВ на рік.

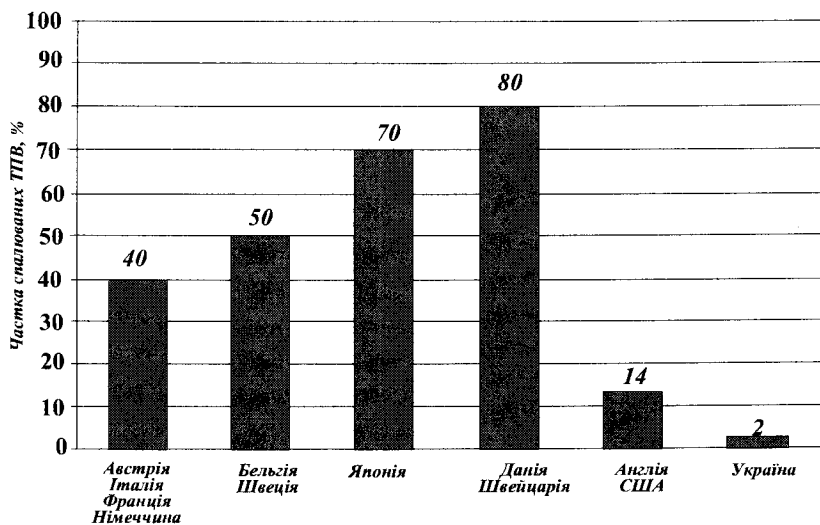


Рис. 2.4. Частка спалюваних ТПВ у різних країнах світу

2.6.2. Газифікація (піроліз)

Газифікація – розкладання ТПВ під час нагрівання без доступу або з невеликою кількістю повітря, унаслідок якого утворюються горючий газ та суміш смол (шлак). Вторинна сировина – результат сортування: вловлений метал, компост, скло і каміння, які можна використовувати у виробництві будівельних матеріалів. Блок-схему такого процесу наведено на рис. 2.5.

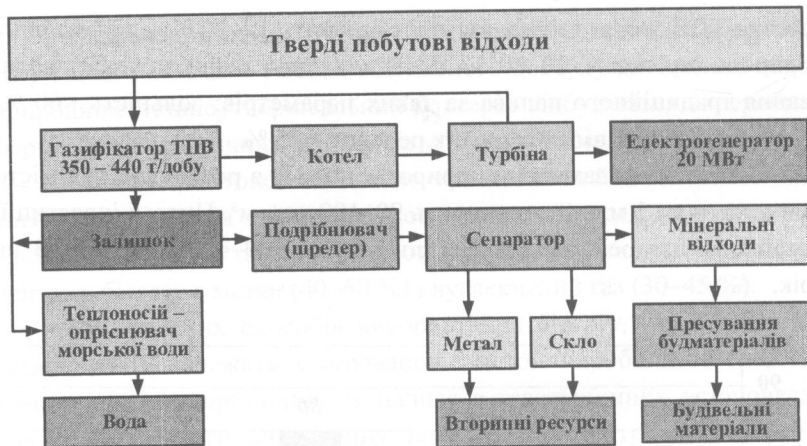


Рис. 2.5. Комплексне використання ТПВ через газифікацію

Питомі інвестиції для впровадження газифікації становитимуть 200–300 євро/т ТПВ на рік. Ефект упровадження: істотно зменшується об'єм ТПВ, менші викиди шкідливих речовин в атмосферу порівняно із прямим спалюванням ТПВ, шлак, що утворюється в процесі піролізу, не містить активних речовини, його можна захоронювати без додаткового оброблення.

2.6.3. Збирання звалищного газу

Для оцінювання якості звалищного газу і можливих обсягів його видобування необхідно здійснити пробний відбір, виконавши, як мінімум, десять свердловин (вартість однієї становить 8–12 тис. євро). Одна свердловина охоплює територію в радіусі 30–50 м. Кількість звалищного газу залежить від вмісту органічних фракцій, вологості, температури, щільності відходів тощо. Питомі інвестиції для упровадження збирання біогазу на полігонах становлять 100–120 тис. євро/т ТПВ. Вихід біогазу – 100 м³/т ТПВ.

Найрентабельнішим є збирання біогазу на полігоні, де захоронено понад 5 млн тонн відходів із висотою складування не

менше ніж 10 м. Переважно такі параметри у полігонів ТПВ міст із населенням понад 100 тис. ос. Оптимальний вік полігона для збирання біогазу – 5–10 років. Якщо витрата біогазу не менше ніж 500 м³/год, доцільно встановити когенераційну установку. Збирати біогаз необхідно упродовж не менше ніж 25 років після закриття полігона.

Наявність споживача електричної/теплової енергії поблизу полігона значно підвищує економічний ефект від спалювання звалищного газу в когенераційних установках для вироблення електричної та теплової енергії. Питома теплота згорання біогазу – в межах 4300–5400 ккал/м³ залежно від вмісту метану. Значення теплотворної здатності складових ТПВ Q_H^T (МДж/кг) різних країн світу подано в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Теплотворна здатність складових ТПВ, МДж/кг

Складові ТПВ	Німеччина	США	Росія	Середні значення
Папір	19	18,8	19,9	19
Деревина	20,7	20,3	19	20
Текстиль	19,9	18,2	16,8	17,6
Шкіра	19,9	22,8	–	21,4
Гума	19,9	29,3	30,9	26,1
Харчові відходи	20,5	23,5	18,7	20,9
Частинки, менші від 15 мм	–	20	22,8	21,5
Інші відходи	–	18,6	22,9	20,8

Використання звалищного газу може забезпечити значний економічний ефект. Зокрема, у США з метою отримання тепла та електроенергії у господарських і житлових об'єктах використовують понад 150 великих полігонів. Біогазових установок у цій країні налічується близько 244 одиниць, які продукують 4,3 млрд м³/рік. У Німеччині діє близько 4 тис. біогазових установок (половина усіх, які працюють у світі). Щороку 280 заводів виробляють біогаз

у обсязі 3,7 млн т. За прогнозами фахівців, до 2020 р. у Німеччині функціонуватиме 20 тис. біогазових установок.

У теплотехнічних розрахунках використовують нижчу теплотворну здатність на горючу масу палива, яку визначають зі співвідношення

$$Q_H^r = Q_H^p (100 - W^p - A^p) / 100, \quad (2.1)$$

де W^p , A^p – відповідно вологість і зольність на робочу масу палива, %; Q_H^p – нижча робоча теплота згорання палива, МДж/кг.

Оскільки ТПВ є сумішшю різних компонентів, сумарну теплоту згорання відходів визначають так:

$$Q_H^p = Q_{H1}^p n_1 + Q_{H2}^p n_2 + Q_{H3}^p n_3 + \dots + Q_{Hi}^p n_i, \quad (2.2)$$

де Q_{Hi}^p – нижча теплота згорання i -го компонента палива, МДж/кг; n_i – частка i -го компонента палива у загальній масі ТПВ, %.

Кількість теплоти, яку можна отримати, спалюючи ТПВ, з розрахунку на одну особу (жителя) на рік

$$Q_{\text{ЖИТ}}^{\text{РІК}} = b_1 Q_H^p \eta_{\text{УУ}}, \quad (2.3)$$

де b_1 – кількість ТПВ на одну особу на рік (приблизно 290–320 кг); $\eta_{\text{УУ}} = 0,75$ – ККД утилізаційної установки.

Річну кількість умовного палива, необхідну для забезпечення тепловою енергією однієї особи (без урахування втрат у тепловій мережі), розраховують за співвідношенням

$$B_{\text{ЖИТ}}^{\text{РІК}} = Q_{\text{СЕР}}^{\text{РІК}} / (Q_{\text{УМ.П}} \eta_{\text{УУ}}), \quad (2.4)$$

де $Q_{\text{СЕР}}^{\text{РІК}}$ – середня річна витрата теплоти, МДж; $Q_{\text{УМ.П}}$ – теплотворна здатність умовного палива, дорівнює 29300 кДж/кг.

У розрахунках палива та енергії використовують поняття умовного палива та нафтового еквівалента. Умовне паливо – одиниця обліку органічного палива, яку використовують для зіставлення ефективності різних видів палива та для їхнього сумарного обліку. Під умовним паливом розуміють уявний універсальний енергоносіє, спалюючи 1 кг якого, отримують 29300 кДж теплоти (7000 ккал). Міжнародне енергетичне агентство (ІЕА) за одиницю умовного палива прийняло тонну нафтового еквівалента (т н. е). Одна тонна нафтового еквівалента дорівнює 41,868 ГДж, 10000 ккал чи 11,63 МВт·год енергії.

Використовуючи практично відходи деревини (генераторного газу, біогазу) як вторинні енергетичні ресурси, застосовують калорійний еквівалент E (кг ум. п. / M^3), який залежить від теплоти згоряння, вологості та густини деревини

$$E = Q_H^P / 29300. \quad (2.5)$$

Перерахунок витрати з робочої маси палива B_P в масу умовного палива $B_{УМ.П}$ здійснюють за співвідношенням

$$B_{УМ.П} = B_P \frac{Q_H^P}{29300} = B_P E. \quad (2.6)$$

Для утилізації відходів лісопромислових комплексів (тирси, стружки тощо) розроблено різні типи конструкцій теплогенераторів, які застосовують для вироблення теплової енергії з метою опалення приміщень, цехів підприємства, а також для сушіння деревини. За конструкцією теплогенератори на здрібнених відходах деревини існують вертикального й горизонтального типів.

Кількість тепла, яку можна отримати від згоряння ТПВ, визначають так:

$$Q_T = Q_H^P [(100 - q_{ХІМ} - q_{МЕХ} - q_{ФІЗ} - q_{ДИС}) / (100 - q_{МЕХ})] + I_{ПОВ}, \quad (2.7)$$

де $q_{ХІМ}$, $q_{МЕХ}$, $q_{ФІЗ}$, $q_{ДИС}$ – втрати теплоти в паливні унаслідок хімічного і механічного неповного згоряння, від фізичної теплоти шлаку і дисоціації продуктів згоряння, % від можливої теплоти палива; $I_{ПОВ}$ – ентальпія повітря, яке подається у паливню

$$I_{ПОВ} = \alpha_{ПОВ} V_{ПОВ}^0 C_p' t_{ПОВ}, \quad (2.8)$$

де $\alpha_{ПОВ}$ – коефіцієнт надлишку повітря; C_p' – об'ємна теплоємність повітря; $V_{ПОВ}^0$ – кількість повітря, необхідна для спалювання 1 кг палива, визначають так:

$$V_{ПОВ}^0 = 0,0889(C^P + 0,375S^P) + 0,265H^P - 0,0333O^P, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.9)$$

Можливість промислового використання палива з біомаси можна оцінити за табл. 2.5.

2.7. Негативний вплив традиційної тепло- й електроенергетики на довкілля

За статистичними даними, приблизно 80 % всіх видів забруднення повітря спричинені енергетичними процесами (добування, перероблення й використання енергоресурсів). У всьому світі щорічно спалюють приблизно 2 млрд т вугілля, видобувають і переробляють близько 2,2 млрд т нафти, 2 млрд т рудних і нерудних матеріалів, що призводить до викидання в атмосферу 220 млн т діоксиду сірки, 450 млн т оксиду вуглецю, 75 млн т оксиду азоту, 150 млн т різних аерозолів. Теплові електростанції (ТЕС) у нашій країні виробляють 60–80 % електроенергії. Вони працюють на твердому (вугілля), рідкому (мазут) чи газоподібному (природний газ) паливі. ТЕС викидають в атмосферу близько 30 % від загального обсягу всіх шкідливих промислових викидів. Вони істотно впливають на навколишнє середовище району їх розташування і на стан біосфери загалом.

Характер забруднення повітря продуктами органічного палива визначається такими чинниками: видом палива, умовами спалювання, умовами викидання, рельєфом місцевості, віддаленістю від населених пунктів тощо.

Рівень забруднення повітря істотно залежить від теплотворної здатності палива та його хімічного складу.

Вугілля – найпоширеніший вид викопного палива на планеті. Спеціалісти вважають, що його запасів вистачить на 500 років. Під час спалювання вугілля в атмосферу потрапляють летка зола з частками незгорілого палива, сірчистий і сірчаний ангідриди, оксиди азоту, сполуки фтору, а також газоподібні продукти неповного згоряння палива. У леткій золі часто містяться шкідливі домішки – арсен, двоокис кремнію, вільний оксид кальцію, у викидах ТЕС також небезпечні оксиди важких металів, фтористі сполуки, бензопірен, що належать до канцерогенних речовин.

Сполучаючись із водяною парою в атмосфері, триоксид сірки утворює сірчану кислоту, суспензії якої дуже небезпечні. На окиснення діоксиду сірки й перетворення його на триоксид

каталітично діють суспензії металів у повітрі: заліза, цинку, марганцю. Забруднення атмосфери сполуками сірки – причина кислотних дощів.

Під час спалювання рідких палив (мазутів) із димовими газами в атмосферне повітря потрапляють сірчистий і сірчаний ангідриди, оксиди азоту, газоподібні й тверді продукти неповного згоряння палива, сполуки ванадію, солі натрію тощо. З екологічного погляду рідке паливо “чистіше”, ніж тверде. У разі його використання повністю відсутня проблема шлаковідвалів, які займають значні території, вилучаючи їх із сільськогосподарського використання, і є джерелом постійних забруднень атмосфери в районі станції через перенесення частинок золи вітрами. У продуктах згоряння рідких видів палива немає легкої золи, проте багато сполук сірки, наявність яких у атмосфері є основною причиною сумнозвісних “кислотних дощів”.

Разом з цим, спалювати нафту, за словами Д. І. Менделєєва, – все одно, що спалювати у пічці асигнації (у Росії – паперові гроші). Тому частка використання рідкого палива в енергетиці останнім часом істотно зменшується. Ця тенденція й надалі посилюватиметься у зв'язку із розширенням використання рідкого палива в інших галузях господарства: на транспорті, в хімічній промисловості.

Використання природного газу сприяє підвищенню ККД енергоустановок, зниженню затрат на їх обслуговування, різкому покращенню екологічної ситуації, особливо у великих містах. Якщо рівень забруднення атмосферного повітря за використання вугілля прийняти за одиницю, то спалювання мазуту – це 0,6, а використання природного газу – 0,2. Єдиним істотним забруднювачем атмосфери під час спалювання природного газу є оксиди азоту. Проте їх викиди в середньому на 20 % менші, ніж у разі спалювання вугілля. Отже, природний газ – екологічно найчистіший вид палива.

Потужні ТЕС відводять в річки, озера і штучні водойми велику кількість тепла із підігрітими скидними водами, що впливає на їх термічний і біологічний режим. Підвищення температури

водойм унаслідок промислових скидів гарячих вод називають тепловим забрудненням.

Отже, жоден із традиційних шляхів отримання електроенергії не є екологічно безпечним. Тому енергетика повинна розвиватися у напрямі підвищення безпеки експлуатації енергоустановок, упровадження безвідхідних технологій використання палива і розроблення альтернативних “чистих” джерел енергії.

Контрольні запитання

1. Які види енергоресурсів належать до традиційної енергетики?
2. За яким показником оцінюють енергоефективність енергоресурсів?
3. Яке підприємство називають тепловою електричною станцією?
4. За якими ознаками класифікують теплові електростанції?
5. Які види палива використовують на ТЕС, ТЕЦ?
6. Для чого призначений конденсатор на ТЕС?
7. Опишіть технологію перетворення первинної енергії речовин на електроенергію на ТЕС.
8. Що є вторинним енергоносієм на ТЕС?
9. Які типи парових турбін вам відомі; для чого застосовують парові турбіни?
10. Чим небезпечно для довкілля використання вугілля, нафти, газу в енергетиці?
11. Що таке біомаса та які її особливості?
12. Назвіть основні види біомаси та її походження.
13. Як здійснюють спалювання біомаси та які особливості цього процесу?
14. Як здійснюють газифікацію біомаси?
15. Що таке піроліз біомаси та що отримують у результаті цього процесу?
16. Як отримують біогаз?
17. Які потенціал та перспективи розвитку біогазової енергетики в Україні (світі)?
18. Назвіть основні переваги біоенергетики.
19. Які основні недоліки біоенергетики?
20. Від чого залежить теплотворна здатність твердих побутових відходів?
21. Опишіть технологічний процес спалювання ТПВ.

Розділ 3

ТРАДИЦІЙНА ТА НЕТРАДИЦІЙНА ГІДРОЕНЕРГЕТИКА

3.1. Використання гідроресурсів в Україні та у світі

Гідроенергетика – це галузь енергетики, яка використовує енергію води, що падає, чи рухомої. Джерелом енергії для гідроенергетичних установок є також хвилі та припливи в морях і океанах. Підраховано, що на Землі є 10^{18} т води, лише 1/2000 частина її щорічно залучається у кругообіг – випаровування і повернення її на поверхню землі у вигляді дощу і снігу. Розрахунки показують, що потенційна потужність гідроенергетичних ресурсів на земній кулі становить 10 ТВт, але тільки 20 % її можна рентабельно використати.

Гідроенергетику умовно поділяють на велику (традиційні потужні гідроелектростанції) та малу. Первинним джерелом енергії для малої гідроенергетики є гідропотенціал малих річок. В Україні налічують понад 63 тис. малих річок та водотоків загальною довжиною 135,8 тис. км, із яких близько 60 тис. (95 %) дуже малих (їх довжина до 10 км), їх сумарна довжина – 112 тис. км. Малих річок завдовжки 10 км і більше в Україні налічують 3212 загальною довжиною близько 74 тис. км. З них у басейні Дніпра – 1383 (43 %) і в басейні Дністра – 453 (14 %) сумарною довжиною відповідно 32,1 і 10,6 тис. км. Особлива цінність енергії малих річок полягає у тому, що вони охоплюють фактично всю територію України, але розподіл потенційних ресурсів нерівномірний. Найбільші гідроенергоресурси зосереджені в Закарпатській (приблизно 25 % всіх запасів України), Івано-Франківській (12 %), Запорізькій (10,1 %), Дніпропетровській (7,9 %), Чернівецькій і Миколаївській (по 6,2 %) та Київській (5,5 %) областях. В інших регіонах – менше ніж 5 %.

Із 63000 річок України приблизно 22 000 малих річок, на яких можливо побудувати міні- і мікрогідроелектростанції потужністю від 10 до 1000 кВт із напором від 3 до 10 м. Окрім цього, є

260 водосховищ місткістю 10–100 млн м³, придатних для побудови різних ГЕС потужністю від 500 до 2 000 кВт із напором 5–10 м. Такі ГЕС не порушують біологічних і гідрохімічних процесів, фактично не впливають на природний режим течії води, на русло річки та стан берегів. Вони сприяють регулюванню рівня води в шарах Землі, зменшенню ерозії ґрунтів. Як енергетичні об'єкти малі ГЕС є джерелом стабілізації енергосистеми у разі порушення її функціонування, а також сприяють конкурентоспроможності в умовах зростання цін на органічне паливо.

Потужність усіх світових ГЕС на 1980 р. становила близько 500 ГВт або 0,5 ТВт. Потужність більшості електростанцій перевищувала 10 МВт. Сьогодні потенційна можливість гідроенергетики оцінюється потужністю до 1,5 ТВт. ГЕС належать до структур, які працюють довговічно (зношуваність турбін понад 50 років), економічно (вартість електроенергії низька), високопродуктивно – ККД гідротурбіни становить 90 %, а також уможливають швидке регулювання генерованої електроенергії.

Мала гідроелектрогенерація набула поширення у багатьох розвинених країнах Європи та світу – у Швейцарії відсоток виробництва електроенергії на малих ГЕС становить 8,3 %, в Іспанії – 2,8 %, у Швеції – майже 3 %, а в Австрії – 10 %. Ще більше вражають показники, яких вдалося досягти Китаю: близько 18–20 % всієї електроенергії тут виробляють більше ніж 80 тисяч малих ГЕС. Показники сучасного стану малої гідроенергетики України наведено у табл. 3.1.

Особливістю виробництва гідроенергії є його залежність від водності району та водостоку, що характеризується величиною середньорічного стоку із 1 км² території. Серед географічних чинників, що впливають на гідроенергетичний потенціал території, головними є кількість атмосферних опадів та їх режим, а також рельєф території. Надходження атмосферних опадів на території України зменшується із північного заходу на південний схід, що спричинено західним перенесенням повітряних мас та збільшенням атмосферного тиску в південному напрямку. Особливості рельєфу

території безпосередньо впливають не тільки на гідропотенціал, що є прямо пропорційним до перепаду висот на окремій ділянці, а також на кількість опадів, підвищену на західних схилах гір та височин України.

Таблиця 3.1

Стан малої гідроенергетики України

Область	Кількість	Потужність, МВт	Виробництво електроенергії, тис. МВт·год/рік	Частка від загального виробництва, %
Вінницька	19	22,45	59,60	28,37
Дніпропетровська	0	0	0	0
Житомирська	14	2,87	7,62	3,63
Закарпатська	6	7,98	21,2	10,9
Івано-Франківська	4	2,57	685	3,26
Кропивницька	5	12,55	33,33	15,87
Київська	3	1,84	4,9	2,33
Львівська	1	0,45	1,2	0,57
Миколаївська	0	0	0	0
Полтавська	5	1,66	4,4	2,09
Рівненська	2	1,16	3,08	1,47
Сумська	4	1,13	3,00	1,43
Тернопільська	9	8,47	22,5	10,71
Харківська	1	3,68	9,77	4,65
Херсонська	0	0	0	0
Хмельницька	14	4,52	12,00	5,71
Черкаська	9	6,52	17,35	8,26
Чернігівська	1	0,23	0,62	0,3
Чернівецька	1	1,00	2,66	1,27
Разом	98	79,08	210,08	100

Використання гідроресурсів рік, що протікають рівнинними територіями, спричиняє затоплення великих площ території, що обмежує їх використання для сільськогосподарського виробництва.

Порівняння водноенергетичних характеристик ГЕС України й окремих країн Європи наведено у табл. 3.2. Усі великі ГЕС України характеризуються високим співвідношенням площі дзеркала водосховища до установленної потужності агрегатів за фактично однакового напору води.

Таблиця 3.2

Водноенергетичні характеристики ГЕС України і світу

Гідроелектро-станція	Ріка	Площа водосховища S_B , км ²	Установлена потужність $P_{УСТ}$, МВт	$S_B/P_{УСТ}$, км ² /МВт	Напір H , м
Каховська	Дніпро	2155	351	6,140	13,8
Кременчуцька	Дніпро	2250	632,9	3,555	14,2
Київська	Дніпро	922	408,5	2,257	12,0
Канівська	Дніпро	675	444	1,520	11,0
Середньо-дніпровська	Дніпро	567	352	1,611	10,5
Дніпровська	Дніпро	410	1569	0,267	34,3
Greifenstein, Австрія	Дунай	10	293	0,034	12,6
Ybbs-Persenbeug, Австрія	Дунай	10	236,5	0,042	10,9
Gervans, Франція	Рона	3	120	0,025	11,5
Caderousse, Франція	Рона	9,5	156	0,061	8,6
Kembs, Франція	Рейн	2,8	156	0,018	13,2

Підрахунок потенційних гідроенергетичних ресурсів, що визначає загальні запаси гідравлічної енергії на всій території країни, дає змогу встановити, на яких річках варто насамперед використовувати гідравлічну енергію. Необхідно знати розподіл запасів гідравлічної енергії на території, щоб чітко з'ясувати питомі величини потенційної потужності, що визначають:

- на метр перепаду дна;
- на кілометр довжини річки;
- на квадратний кілометр басейну річки.

Перші два показники є інтенсивними, останній – екстенсивним параметром гідроенергопотенціалу території.

До середніх належать річки з площею басейну 2000–50000 км², до малих річок – із меншою за 2000 км².

Потенційні гідроенергетичні ресурси малих річок розподілені на території України надзвичайно нерівномірно. У гірських областях (Львівській, Закарпатській, Івано-Франківській і Чернівецькій) зосереджено 71,7 % усіх енергетичних ресурсів малих річок, а в семи областях Подільської височини (Вінницькій, Житомирській, Київській, Кіровоградській, Тернопільській, Хмельницькій та Черкаській) – лише 14,2 %. Херсонська і Запорізька області майже не мають потенційних запасів енергії малих річок.

З урахуванням запасів енергії ріки Сіверський Донець у Харківській і Луганській областях сконцентровано близько 3,6 % від усіх запасів такої енергії країни. У лівобережній частині України (Полтавська, Сумська і Чернігівська області) зосереджено 4,5 %, а в решті областей 5,7 % запасів енергії малих річок країни, чи менше ніж 1 % на область.

На частину приток річок Дністра, Тиси, Пруту та Південного Бугу припадає 82 % усіх гідроенергетичних ресурсів України малих річок, а загалом, з урахуванням правобережних приток Дніпра й Прип'яті, у західній частині України зосереджено близько 90 % усіх запасів гідроенергії.

Протягом зимових місяців гідропотенціал за територією змінюється значно менше, ніж упродовж весняних місяців під час повені, коли максимальні значення потенціалу в сто разів перевищують мінімальні значення. Загалом протягом року гідропотенціал змінюється однаково в усіх районах країни, що спричинено дією однакових факторів, які визначають гідропотенціал.

3.2. Класифікація та типи гідроелектростанцій

Енергія води, яка падає, на ГЕС перетворюється на механічну енергію обертання ротора турбіни і генератора та на електричну енергію в електромагнетному полі генератора.

Якщо W_B – об’ємна витрата води, що падає на лопаті турбіни за одиницю часу, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ_B – густина води, $\text{кг}/\text{м}^3$, то добуток $\rho_B \cdot W_B$ визначає масу води, що падає на лопаті турбіни за одиницю часу. Потужність води, яка падає:

$$P_0 = \rho_B \cdot W_B \cdot g \cdot H, \quad (3.1)$$

де g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; H – висота падіння води (напір), м.

Щоб досягти великого значення потужності, потрібні доволі висока витрата W_B і якомога більший напір H води. Також бажано, щоб був високий річний рівень опадів (не менше ніж 40 см) і водосховище, а це потребує вкладення певних коштів у спорудження дамби, водоводів (до турбін) тощо.

За потужністю малі ГЕС поділяють на:

- мікрогідроелектростанції – потужністю до 100 кВт;
- мінігідроелектростанції – потужністю до 1000 кВт;
- малі гідроелектростанції – потужністю від 1 МВт до 30 МВт.

Потужність водного потоку визначають за формулою

$$P = 9,81 \frac{Q_{\text{п}} + Q_{\text{к}}}{2} H, \text{ кВт}, \quad (3.2)$$

де $Q_{\text{п}}$, $Q_{\text{к}}$ – витрати води в річці відповідно на початку та у кінці ділянки, $\text{т}/\text{с}$; H – висота падіння води (напір) на ділянці, м.

За міжнародною класифікацією (норматив ООН) до малих електричних станцій (МГЕС) зараховують станції потужністю від 1,0 до 30 МВт, до мінігідроелектростанцій – від 100 до 1000 кВт, до мікрогідроелектростанцій – не більше ніж 100 кВт.

За використанням водних ресурсів і концентрацією напорів, як стверджує “Екологічна енциклопедія”, ГЕС поділяють на: руслові, пригреблеві, дериваційні, гідроакумулявальні та припливні.

Руслові ГЕС – це зазвичай низьконапірні станції, у яких напір води створюється безпосередньо спорудженням греблі, що повністю перегороджує річку і піднімає рівень води на потрібну висоту. Будівля ГЕС входить до складу греблі й безпосередньо підвищує рівень води. Інколи це єдина споруда, здатна пропускати воду, оскільки в греблі не передбачено інших спеціальних водоспускних отворів чи шлюзів. Такі гідрооб’єкти будують на повноводних рівнинних та гірських річках, у місцях, де є вузьке русло з високими берегами.

Пригреблеві ГЕС – високонапірні станції, в яких будівля ГЕС розташована за греблею, в її нижній частині. Воду до турбін станції подають через спеціальні напірні лотки чи тунелі, а не безпосередньо, як у руслових. Висота греблі в цьому разі значно більша, ніж у руслових ГЕС, інколи це навіть дві греблі. Обмежувальним чинником висоти греблі й водночас потужності таких ГЕС є площа затоплення і підтоплення навколишніх земель.

Дериваційні ГЕС – станції, напір води для яких створюють за допомогою напірної чи безнапірної деривації. Під деривацією у гідротехніці розуміють сукупність гідротехнічних споруд, що відводять воду із річки, водосховища або іншої водойми і підводять її до відповідних гідротехнічних споруд. Розрізняють такі типи дериваційних споруд – безнапірні (канал, тунель, лоток) і напірні (трубопровід, напірний тунель). Напірний тип застосовують тоді, коли є істотні (більше від кількох метрів) сезонні чи тимчасові коливання рівня води в місці її забору. Воду трубою, каналом чи лотком відводять з русла на певну відстань до споруди ГЕС, яка розташована нижче за течією. Такі станції доцільно будувати у тих місцях, де великий нахил річки. У разі напірної деривації водовід прокладають під великим похилом чи ж будують греблю, яка створює водосховище, – це змішана деривація, бо використовує два способи створення необхідної концентрації води.

Гідроакумульовальні ГЕС здатні використовувати надлишкову електроенергію у системі для створення необхідного запасу (акумулювання) води у верхньому водосховищі та генерувати електроенергію в періоди інтенсивнішого її споживання, використовуючи акумульовану воду.

Виробництво електричної енергії на електростанціях та її споживання різними приймачами – це взаємопов'язані процеси і потужність споживання електроенергії у будь-який момент часу повинна дорівнювати генерованій потужності.

Графік навантаження деякого району чи міста, що є відображенням зміни в часі сумарної потужності всіх споживачів, має мінімуми та максимуми. Це означає, що в окремі години протягом доби необхідна велика сумарна потужність генераторів, а

в інші години частина генераторів чи й електростанцій повинні бути вимкнені чи працювати зі зменшеним навантаженням.

Енергетики прагнуть вирівнювати графік сумарного навантаження споживачів. Але можливості вирівнювання споживання електричної енергії невеликі. Тому електричні системи повинні бути достатньо маневреними, здатними швидко змінювати потужності електростанцій. Незбалансована структура генеруючих потужностей Об'єднаної енергетичної системи України із істотним перевищенням базових потужностей ТЕС і АЕС та малим обсягом маневреної потужності ГЕС, ГАЕС істотно утруднює регулювання графіків навантаження, що призводить до зниження стійкості та надійності її роботи.

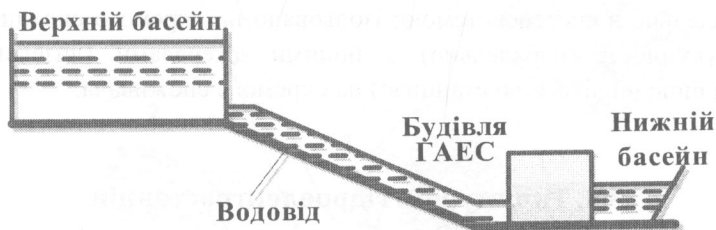
Теплові електричні станції не використовують для регулювання потужності, оскільки парові котли та турбіни цих станцій допускають зміну навантаження лише у межах 10–15 %. Різкозмінний режим роботи таких електростанцій призводить до зниження їхньої надійності. Це ще більшою мірою стосується й АЕС.

Сьогодні й у найближчому майбутньому дефіцит маневрових потужностей (під час “піку” навантаження) покривають ГЕС, у яких повну потужність можна набрати за 1–2 хв. У періоди, коли в системі виникають провали навантаження, ГЕС працюють з обмеженою потужністю і вода заповнює водосховище. З досягненням піків навантаження агрегати станції виводять на повну потужність генерування електроенергії.

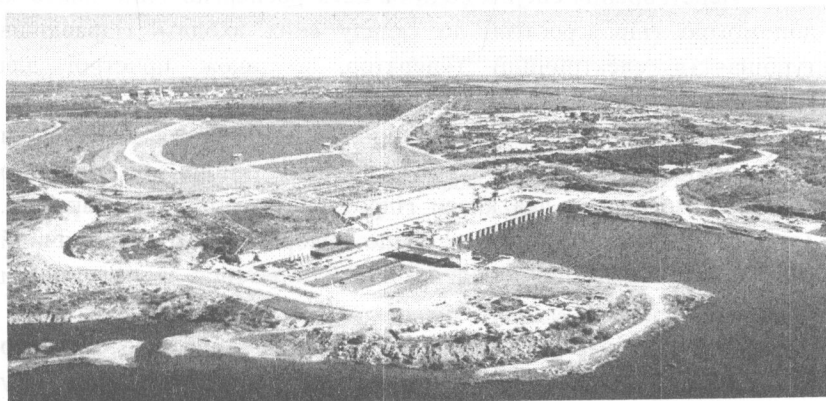
Накопичення енергії у водосховищах на рівнинних ріках призводить до затоплення великих територій, що в багатьох випадках дуже небажано. Невеликі ріки непридатні для регулювання потужності в системі, оскільки не можуть вчасно акумулювати достатньо води у водосховищі.

Під час піків споживання електроенергії її доцільно генерувати ГАЕС. Акумулювання енергії – це накопичення її під час зменшення електричного навантаження для подальшого перерозподілу і використання її відповідно до потреб енергосистеми. Під час режиму акумулювання електрична енергія перетворюється на

інші види енергії, а потім за потреби знову на електричну. Акумуляція енергії можна здійснювати електрохімічними, тепловими та гідравлічними установками. Гідроагрегати ГАЕС (рис. 3.1) у період мінімального навантаження системи працюють як помпа і заповнюють водою верхню водойму, а у піковий період електроспоживання агрегати генерують електроенергію, використовуючи накопичений запас води. Тобто робота ГАЕС не залежить від водності року, бо використовують ту саму воду, переміщуючи її із одного басейну в інший за потребою. У помповому режимі ГАЕС споживає від енергосистеми порівняно дешеву електроенергію під час нічного мінімуму графіка навантаження системи і генерує дорогу електроенергію у періоди максимуму навантаження.



а



б

Рис. 3.1. Схема (а) та загальний вигляд гідроакумуляційної електростанції (б)

Відношення кількості енергії, виробленої у генераторному режимі, до кількості енергії, спожитої у помповому режимі, визначає ККД ГАЕС. Перші ГАЕС мали ККД не більше ніж 40 %, а у сучасних – 70–75 %.

Отже, функції ГАЕС в енергосистемі такі: покриття піків навантаження; підвищення мінімального навантаження енергосистеми; швидкодійне аварійне резервування потужності; джерело реактивної потужності та енергії; сприяння поліпшенню режимів роботи теплових та атомних станцій; мінімальний вплив на довкілля.

До переваг ГАЕС належить також порівняно низька вартість будівельних робіт. ГАЕС вигідно компонувати разом із вітровими ЕС.

За режимом роботи ГЕС поділяють на такі, що працюють: паралельно з енергосистемою; ізольовано на окремого споживача; у сукупності (паралельно) з іншими джерелами (дизельною, сонячною чи вітровою станцією) на окремого споживача.

3.3. Типи турбін гідроелектростанцій

Перетворення енергії води на електроенергію здійснюють за допомогою гідроагрегатів, до складу яких входять гідравлічна турбіна та електричний генератор, а також пристрої для контролювання і регулювання потоку енергії.

Гідравлічна турбіна – це машина, у якій енергія потоку води перетворюється на обертову енергію руху ротора або робочого колеса. Розрізняють два класи гідротурбін: активні й реактивні. Турбіну називають активною, якщо використовують динамічний тиск води, і реактивною, якщо статичний тиск із реактивним ефектом.

Ротори активних турбін обертаються під дією вільного струменя води на вході й на виході робочого колеса. У робочому колесі турбіни використовують тільки кінетичну енергію потоку:

$$W = \frac{(W_1^2 + W_2^2)}{2}, \quad (3.3)$$

де W_1 – відповідно енергія потоку води на вході й на виході робочого колеса.

У ковшовій активній турбіні потенціальна енергія гідростатичного тиску в звуженій частині трубопроводу – соплі – повністю перетворюється на кінетичну енергію руху води. Робоче колесо турбіни виконано у вигляді диска, по колу якого розташовані ковшеподібні лопаті (рис. 3.2).

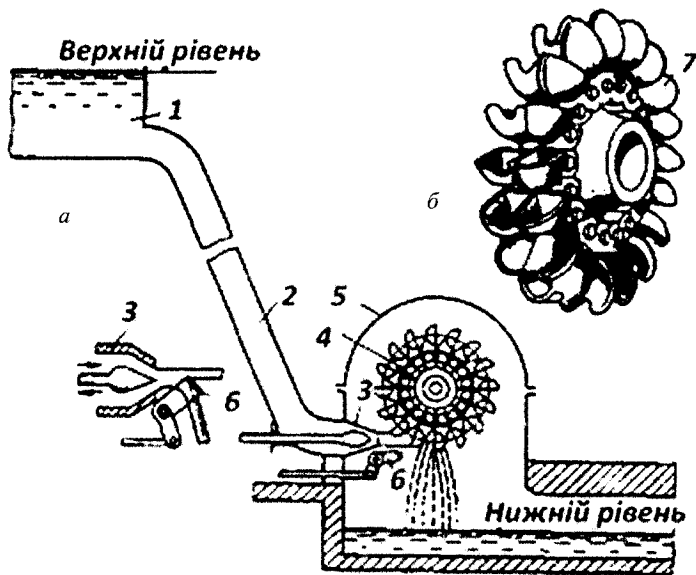


Рис. 3.2. Активна гідротурбіна (турбіна Пелтона):
 а – схема турбінного пристрою; б – робоче колесо;
 1 – верхній рівень води; 2 – трубопровід; 3 – сопло;
 4 – робоче колесо; 5 – корпус; 6 – пристрій
 спускання води; 7 – лопаті турбіни

Коли вода, обтікаючи поверхні лопатей, змінює напрям руху, виникають відцентрові сили, що діють на поверхні лопатей, і енергія руху води перетворюється на енергію обертання колеса турбіни. Якщо швидкість руху води, яка витікає з турбіни, дорівнює нулю, то вся кінетична енергія води, не враховуючи втрат, перетворюється на механічну енергію турбіни. Всередині

сопла розташована регулювальна голка, переміщенням якої змінюють вихідний переріз сопла і витрату води.

У реактивній гідротурбіні на лопатях робочого колеса як кінетична, так і потенціальна енергія води перетворюється на механічну енергію турбіни (рис. 3.3).

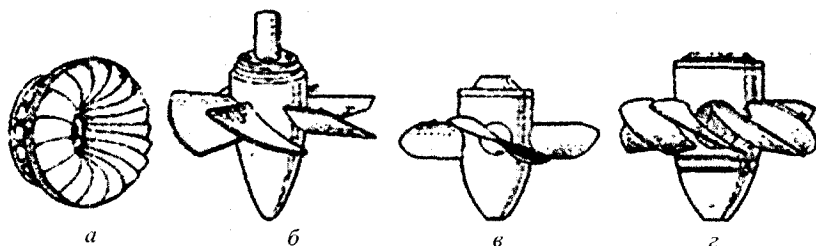


Рис. 3.3. Типи реактивних турбін: а – радіально-осьова; б – пропелерна; в – поворотно-лопатева; г – поворотно-лопатева двоперова

Кривизною лопатей змінюють напрям потоку води, за якого, як і в активній турбіні, кінетична енергія води в результаті дії відцентрових сил перетворюється на механічну енергію турбіни. Робоче колесо реактивної турбіни повністю занурене у воду, тобто потік води надходить одночасно на всі лопаті робочого колеса. Конструкція реактивних гідротурбін:

- ✓ радіально-осьові – лопаті зі складною кривизною, тому вода поступово змінює напрям із радіального на осьовий (для напору від 30 до 60 см);

- ✓ пропелерні – проста конструкція і високий ККД, але зі зміною навантаження ККД різко зменшується;

- ✓ поворотно-лопатеві – лопаті робочого колеса повертаються для зміни режиму роботи і підтримання високого значення ККД;

- ✓ двоперові – робочі лопаті спарені, що дає змогу підвищити витрату води, не поширені через складність конструкції;

- ✓ діагональні – робочі лопаті повертаються відносно своїх осей.

На рис. 3.4 наведено типи турбін, застосовувані у малій гідроенергетиці.

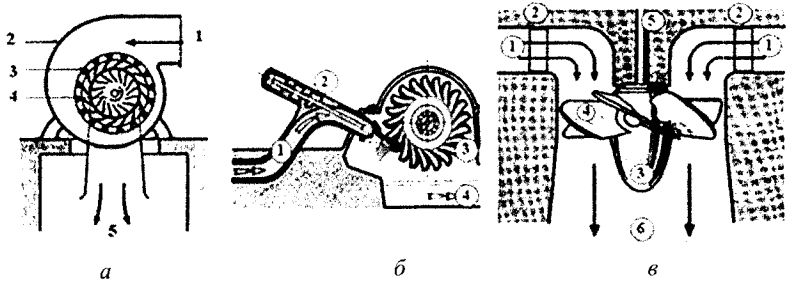


Рис. 3.4. Турбіни малої гідроенергетики:

- a* – турбіна Френсіса (1 – подавання води, 2 – корпус турбіни, 3 – регулювальний напрямний апарат, 4 – робоче колесо, 5 – витік води); *б* – турбіна Пелтона (1 – подавання води, 2 – вхідний отвір, 3 – робоче колесо, 4 – витік води); *в* – турбіна Каплана (1 – подавання води, 2 – регулювальний напрямний апарат, 3 – ступиця робочого колеса, 4 – лопаті робочого колеса, 5 – вал робочого колеса, 6 – витік води)

За напору понад 10 м переважно використовують турбіни Френсіса (рис. 3.4, *a*). Вони стійкі до кавітації (кавітація – утворення всередині рідини порожнин, заповнених газом, паром чи їх сумішшю (кавітаційних бульбашок), тобто порушення суцільності рідини), завдяки цьому не потрібно глибоко занурювати ротор. Вода з верхнього резервуара тисне на регулювальні лопаті й спочатку прискорює, а потім підтримує частоту обертання турбіни. Турбіна Френсіса – це реактивна турбіна: потік води, проходячи через неї, розширюється. Потенціальна енергія води перетворюється на кінетичну енергію обертання ротора.

Турбіни Пелтона (рис. 3.4, *б*) застосовують на малих ГЕС. Ця турбіна подібна до ківшового колеса, але з подаванням потоку води перпендикулярно до лопатей. Замість простих лопатей тут застосовують спеціально профільовані лопаті у формі двох чаш. Турбіни Пелтона з вертикальними і горизонтальними валами застосовують на ГЕС із великим напором води (понад 50 м).

Турбіна Каплана (рис. 3.4, в) – це різновид пропелерної турбіни. Змінюючи нахил лопатей під час роботи, можна регулювати потужність турбіни і підвищувати ККД. У турбіні Каплана від трьох до десяти лопатей, її застосовують за напору від 1,5 до 80 м. Максимальна потужність однієї турбіни близько 130 МВт.

На електростанціях турбіна і генератор розташовані на спільному валу. Частота його обертання не може бути довільною, а залежить від кількості пар полюсів ротора генератора та частоти змінного струму, яка повинна відповідати стандартній. Крім того, необхідно враховувати, що за невеликих частот обертання турбіни стають громіздкими та недешевими. Потужності турбін змінюються від декількох кіловат до 500 МВт, а частота обертання – від $16^{2/3}$ до 1500 об./хв.

Останнім часом застосовують горизонтальні агрегати (капсульні), в яких генератор розташований у герметичній капсулі, що обтікається водою. ККД таких агрегатів близько 95–96 % завдяки кращим гідравлічним умовам обтікання (Київська, Канівська ГЕС).

Споруджуючи ГЕС, виконують комплекс народногосподарських завдань. Окрім виробництва електроенергії, передбачають регулювання стоку води, покращення судноплавства ріки, створення зрошувальних масивів, розвиток енергомістких виробництв тощо.

3.4. Малопотужна гідроенергетика

В Україні почали застосовувати малі- та мікрогідроелектричні агрегати для автономних і малопотужних споживачів. Такі агрегати, встановлені на малих річках, потребують мінімальних капітальних затрат на будівельні та монтажні роботи та використовують великі потенційні можливості виробництва найдешевшої електроенергії.

Спорудження малих гребель і загат для енергоагрегатів дає змогу створити значні запаси води у верхів'ях річок з метою водорегулювання протягом року.

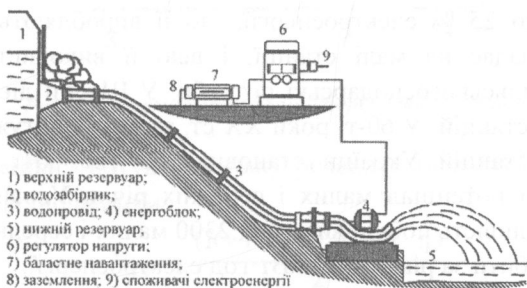
3.4.1. Мікрогідроелектростанції

Для індивідуальних автономних споживачів у країні виготовляють мікрогідроелектростанції різних типорозмірів (табл. 3.2).

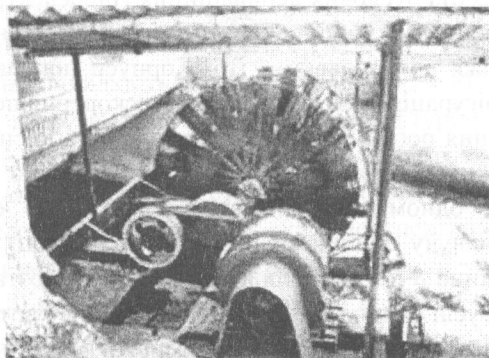
Таблиця 3.3

Характеристики мікрогідроелектростанцій

Параметри	Групи типорозмірів мікрогідроелектростанцій			
	I	II	III	IV
Потужність, кВт	0,25–0,5	1–2	3–4	5–6
Напір, м	2–3,7	5,5–7	10–11,7	12
Витрата, л/с	12–32	4–46	70–72	76–78
Напруга, В	12/220	12/220	220	220/380
Маса, кг	10–35	45–47	7–74	80–85



a



б

Рис. 3.5. Схема (а) та варіант виконання мікрогідроелектростанції (б)

За сучасних цін на електроенергію собівартість енергії, виробленої на мікрогідроелектростанціях, в 1,5–2 рази нижча, ніж на вугільних теплових електростанціях. Для невеликих виробництв і для індивідуальних споживачів, які мають змогу використати гідроресурси зі своїх околиць, можна застосувати традиційну схему мікрогідроелектростанцій (рис. 3.5).

Досвід спорудження мікрогідроелектростанцій у багатьох країнах світу підтверджує їх ефективність, не тільки енергетичну, а й для збереження та відтворення вже порушених природних середовищ і екосистем.

3.4.2. Мінігідроелектростанції

Близько 25 % електроенергії, що її виробляють на ГЕС в Японії, припадає на малі станції, і всю її використовують на побутові й сільськогосподарські потреби. У Швеції діє 1200 мінігідроелектростанцій. У 60-ті роки ХХ ст. загальна потужність мінігідроелектростанцій України становила 65 тис. кВт. Оцінивши енергетичний потенціал малих і середніх річок України, фахівці виявили можливість побудови понад 2300 малих і середніх ГЕС, які можуть виробити за рік 4 млрд кВт·год електроенергії.

Перспективним для малих ГЕС (МГЕС) є використання плавучих (рис. 3.6) і руслових дериваційних гідроелектростанцій.

У плавучих ГЕС турбінне колесо 1 встановлено на опорах 2 і 3, які спираються на поплавки 4 і 5. Корпуси поплавків повинні мати таку конфігурацію, яка забезпечує прискорення потоку води в зоні розташування робочих лопатей турбіни. Для посилення цього ефекту до нижньої частини поплавків прикріплено профільний збірник 6. На одному із поплавків встановлено електричний генератор 7. Плавучу станцію розташовують у потоці води річки і за допомогою линв 8 і 9 закріплюють до анкерів, розташованих на берегах чи в руслі річки. Гнучкі линви забезпечують підтримання станції на постійному рівні відносно поверхні потоку води, який змінюється залежно від пори року, випадання дощів чи інших чинників.

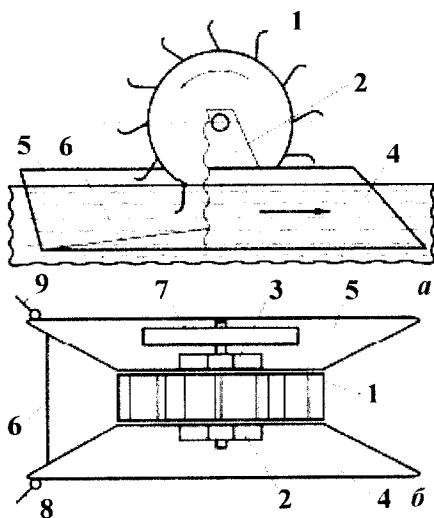


Рис. 3.6. Схема плавучої мінігідроелектростанції

Ефективну потужність, яку розвиває така турбіна, визначають за співвідношенням

$$N_{\text{ЕФ}} = \frac{(K \cdot F \cdot \rho_{\text{В}} \cdot v^3 \cdot n \cdot \eta)}{2}, \quad (3.4)$$

де K – коефіцієнт, що залежить від форми тіла; F – площа найбільшого перетину тіла в площині, перпендикулярній до напрямку потоку рідини ($F = 0,02 - 0,1 \text{ м}^2$); $\rho_{\text{В}}$ – густина води, кг/м^3 ; v – відносна швидкість лопаті у воді; n – кількість лопатей, занурених у воду; η – коефіцієнт корисної дії турбіни ($0,5 - 0,75$).

Робоче колесо турбіни в таких ГЕС розвиває швидкість 30–100 об./хв. На таких станціях необхідно використовувати тихохідні електрогенератори, з яких перспективними є машини постійного і змінного струму, зокрема, синхронні.

Реальні можливості реконструкції малих ГЕС, що не діють, а також побудови нових станцій визначив Укргідропроєкт у 1985 р.: планували до 2000 р. побудувати 14 і відновити 55 станцій загальною потужністю 165 МВт. Сьогодні не втрачено можливості

реалізації цих планів. Потужності українських підприємств (Турбоатом, Мотор-Січ, Електроважмаш, Сумський насосний завод) здатні забезпечити серійне виробництво гідротурбін, гідронасосів, гідрогенераторів та іншого обладнання для малої енергетики. Тільки за рахунок виробництва гідротурбін потужністю від 25 до 500 кВт (напори 5–15 м) можливо забезпечити 50 % потреб України в агрегатах для МГЕС.

Питомі витрати на спорудження нових мінігідроелектростанцій і МГЕС становлять \$ 600–700, на відновлення станцій – \$ 350–400. Власна машинобудівна база держави повністю забезпечує можливість спорудження таких гідроелектростанцій на малих і середніх річках України загальною потужністю 1000 МВт зі щорічним виробництвом до 4 млрд кВт·год електроенергії.

Понад 25 % цієї електроенергії можна одержати у західному регіоні (на ріках Тиса і Прут).

3.5. Гідроенергія хвиль та припливів–відпливів

3.5.1. Використання енергії хвиль

Потужність хвиль у глибокій воді пропорційна до квадрата їх амплітуди і періоду коливань хвилі. Для хвильової енергетики доцільно використовувати довгоперіодні ($T = 10$ с) хвилі з великою амплітудою ($A = 2$ м), які дають змогу отримати з одиниці довжини гребеня хвилі від 50 до 70 кВт/м. Істотно, що амплітуда хвилі не залежить від її довжини, швидкості переміщення, періоду, а залежить від характеру взаємодії вітру з морською поверхнею.

Звичайно в морі спостерігають нерегулярні хвилі зі змінними частотою, напрямом і амплітудою. Тому розвиток хвильової енергетики супроводжується певними труднощами, оскільки:

- у хвиль нерегулярні амплітуда, фаза і напрям руху;
- завжди є вірогідність виникнення екстремальних штормів і ураганів (раз на 50 років утворюються хвилі, амплітуда яких у десять разів перевищує середнє значення, тому конструкції енергоустановки повинні витримувати стократне перевантаження);

– якщо переважно період хвилі $T = 5-10$ с (тобто частота близько 0,1 Гц), важко створити умови генерування електроенергії з промисловою частотою (потрібне 500-кратне перетворення частоти);

– дуже складно вибрати тип пристрою для перетворення енергії, реалізації пересилання її на берег, спосіб утримання енергетичної установки у заданому стійкому положенні.

Перевага хвильової енергетики в її сконцентрованості, доступності для перетворення і прогнозованій ефективності залежно від погоди.

3.5.2. Використання енергії морських течій

Під час припливів і відпливів утворюються припливні течії, швидкість яких між островами чи в прибережних протоках досягає 5 м/с. Періоди припливних коливань – 24 год 50 хв (добові) або 12 год 25 хв (півдобові). Висота припливів змінюється у межах 0,5–10 м.

Доцільні відбирання і перетворення енергії сильних течій припливів. Спосіб та пристрої перетворення цієї енергії подібні до тих, що використовують енергію течії води у річках (рис. 3.7).

Густина потужності потоку води, Вт/м², обчислюють за формулою

$$q = \rho \frac{V^3}{2}, \quad (3.5)$$

де ρ – густина морської води, кг/м³ (у Середземному морі густина 1020,9 кг/м³, у Чорному морі – 1013,9, у Північному – 1026, 4); V – швидкість течії, м/с.

Швидкість припливної течії змінюється у часі за таким законом:

$$V = V_0 \sin(2\pi t/\tau), \quad (3.6)$$

де V_0 – максимальна швидкість течії, м/с; τ – період природного припливу, 12 год 25 хв для півдобового.

Коефіцієнт використання енергії течії фактично не перевищує 40 %.

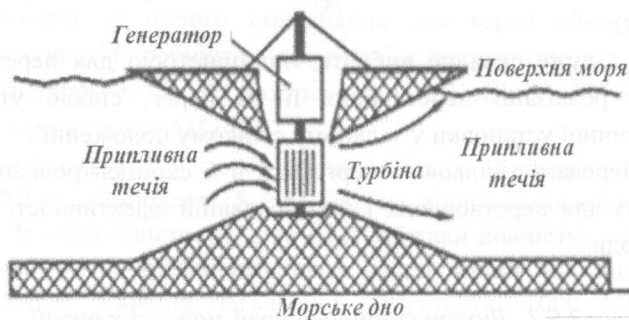


Рис. 3.7. Використання енергії течії приливів і відливів

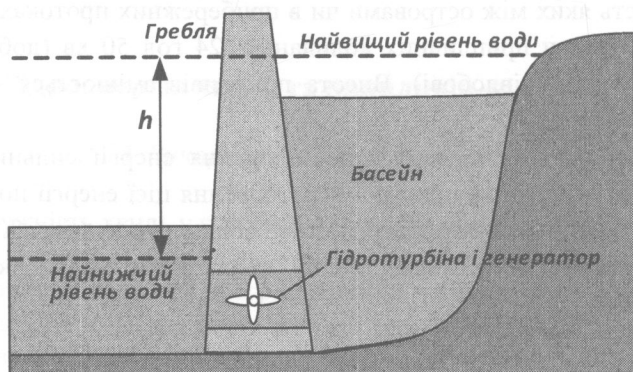


Рис. 3.8. Використання енергії приливів утворенням запасу води у басейні

Електрична потужність, яку можна отримати з 1 м^2 площі поперечного перерізу потоку (з урахуванням ефективності перетворення енергії водного потоку на електричну 40 %), у середньому дорівнює

$$q \approx 0,1\rho V^3 \quad (3.7)$$

За максимальної швидкості течії 5 м/с з 1 м² площі поперечного перерізу потоку можна отримати електричну потужність до 14 кВт. Отже, на площі 1000 м² середня потужність електростанції становитиме близько 14 МВт (рис. 3.7).

На рис. 3.7 наведено схему, що дає змогу використовувати енергію води як під час припливу, так і під час відпливу за допомогою реверсивних агрегатів. За такої схеми енергію припливів–відпливів використовують повніше.

3.5.3. Використання енергії припливів

Різницю рівнів між послідовними найвищим і найнижчим рівнями води називають висотою припливу R . Під час припливу підняту на висоту воду можна відділити від моря дамбою і зосередити в нагромаджувальному басейні (рис. 3.8), а під час відпливів, пропускаючи цю масу води через турбіну, отримати певну потужність.

Переважаю греблею перегороджують затоку моря. Якщо площа відгородженої затоки F , то маса води, що надійшла в утворений басейн, дорівнює

$$m = \rho FR, \quad (3.8)$$

де R – різниця рівнів високої та низької води під час припливів–відпливів.

Ця маса зосереджена у центрі ваги на висоті $R/2$ від рівня низької води (рис. 3.9), вона витікає з басейну, коли вода низька. Тоді потенціальна енергія припливу дорівнює

$$E = \rho FRg \frac{R}{2}. \quad (3.9)$$

Якщо енергію відгородженої у басейні води використано протягом періоду відпливу, то середня потенційна потужність за припливний період дорівнюватиме

$$P = \frac{\rho FRg}{2\tau} = \frac{\rho FgR^2}{2\tau}. \quad (3.10)$$

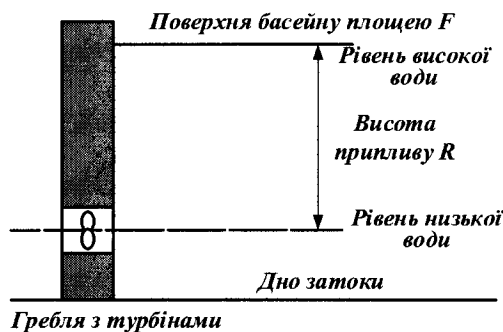


Рис. 3.9. Схема використання припливної енергії

Практична ефективність використання запасу води басейну знижується, оскільки генерування енергії можливе за умови низької води, а також невисокого напору води. Унаслідок цього неможливо рівномірно забезпечувати споживачів електроенергією.

Якщо площа басейну 10 км^2 , висота припливу 4 м , за умови півдобового періоду середнє значення потужності досягатиме 17 МВт . У світі потужність великих електростанцій сягає 240 МВт (електростанція "Ранс", Франція).

Перетворення припливної енергії пов'язане з певними труднощами:

- ✓ періоди припливів (добові та півдобові), залежні від руху Місяця, не узгоджені з періодом сонячної доби (24 год), тому оптимум припливної генерації не у фазі з потребами людей в енергії;
- ✓ зміни висоти припливів і потужності припливної течії (з періодом два тижні) породжують коливання виробництва електричної енергії;
- ✓ у потоках води з великими витратами і малим перепадом висоти потрібно використовувати багато турбін і вмикати їх на паралельну роботу;
- ✓ необхідні великі капітальні затрати на спорудження припливних електростанцій.

На практиці отримати максимальну потенціальну потужність від нагромадженої в басейні води не вдається внаслідок таких причин:

- ✓ неможливо забезпечити генерування електроенергії із низьким рівнем води в басейні;
- ✓ ефективність роботи турбіни невисока через низький напір і великі швидкості потоків;
- ✓ вироблення електричної енергії нерівномірне у часі.

3.6. Генератори електричної енергії на гідроелектростанціях

На малих гідроелектростанціях застосовують чи асинхронні трифазні генератори, чи синхронні трифазні генератори змінного струму. Вал генератора може бути з'єднаний з турбіною безпосередньо або через зубчастий чи пасовий редуктор. Синхронні генератори застосовують переважно на великих гідроелектростанціях. Асинхронні генератори установлюють на малих ГЕС без резервного живлення. Вони складаються із нерухомого статора та рухомого ротора. Обвитка ротора короткозамкнена, тому таку машину називають генератором із короткозамкненим ротором. Асинхронна машина працює як генератор за умов, що ротор приводиться в обертовий рух турбіною. Статор повинен бути приєднаний до електромережі чи до конденсаторної батареї, бо для утворення магнетного потоку в трифазному асинхронному генераторі необхідний струм намагнення у обвитці статора, який отримують або від зовнішнього джерела – загальної електромережі, або із локальної мережі з батареєю конденсаторів. Трифазний змінний струм утворює колове обертове магнетне поле. Частота обертання обертового магнетного поля називається синхронною і позначається n_c . Синхронну частоту обертання визначають за формулою

$$n_c = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (3.11)$$

де f_1 – частота струму електромережі, Гц; p – кількість пар полюсів обмотки статора.

Обертове магнетне поле через рівномірний повітряний проміжок перетинає обвитку ротора. У ній індукується (наводиться) змінна електрорушійна сила, яка викликає струм в обвитці ротора. Струм ротора зумовлює виникнення електродинамічної сили, яку можна розрахувати за формулою

$$F = B \cdot I \cdot l, \text{ Н}, \quad (3.12)$$

де B – магнетна індукція, Тл; I – сила струму в роторі, А; l – довжина провідника, м.

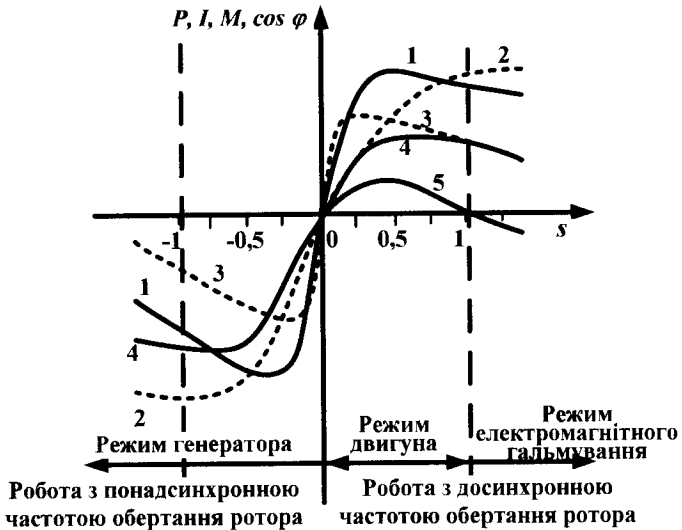


Рис. 3.10. Динамічні характеристики асинхронної машини:
 1 – електрична потужність, 2 – струм, 3 – момент, 4 – $\cos \varphi$,
 5 – механічна потужність, s – ковзання

Електродинамічна сила утворює електродинамічний момент. За правилом лівої руки ротор обертається у напрямку обертяння електромагнетного поля. Так працює асинхронний двигун.

Якщо ж частота обертяння ротора n перевищить значення n_C , у машині виникне електромагнетний момент і вона перейде із режиму двигуна у режим генератора. Тоді машина перетворює механічну енергію, що надходить від турбіни, на електричну енергію. Отже, турбіна повинна забезпечити то вищу частоту

обертання ротора електрогенератора, що більшу потужність виробляє генератор (що більше енергії споживають електроприймачі змінного струму). Однією із характеристик асинхронної машини є ковзання s , значення якого обчислюють за формулою

$$s = \frac{n_c - n}{n_c}. \quad (3.13)$$

Оскільки ротор асинхронного генератора обертається з частотою, більшою від синхронної частоти обертання магнетного поля, ковзання такої машини від'ємне, $s < 0$.

За номінального навантаження ротор асинхронного генератора обертається приблизно на 3 % швидше, ніж електромагнетне поле статора. Наприклад, $n = 1540$ об./хв, а $n_c = 1500$ об./хв. На рис. 3.10 наведено основні характеристики асинхронного генератора.

3.7. Вплив ГЕС на довкілля

Гідроенергетику можна було б вважати екологічно найбезпечнішим способом отримання електроенергії, якби не побічні наслідки будівництва й експлуатації гідроелектростанцій. ГЕС потребує спорудження гребель і водосховищ, які змінюють природний гідрологічний режим річок і спричиняють зміни локальних кліматичних умов. Епоха гідроенергетики в Україні розпочалася із "Дніпрогесу" в двадцяті роки минулого століття. Від того часу на Дніпрі постала ціла низка ГЕС, які, виробляючи близько 2 % від усієї електроенергії в країні, спричинили затоплення сотень тисяч гектарів родючих заплавної землі, а їхні водосховища "зацвітають" ледь не щолита і становлять серйозну небезпеку для здоров'я людей, які споживають звідти воду. Порушення гідрологічного режиму Дніпра, крім того, призвело до зменшення чисельності й навіть зникнення популяцій багатьох цінних промислових видів риб, зокрема осетрових, які не можуть потрапити до своїх нерестових місць через греблі та шлюзи. Навряд чи такі втрати можна виправдати покращенням суднохідності ріки чи необхідністю зрошення посушливих земель нашого Півдня (особливо

враховуючи надзвичайно низьку ефективність використання земельних ресурсів в Україні загалом).

Світовий досвід на прикладі Норвегії, Канади, США і Нової Зеландії показує, що потужні ГЕС найкраще споруджувати в гірських районах, де вони максимально ефективно використовують енергію водного потоку, а водосховища затоплюють вузькі ущелини і до того ж сприяють запобіганню катастрофічним паводкам у річкових басейнах.

Ще один перспективний напрям використання енергії води полягає у спорудженні малих ГЕС, які фактично не змінюють природних умов, не затоплюють великих земельних площ, поліпшують водообмін і аерацію води. МГЕС потужністю 1 МВт може забезпечити енергією до 500 повністю електрифікованих сучасних житлових будинків у сільській місцевості. За потужності 10 МВт енергії вистачає для електропостачання великого селища. МГЕС можуть стати надійним маневровим резервом промислових підприємств. Тому останнім часом у багатьох зарубіжних країнах (США, Австралія тощо) виявляють підвищену увагу до впровадження енергоустановок такого типу.

Контрольні запитання

1. Яке підприємство називають гідроелектростанцією?
2. Назвіть відомі вам типи ГЕС.
3. Які типи турбін застосовують на ГЕС?
4. Який принцип роботи ГЕС?
5. Як утворюють бажаний напір води на ГЕС?
6. Які електростанції називають гідроакмулювальними?
7. Чому необхідно споруджувати ГАЕС?
8. Які ГЕС називають дериваційними і в чому їх переваги над іншими гідроелектростанціями?
9. Від чого залежить розподіл потенціалу малих річок на території України?
10. Як впливають на довкілля гідроелектростанції?
11. Переваги та недоліки хвильової енергетики.
12. Як використовують енергію припливів і відпливів?

Розділ 4

ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

4.1. Загальні положення

Сонячне випромінювання є одним із невичерпних і екологічно чистих джерел енергії. Кількість енергії, що надходить на Землю від Сонця, сягає $66,8 \cdot 10^{16}$ кВт·год на рік, що у 13 тис. разів більше від сумарної енергії, яку виробляють сьогодні в світі. Середнє значення енергії сонячних променів на поверхні Землі – у межах від $7,2$ МДж/м² (2 кВт·год/м²) за день на півночі Європи, до $21,6$ МДж/м² (6 кВт·год/м²) у засушливих районах. За кліматичними умовами Україна належить до регіонів із середньою інтенсивністю сонячної радіації. За рівнем інтенсивності сонячного випромінювання її територію поділено на чотири зони: I – $1,35$ кВт·год/м²; II – $1,25$ кВт·год/м²; III – $1,15$ кВт·год/м²; IV – $1,00$ кВт·год/м². Густина прямої та дифузної сонячної радіації залежить від багатьох чинників: широти місцевості, прозорості атмосфери, характеристик земної поверхні, а також від часу доби та пори року.

Сонячне випромінювання – це електромагнетне випромінювання у діапазоні хвиль довжини $0,28$ – $3,0$ мкм. Спектр сонячного випромінювання складається із:

- ультрафіолетових хвиль завдовжки $0,28$ – $0,38$ мкм, їх у спектрі 2 %;
- світлових хвиль у діапазоні $0,38$ – $0,78$ мкм (380 – 780 нм), які становлять близько 49 % спектра;
- інфрачервоних хвиль завдовжки $0,78$ – $3,0$ мкм, на частку яких припадає приблизно 49 %.

Потужність сонячного випромінювання на 1 м² поверхні Землі дорівнює 1359 Вт/м² і є сонячною сталою.

Теплову дію сонячних променів на поверхню будь-якої конструкції визначають за інтенсивністю сонячного випромінювання, тобто кількістю теплоти, яка надходить за одиницю часу на

одиницю площі поверхні від Сонця. Розподіл енергії сонячного випромінювання наведено на рис. 4.1. Шлях, який проходять сонячні промені до поверхні Землі, зростає із наближенням Сонця до лінії горизонту, а це спричиняє зниження інтенсивності сонячної радіації на земній поверхні.

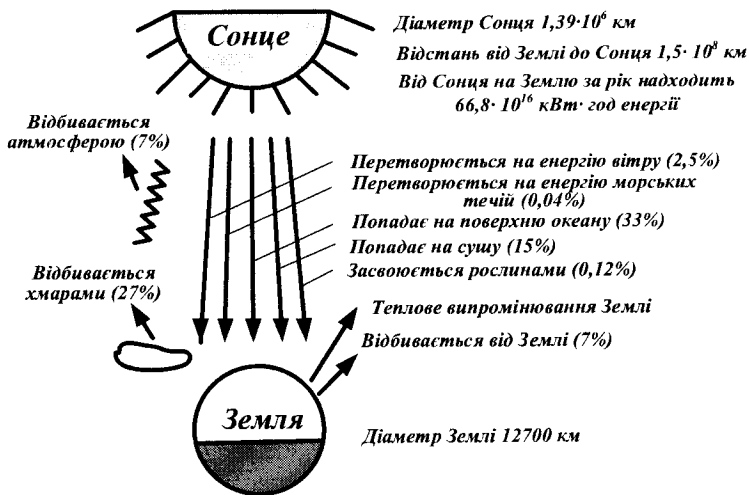


Рис. 4.1. Розподіл енергії випромінювання Сонця

Розрізняють пряму і розсіяну сонячну радіацію. Пряма радіація – це безпосереднє потрапляння сонячних променів на досліджувану поверхню, а розсіяна – непряме, розсіяне частинками повітря, пилу, води тощо, які містяться в атмосфері.

Кількість енергії випромінювання, що потрапляє на одиницю площі за одиницю часу, залежить від години доби, пори року, широти місцевості, місцевого клімату, кута нахилу поверхні відносно Сонця тощо.

Для розрахунку кількості сонячної енергії на певній місцевості необхідно знати кути падіння сонячних променів на похилу чи горизонтальну поверхні, котрі поглинають тепло. Інтенсивність сонячної енергії на поверхні Землі, а саме в певній

точці P , для заданого моменту часу визначають за трьома основними кутами: 1) нахилу земної осі δ ; 2) широтою місцевості φ ; 3) годинним кутом ω . Земля обертається навколо Сонця з нахилом земної осі у просторі під кутом $\delta_0 = 23,5^\circ$ відносно нормалі до площини обертання.

Сонячний енергетичний потенціал визначається за показником сумарної сонячної радіації ($\text{Дж}/\text{м}^2$), що дорівнює

$$E = E_p + E_{\text{пр}} \sin h, \quad (4.1)$$

де E – сумарна сонячна радіація; E_p – розсіяна радіація; $E_{\text{пр}}$ – пряма радіація; h – висота Сонця над обрієм.

Для вирішення деяких завдань геліоенергетики часто використовують показники тривалості сонячного випромінювання та хмарності. Для характеристики режиму хмарності використовують ймовірність похмурого та ясного неба. Небо вважають похмурим, якщо кількість хмар понад 8 балів, і ясним, якщо кількість хмар не перевищує 2 балів.

На рис. 4.2 наведено графік інтенсивності сумарної сонячної радіації у Києві, а на рис. 4.3 – графіки інсоляції на верхній межі атмосфери ($\text{МДж}/\text{м}^2$) як функцію широти та пори року.

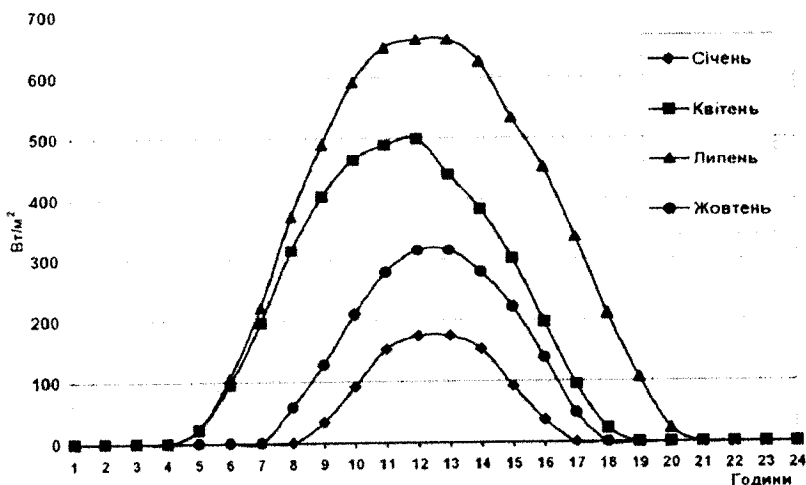


Рис. 4.2. Інтенсивність сумарної інсоляції у Києві

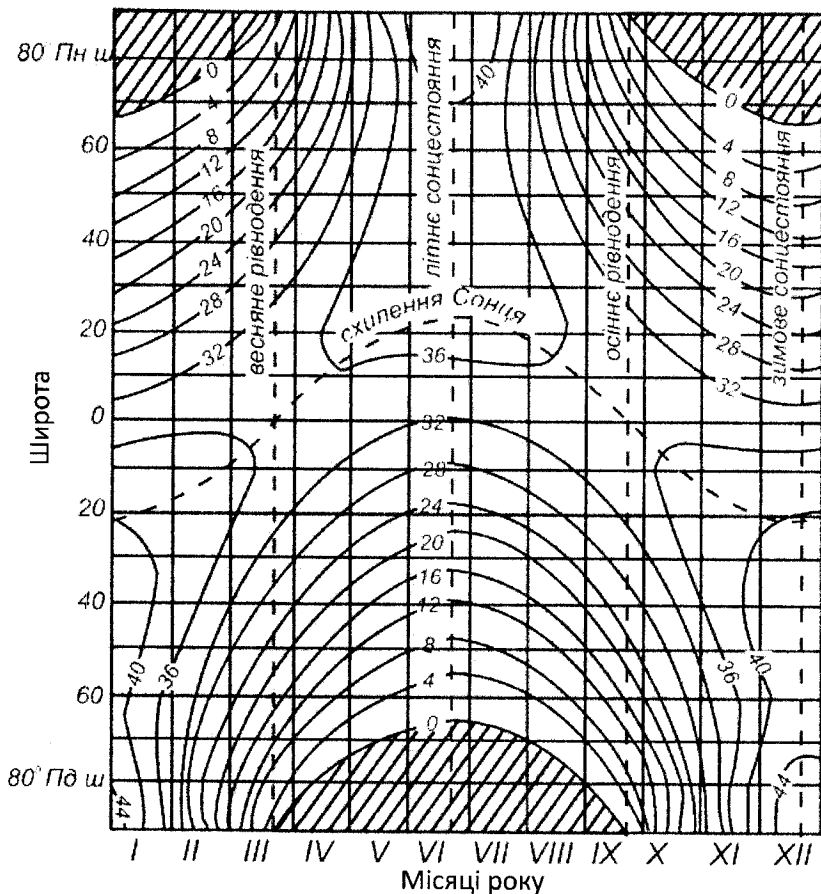


Рис. 4.3. Додова інсоляція на верхній межі атмосфери як функція широти і пори року, МДж/м²

Усю територію України умовно розділено на чотири зони за ресурсами сонячної енергетики: перша характеризується радіацією менше ніж 1100 кВт·год/(м²·рік), друга – 1100–1200, третя – 1200–1300, четверта – 1300–1450. Очевидно, що третя і четверта зони розташовані на півдні України і в Криму, перша зона охоплює північні області, а друга – середню частину України.

Практичний інтерес становить залежність сумарної сонячної радіації від кута нахилу опромінюваної площини відносно горизонтальної. Дослідження показують [1], що найбільше значення сонячної радіації спостерігається за кута нахилу площини, близького до значення географічної широти розташування. Наприклад, для Києва, розміщеного на північній широті 50° , найбільше значення місячної суми сонячної радіації на південно орієнтовану поверхню припадає на червень і становить: $175 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ за кута нахилу 0° ; 160 – за кута нахилу 30° ; 150 – за кута нахилу 50° ; 130 – за кута нахилу 70° ; 100 – за кута нахилу 90° . Однак близькі до найбільших значення сонячної радіації з тривалістю від березня до вересня спостерігаються за кута нахилу 50° .

Хмарність – ступінь вкриття неба хмарами в балах від 0 (ясно) до 10 (похмуро). Сучасну десятибальну шкалу хмарності прийнято на першій Морській міжнародній метеорологічній конференції (Брюссель, 1853 р.). Наприклад, 0 балів – небо ясне, 5 балів – 50 % неба закрито хмарами, 10 балів – усе небо закрито хмарами. Хмарність – один із важливих чинників, що визначають погоду й клімат. Завдяки ефекту екранування вона перешкоджає як охолодженню поверхні Землі внаслідок власного теплового випромінювання, так і її нагріванню сонячною радіацією, тобто взимку й уночі хмарність перешкоджає зниженню температури земної поверхні й приземного шару повітря, улітку й удень зменшує нагрівання земної поверхні сонячними променями, пом'якшуючи клімат усередині материків.

Способи використання сонячної енергії наведено на рис. 4.4. Сонячне випромінювання можна використовувати активно і пасивно. Пасивне використання полягає у нагромадженні енергії випромінювання у вигляді тепла в елементах конструкції будівель, щоб забезпечити комфортну температуру для мешканців. Активне використання полягає у перетворенні енергії сонячного випромінювання у спеціальних пристроях для отримання теплової енергії чи для генерування електроенергії. З цією метою застосовують сонячні колектори, сонячні солоні ставки, а також концентратори

сонячного випромінювання для одержання пари і подальшого генерування електроенергії чи фотопанелі для прямого перетворення енергії випромінювання на електричну.

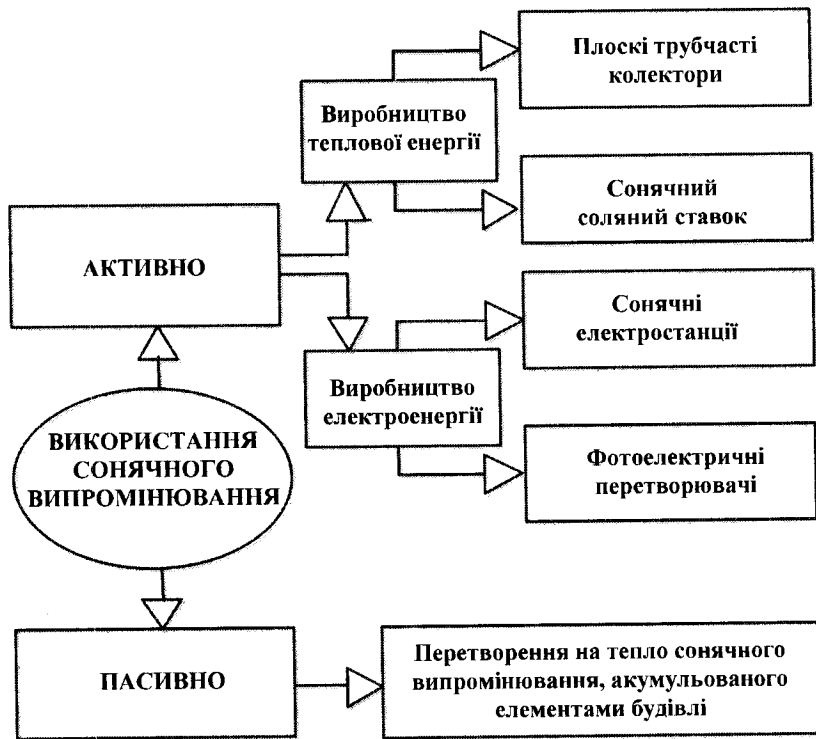


Рис. 4.4. Способи використання сонячного випромінювання

4.2. Пряме перетворення енергії сонячного випромінювання на електроенергію

Сонячні електростанції найефективніші в районах із високим рівнем сонячної радіації та малою хмарністю. Їх ККД може досягати 20 %, а потужність 100 МВт. Сонячна фотоенергетика – це пряме перетворення сонячної радіації на електричну енергію.

Фотоелектричні станції можуть виробляти і пересилати електроенергію у централізовану зовнішню мережу за “зеленим” тарифом чи виробляти електроенергію для власного споживання.

На рис. 4.5 наведено схему зв’язку ФЕС із енергосистемою.

До складу фотоелектричної станції входять такі елементи (рис. 4.6): сонячні батареї, що виробляють постійний струм під дією сонячного випромінювання; інвертори, що перетворюють постійний струм на змінний; система моніторингу, що дає змогу відстежувати параметри роботи сонячної електростанції; лічильники обліку генерованої енергії та енергії, що продається в енергосистему за “зеленим” тарифом; металоконструкції для розташування сонячних батарей на земельній ділянці, даху будівлі тощо; лінія електропередачі для передавання електроенергії у мережу; власні споживачі електроенергії (промислові чи побутові електроприймачі).

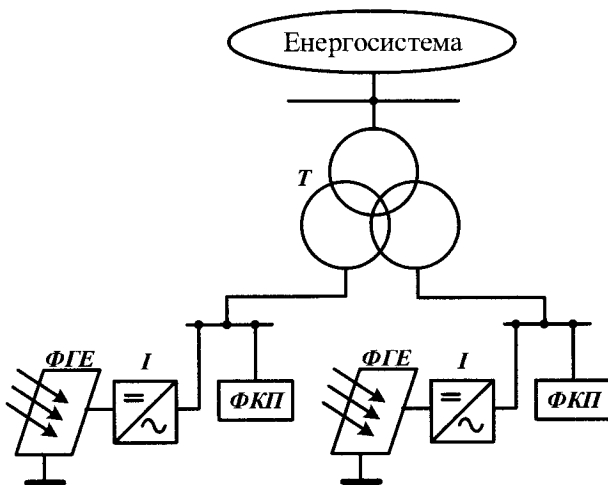


Рис. 4.5. Зв'язок фотоелектричних установок із енергосистемою

Фотоэффект (внутрішній фотоэффект) виникає, коли світловий промінь падає на елемент із двох матеріалів із різним типом електричної провідності (дірковою або електронною).

На рис. 4.7 наведено будову найпростішого сонячного елемента та ілюстрацію принципу його дії. У фотоелектричних елементах використовують кремнієві пластини, виготовлені із додаванням у кожену із них необхідних домішок, щоб в одній виник надлишок валентних електронів (*n*-тип), а у другій – нестача таких електронів (пластина *p*-типу); місця, де бракує електронів, називають дірками. Після з'єднання пластин напівпровідників між собою на межі їх стику утворюється зона *p-n*-переходу. Зона *p-n*-переходу є бар'єрним прошарком. Унаслідок явища дифузії частина електронів із шару "*n*" проникатиме до шару "*p*", а частина дірок – до шару із надлишком електронів. Між скупченнями різнойменних зарядів у напівпровіднику виникає різниця потенціалів приблизно 0,5 В. Утворене цими скупченнями зарядів *електричне поле* протидіє подальшому рухові (дифузії) зарядів. Тому цей прошарок називають замикаючим, чи бар'єром.



Рис. 4.6. Фотоелектричні сонячні електростанції

Коли світло проникає у шари "*n*" і "*p*", воно передає свою енергію електронам, розташованим на зовнішній оболонці нейтральних атомів. Отримавши надлишковий заряд, електрони вивільняються, а на їх місці виникає дірка.

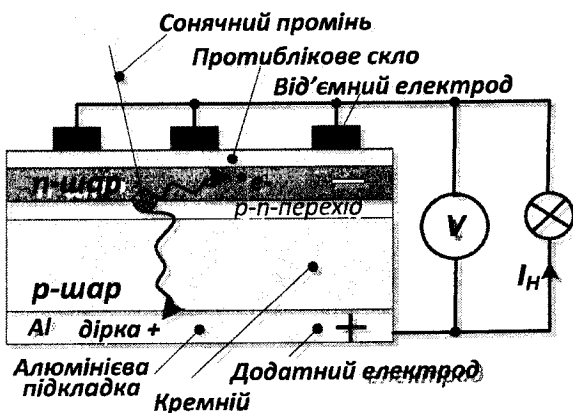


Рис. 4.7. Конструкція та ілюстрація принципу дії фотоелемента ФЕС

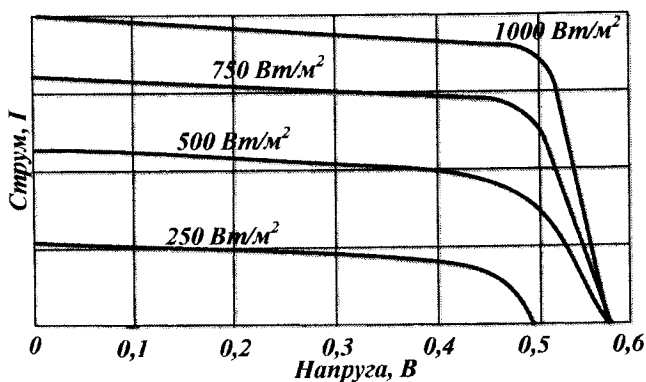


Рис. 4.8. Вольт-амперні характеристики фотоелектричних елементів

Електрони із надлишковою енергією вільно долають замикаючий прошарок напівпровідника і переходять із шару "p" у шар "n", а дірки, навпаки, із шару "n" у шар "p". Цей рух новоутворених зарядів підсилюється дією названого електричного поля. У підсумку шар "n" набуває додаткового негативного заряду, а шар "p" – позитивного. Якщо між різнойменними пластинами

приєднаний електроприймач (на рис. 4.7 це електрична лампа), то через нього потече струм.

Для безперервності струму необхідне безперервне опромінення напівпровідникового фотоелемента. Уночі чи у похмурий день фотоелектричні установки стають практично недієздатними.

Сила електричного струму, який може генерувати сонячний елемент, змінюється пропорційно до кількості фотонів, захоплених поверхнею фотоелемента. А цей показник також залежить від багатьох додаткових чинників: інтенсивності світлового випромінювання, площі фотоелемента, часу експлуатації, ККД пристрою, що пов'язано із температурою.

На рис. 4.8 наведено зовнішні вольт-амперні характеристики (ВАХ) фотоелектричного елемента, з яких видно, що сила струму, генерованого цим елементом, залежить від потужності світлового потоку (на рис. 4.8 подано вольт-амперні характеристики (ВАХ) за потужності потоку 250, 500, 750 та 1000 Вт/м²). З ходу кривих ВАХ зрозуміло, що у широкому діапазоні зміни опору навантаження (напруга фотоелемента змінюється пропорційно до опору навантаження) сила генерованого струму залишається майже незмінною, оскільки кількість генерованих під дією фотонів світла пар зарядів не може збільшуватися за сталого значення світлового потоку. Зі збільшенням світлового потоку зростає й сила струму фотоелемента.

На неробочому ході, коли опір навантаження безмежно великий (наприклад, лампочка відімкнена), напруга між пластинами не зростає, бо кількість зарядів, що утворюють різницю потенціалів між n і p шарами, не збільшується.

Напруга неробочого ходу (електрорушійна сила), яка генерується одним елементом, дещо змінюється залежно від фірми-виробника (та навіть від одного елемента до іншого в одній партії) та становить близько 0,6 В. Значення цієї ЕРС не залежить від розмірів елемента та його освітленості. Щоб підвищити вихідну напругу, сонячні елементи з'єднують послідовно. Сполучені сонячні елементи називають сонячною панеллю, недолік якої –

менша надійність, оскільки у разі виходу з ладу одного елемента знижується струм усієї батареї. Якщо одна комірка сонячної панелі потрапляє у тінь, то вона з джерела енергії перетворюється на споживача. Струм, що проходить через затінену комірку, розігріває її у результаті виділення енергії втрат на внутрішньому опорі. Унаслідок цього потужність панелі зменшується, зате сонячні елементи не “боятися” короткого замикання.

Значення опору навантаження сонячної батареї впливає на кількісне значення її потужності. Робочу точку фотобатареї можна визначити як точку перетину її зовнішньої вольт-амперної характеристики із вольт-амперною характеристикою навантаження (рис. 4.9). Із наведених кривих очевидно, що найбільшу потужність можна отримати за значення опору навантаження $R2$.

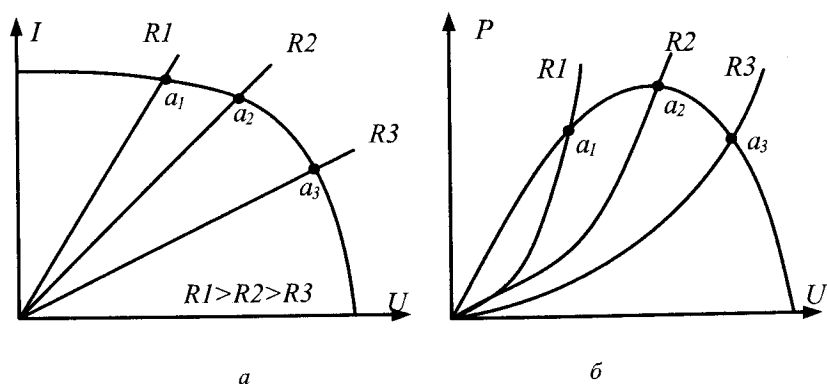


Рис. 4.9. Вольт-амперні (а) та енергетичні (б) характеристики фотоелектричної батареї та навантаження: $R1$, $R2$, $R3$ – опори навантаження

Важливим моментом роботи сонячних елементів є їхній температурний режим. Якщо елемент нагрівається на один градус понад $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, то він втрачає у напрузі $0,002\text{ В}$, тобто $0,4\text{ \%/градус}$. Тому сонячні елементи потребують додаткового охолодження. Стандартними умовами для паспортизації сонячних батарей в усьому світі визнають такі: освітленість 1000 Вт/м^2 , температура $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, спектр АМ 1,5 (сонячний спектр на широті 45°).

Можлива комплектація сонячних станцій акумуляторними батареями для резервування живлення споживача у разі вимкнення зовнішньої електромережі чи недостатньої енергії сонячного випромінювання, а також системою контролю недопустимості перетоків електроенергії, системою стеження за рухом Сонця, яка дає змогу утримувати сонячні модулі в оптимальному положенні відносно Сонця, системою моніторингу, дистанційної діагностики, зберігання даних тощо.

Сьогодні така технологія домінує і, за прогнозами експертів, залишиться основною впродовж наступних 15–20 років. Конструкція фотоелектричних панелей забезпечує високу надійність і захищеність сонячних електростанцій загалом. Зазвичай термін експлуатації такої електростанції становить не менше ніж 25–30 років. Зниження потужності внаслідок природного старіння електронних компонентів фотоелектричної батареї не перевищує 20 % після 25 років експлуатації ФЕС.

Чутливість фотоелемента залежить від довжини хвилі світла сонячного випромінювання і прозорості верхнього шару елемента. В ясну погоду кремнієві елементи виробляють електричний струм приблизно силою 25 мА і напругу 0,5 В на 1 см² площі елемента, тобто 12–13 мВт/см². Теоретична ефективність кремнієвих елементів – близько 28 %, практична – від 14 до 20 %.

Послідовно-паралельне з'єднання сонячних елементів утворює сонячну (фотоелектричну) батарею. Потужність сонячних батарей, що серійно випускає промисловість, становить 50–200 Вт. На рис. 4.10 показано фотоелектричні батареї для маяка на о. Зміїний (Україна), а на рис. 4.11 – варіанти використання сонячних батарей для вуличного освітлення.

Недоліком плоских фотоелементів для отримання електричної енергії є їхня висока вартість і значні площі, необхідні для розташування фотоелектростанції. Вартість сонячних батарей швидко зменшується (у 1970 р. 1 кВт·год електроенергії, виробленої з їхньою допомогою, коштувала \$60, 1980 р. – \$ 1,0, сьогодні – \$ 0,20–\$ 0,30). Завдяки цьому попит на сонячні батареї зростає на 30 % за рік, щорічний обсяг їхнього продажу перевищує (за потужністю) 50 МВт.

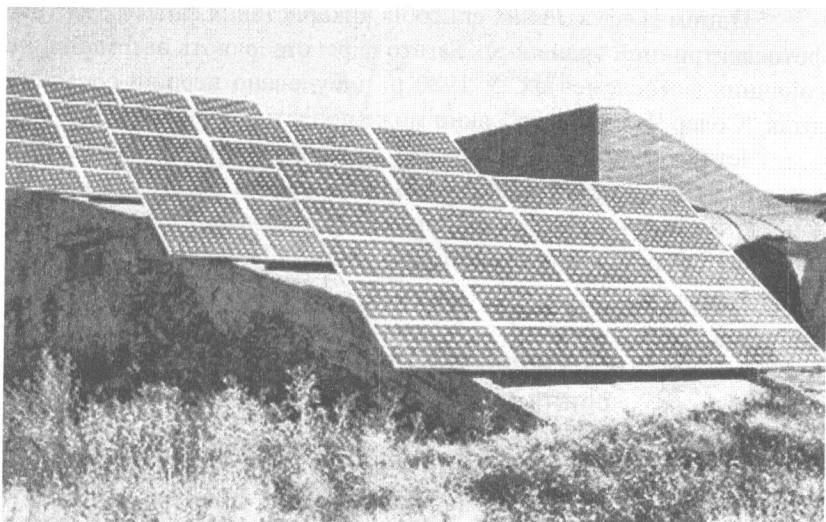


Рис. 4.10. Фотоелектрична система енергопостачання комплексу на о. Зміїній потужністю 10 кВт

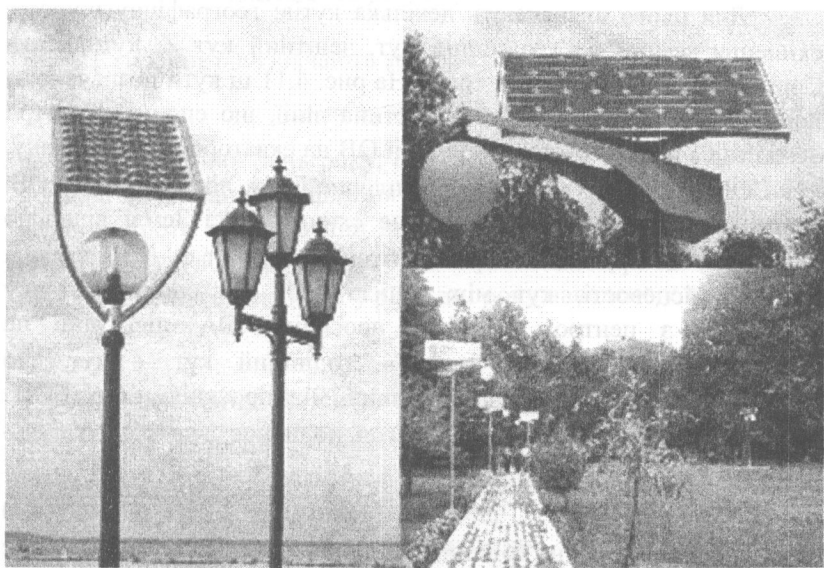


Рис. 4.11. Система фотоелектричного освітлення ботанічного саду

Одним із ефективних способів використання фотоелементів є фотоелектричний транспорт. Багато фірм створюють автомобілі на сонячних фотоелементах. У 1980 р. побудовано перший сонячний літак “Солар Челленджер”, який може пролетіти 160 км.

Істотним недоліком сучасних сонячних енергетичних установок є нерівномірність їхньої роботи (генерування енергії), що пов’язано зі зміною потоку сонячного випромінювання, який досягає поверхні Землі, залежно від погодних умов, пори року і часу доби.

4.3. Розрахунок інтенсивності сонячного випромінювання

Для розрахунку кількості сонячної енергії на певній місцевості необхідно знати кути падіння сонячних променів на похилу чи горизонтальну поверхню, котрі поглинають світло. Інтенсивність сонячної енергії на поверхні Землі, наприклад, у деякій точці А, визначають (рис. 4.10) за координатами її розташування.

Для цього визначають декілька кутів: географічну широту, схилення земної осі, годинний кут, зенітний кут Z , кут висоти Сонця h та азимут Сонця α тощо. На рис. 4.11 ці кути позначено за допомогою таких ліній: OB – частина лінії, що сполучає центри Землі та Сонця; OB' – проекція лінії OB на екваторіальну площину; кут BOB' – кут δ у вертикальній площині між лініями OB та OB' називається “схиленням”, тобто це схилення осі Землі відносно вертикалі, що проходить через центр планети; кут φ – географічна широта місцевості, кут між лінією AO , що сполучає точку місцевості з центром Землі й проекцією OA' цієї лінії на екваторіальну площину; кут ω – годинний кут – кут, що визначається в екваторіальній площині між проекціями OA' і OB' . Значення кута ω , що відповідає 13 год, дорівнює $\omega = -15^\circ$. У будь-який час доби кут ω визначають за формулою

$$\omega = 15 \cdot (12 - \tau), \quad (4.1)$$

де τ – добове значення години (о 12 год годинний кут ω дорівнює нулю).

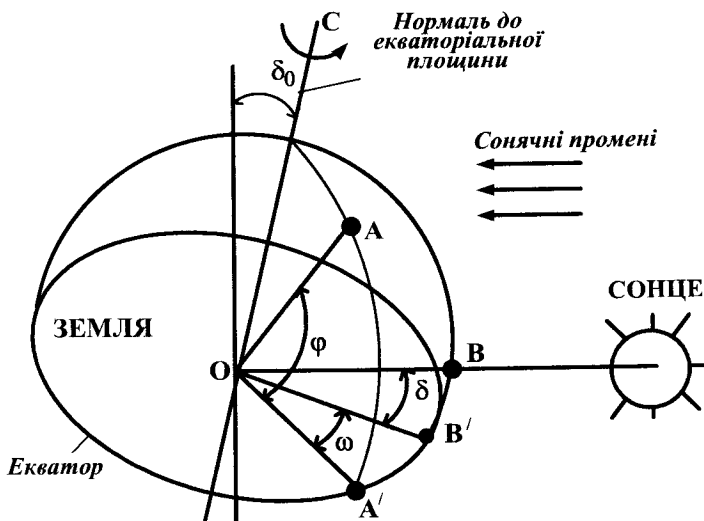


Рис. 4.12. До розрахунку інтенсивності сонячного випромінювання щодо Землі

Схилення δ визначають за формулою

$$\delta = \delta_0 \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right), \quad (4.2)$$

де n – порядковий день року; δ_0 – кут нахилу земної осі відносно нормалі до площини обертання ($\delta_0 = -23,5^\circ 22$ грудня і $\delta_0 = +23,5^\circ 22$ червня), тобто він додатний для літа (від весняного до осіннього рівнодення), а в інший період – від’ємний. У дні рівнодення $\delta = 0$.

Значення схилення δ у різні дні року наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Значення кута схилення для різних днів року

n	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344
δ	-22,9	-13	-2,4	9,4	18,8	23,1	21,2	13,5	2,2	-9,6	-18,9	-23

Енергію сонячного випромінювання, яка надходить на одиницю площі поверхні за день, називають добовим опроміненням E_d . Улітку E_d дорівнює 25 МДж/м^2 удень на всіх широтах, узимку

на високих широтах значення E_d набагато нижче внаслідок меншої тривалості дня, косоного падіння променів й істотного послаблення атмосферою.

Поряд із трьома основними кутами δ , φ , ω для розрахунків сонячного випромінювання використовують також зенітний кут Z , кут висоти Сонця h та азимут Сонця α . Кут висоти Сонця – це кут у вертикальній площині між сонячним променем та його проекцією на горизонтальну площину. Його визначають за формулою

$$h = \arcsin(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega). \quad (4.3)$$

Максимальним кут висоти Сонця стає опівдні, коли $\omega=0^\circ$, а $Z + h = 90^\circ$. Тоді h визначають за формулою: $h = 90 - (\varphi - \delta)$.

Якщо висота Сонця над горизонтом $h < 5^\circ$, інтенсивність сонячного випромінювання нехтують. Для значень $h > 5^\circ$ інтенсивність дії прямої сонячної енергії $E_{\text{пр}}$ (Вт/м²) на поверхню, перпендикулярну до напрямку променів, наближено визначають за формулою

$$E_{\text{пр}} = 1360 \cdot \sin h / \left(\sin h + \frac{1 - P_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} \right), \quad (4.4)$$

де $P_{\text{пр}}$ – коефіцієнт прозорості атмосфери (0,7–0,8).

Якщо сонячний колектор чи фотобатарею розташовують у північній півкулі, то, щоб досягти високої енергоефективності, їх площину необхідно орієнтувати на південь із нахилом до поверхні Землі під кутом β , що визначається за співвідношенням

$$\beta = \varphi - \delta_{\text{сєр}}, \quad (4.5)$$

де $\delta_{\text{сєр}}$ – середнє за досліджуваній період схилення Сонця, модуль якого визначають як середнє арифметичнє косинусів максимального і мінімального схилень за досліджуваній період

$$|\delta_{\text{сєр}}| = \arcsin \left(\frac{\cos \delta_{\text{max}} + \cos \delta_{\text{min}}}{2} \right). \quad (4.6)$$

Інтенсивність повної сонячної енергії визначають як суму інтенсивностей прямої $E_{\text{пр}}$ і розсіяної E_r радіації. Залежність інтенсивності розсіяної сонячної радіації у безхмарному небі, яка діє на горизонтальну поверхню, від висоти Сонця h наведено в табл. 4.2.

Інтенсивність розсіяної сонячної радіації

h°	10	20	30	40	50	60	70
$E_p, \text{Вт/м}^2$	31,4	43,1	52,4	60,5	65,2	67,5	68,6

4.4. Типи сонячних панелей та їх ефективність

Використання енергії Сонця дає змогу економити дорогу електроенергію, яку постачають у будинки енергетичні компанії, і навіть заробляти на поставках енергії в електричну мережу.

Головною складовою сонячної електростанції є сонячні батареї, чи фотоелектричні панелі. Сонячна батарея складається із окремих фотоелектричних елементів, які, з'єднуючись, разом забезпечують необхідну потужність батареї. Сьогодні на ринку можна знайти п'ять типів сонячних батарей, що відрізняються за матеріалами, з яких виготовлені їх елементи.

Поширені такі технології виробництва фотоелементів:

1. Кристалічні фотоелементи: монокристалічні кремнієві фотоелементи; полікристалічні фотоелементи.
2. Тонкоплівкові фотоелементи: фотоелементи із використанням індію і міді (CIS технологія); фотоелементи із використанням телуриду кадмію (CdTe технологія); фотоелементи із використанням аморфного кремнію.

Будову сонячної панелі наведено на рис. 4.13.



Рис. 4.13. Будова сонячної панелі

Коефіцієнт корисної дії (ККД) фотоелементів – це ефективність перетворення сонячної енергії на електричну. Що менше значення ККД, то більша площа фотоелементів необхідна для забезпечення такої самої потужності порівняно із елементами, значення ККД яких більше.

Монокристалічні сонячні батареї створено на основі монокристала кремнію, вирощеного із розплаву полікристалічного кремнію, розпиляного і відполірованого. Середнє значення ККД таких батарей сягає 19 % від встановленої потужності. Найчастіше монокристалічні сонячні батареї застосовують у проектах із встановленою потужністю до 10 кВт. Традиційно монокристалічні модулі вмонтовують в алюмінієву рамку і закривають протиударним склом. Колір монокристалічних фотоелементів темно-синій чи чорний (рис. 4.14).

Характеристики:

- коефіцієнт корисної дії 15–18 %;
- форма квадратна або квадратна із закругленими чи зрізаними кутами;
- товщина 0,2–0,3 мм;
- колір від темно-синього до чорного із антивідбивним покриттям чи сірий без покриття;
- зовнішній вигляд – однорідний.

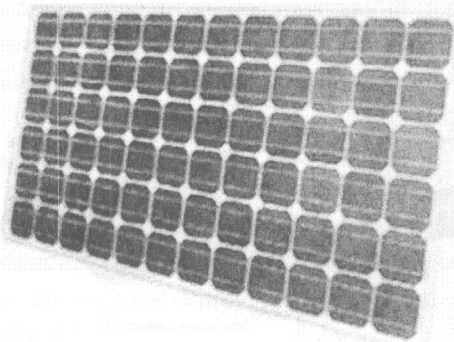
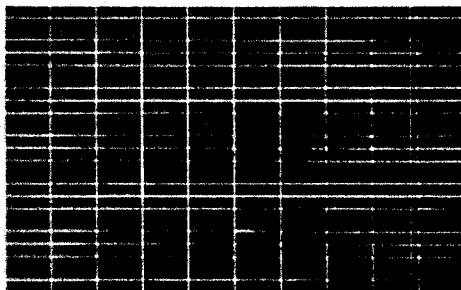


Рис. 4.14.
Монокристалічні
кремнієві батареї

Рис. 4.15.
Полікристалічна сонячна
панель



Сонячні панелі із полікристалічних фотоелектричних елементів найпоширеніші завдяки оптимальному співвідношенню ціни і коефіцієнта корисної дії серед всіх різновидів панелей. Для їх виготовлення використовують пресовані кристали різної форми, тому їх іноді ще називають мульткристалічними фотоелементами. Їх ККД становить 12–16 %. Елементи, які утворюють панель, мають характерний синій колір і кристалічну структуру (рис. 4.15). Середнє значення ККД таких батарей становить близько 16 %.

Характеристики:

- ККД до 16 %;
- форма квадратна;
- товщина 0,24–0,3 мм;
- колір синій з антивідбивним покриттям, сріблясто-сірий без покриття;
- зовнішній вигляд – блок кристалів різного напрямку, деякі кристали чітко видно на зрізі.

Сонячні батареї з аморфного кремнію мають один із найнижчих ККД. Зазвичай його значення у межах 6–8 %. Однак серед усіх кремнієвих технологій фотоелектричних перетворювачів вони виробляють найдешевшу електроенергію (рис. 4.16). У цих фотоелементах застосовують тонкі плівки, що найдешевше. Для їх виготовлення використовують аморфний (розплавлений) кремній, який наносять, напилюючи на різні поверхні: полімерну плівку, скло, пластик. Завдяки цьому можна виготовляти фотоелементи із різним ступенем прозорості та забарвлення, а це, своєю чергою, розширює спектр їх застосування.

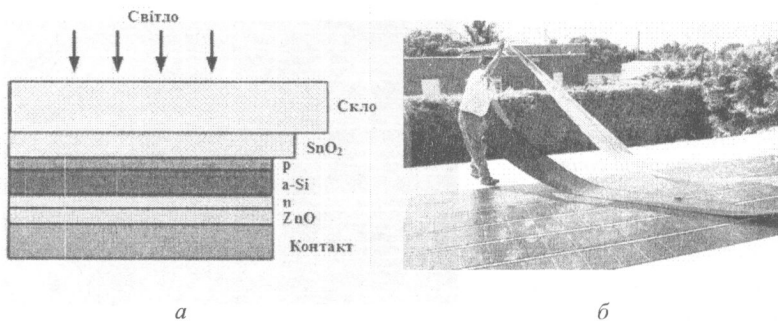


Рис. 4.16. Панель з аморфного кремнію:
а – структура, б – монтаж

Тонкоплівкові панелі працюють навіть за розсіяного випромінювання, потрапляння на них прямого сонячного проміння не потрібне. Тому встановлювати плівкові сонячні батареї можна не тільки на дахах, але й на бічних поверхнях будівель.

Характеристики:

- ККД 5–7 %;
- форма відповідає формі модуля, максимальний розмір 2×3 м;
- товщина елемента в незагартованому склі 1–3 мм;
- колір від коричневого до синього чи фіолетового;
- зовнішній вигляд – однорідний.

Унікальні властивості має фотопанель за технологією Panasonic HIT. У комірках цього типу використаний додатковий надтонкий шар аморфного кремнію під монокристалічною поверхнею. Ця підкладка *n*-типу покращує провідність структури, сприяє зменшенню втрати потужності у разі зростання температури модуля.

Сонячні панелі з телуриду кадмію (CdTe) виготовляють на основі плівкової технології. Напівпровідникову плівку наносять тонким шаром у кілька сотень мікрометрів. Ефективність елементів із телуриду кадмію невелика, ККД близько 11 %. Проте, порівняно із кремнієвими панелями, один ват потужності цих батарей на кілька десятків відсотків дешевший (рис. 4.17).

Характеристики:

- ККД 8,5–11 %;
- форма елемента відповідає формі модуля;
- товщина модуля в незагартованому склі – 3 мм;
- колір від дзеркального темно-зеленого до чорного;
- зовнішній вигляд однорідний.

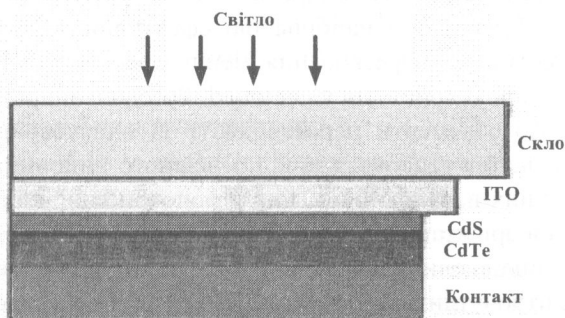


Рис. 4.17. Структура панелі з телуриду кадмію

Сонячні панелі на основі CIGS виготовлено за плівковою технологією, але їхня ефективність порівняно із панелями із телуриду кадмію вища, ККД сягає 15 %. CIGS (*Copper indium gallium selenide*) – це напівпровідник, який складається із міді, індію, галію та селену.

Ефективність сонячних батарей безпосередньо не впливає на кількість виробленої установкою енергії. Однакову потужність всієї установки можна забезпечити за допомогою будь-яких типів сонячних батарей, однак ефективніші фотоелектричні перетворювачі компактніші, для їх розташування знадобиться менша площа. Наприклад, якщо для отримання одного кіловата електроенергії потрібно близько 8 м² поверхні сонячної батареї на основі монокристалічного кремнію, то панелі з аморфного кремнію займуть вже близько 20 м². Наведений приклад, звичайно ж, не є абсолютним. На виробництво електроенергії фотоелектричними перетворювачами впливає не лише загальна площа сонячних панелей. Електричні

параметри будь-якої сонячної батареї визначають у так званих стандартних умовах тестування, а саме за інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м^2 і робочої температури панелі $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Поширена помилкова думка, що полікристалічні фотоелектричні модулі ефективніше перетворюють сонячне випромінювання порівняно із монокристалічними. Насправді перетворення енергії прямого сонячного випромінювання у монокристалічних елементах відбувається з найбільшою ефективністю, у полікристалічних модулях це перетворення менш ефективне у зв'язку із різною орієнтацією кристалів у елементі. Розсіяне випромінювання кристалічні фотоелементи перетворюють із однаковою ефективністю. Тому частка генерування від розсіяного випромінювання в полікристалічних панелях вища, ніж у монокристалічних, а отже, і менший вплив орієнтації на генерування.

У тонкопліткових елементах через вищий ступінь безладності орієнтації світлочувливих елементів генерування електроенергії із розсіяної частини випромінювання становить основну частку. Тому й прийнято говорити, що на роботу тонкопліткових модулів не впливає орієнтація. Але енергію сонячного випромінювання, незалежно від його форми, найефективніше перетворюють монокристалічні модулі, оскільки їх ККД вищий.

4.5. Термодинамічні СЕС

Геліотермічний метод використання сонячної енергії полягає у перетворенні сонячної енергії на тепло, що підводиться до парової турбіни, яка обертає електричний генератор.

Існують три типи сонячних теплоелектростанцій:

- баштового типу із центральним приймачем-парогенератором (абсорбером), на поверхню якого концентрують сонячне випромінювання, відбите від плоских дзеркал-геліостатів;
- параболічного (лоткового) типу, де в фокусі параболоциліндричних концентраторів розміщують приймачі – труби із теплоносієм;

- тарілкового типу, коли в фокусі параболічного тарілкового дзеркала розташований приймач сонячної енергії із робочою рідиною.

Усередині труб абсорбера циркулює робоча рідина (натрій, літій, нітрат калію).

Загалом сонячна електрична станція повинна мати такі підсистеми: підсистему уловлювання сонячної радіації, яка перетворює енергію сонячної радіації на теплову; підсистему перенесення теплоносія від приймача до акумулятора тепла; тепловий акумулятор; теплообмінник, у якому генерується пара для турбіни; парову турбіну й електрогенератор.

На рис. 4.18, *а* наведено спрощену технологічну схему СЕС із послідовно увімкненим у коло передавання тепла тепловим акумулятором. В акумуляторі нагромаджується тепло, що надходить від концентратора сонячних променів і подається у теплообмінник для генерування пари. Акумуляоване тепло використовують для генерування пари за відсутності сонячного випромінювання.

На рис. 4.18, *б* наведено спрощену схему СЕС із паралельним увімкненням теплового акумулятора. В акумуляторі накопичується частина тепла робочого тіла, а зв'язок із турбіною здійснюється без проміжних пристроїв.

У теплоелектростанціях баштового типу електроенергію від Сонця отримують за допомогою паротурбінних генераторів.

Нагріта до температур 500 °С і більше робоча рідина (теплоносіє) може приводити в рух стандартний тепловий двигун для виконання механічної роботи чи для виробництва електроенергії.

Щоб забезпечити високу температуру (понад 1000 °С), застосовують концентрувальні колектори сонячної енергії. Вони складаються із перетворювача, який поглинає сонячне випромінювання і перетворює його на інший вид енергії, та концентратора з оптичною системою для спрямування потоку сонячного випромінювання (СВ) на перетворювач. Як правило, концентратор потрібно повертати за Сонцем. За конструкцією концентратор – це параболічне дзеркало 3 із перетворювачем 2, розташованим уздовж його осі (рис.

4.19). Тут СВ концентрується у напрямку осі пристрою, тому колектор повертається за Сонцем в одному напрямі. Вісь повороту спрямовують із заходу на схід, тоді дзеркало повертається навколо осі услід за нахилом Сонця. Така установка дає змогу отримати температуру теплоносія $t \geq 700^\circ\text{C}$. Система із розподіленими колекторами оснащена пристроєм автономного стеження за Сонцем. Гарячу рідину чи пару з усіх колекторів збирають у центральну електростанцію, де генерується електроенергія за принципом роботи ТЕС.

Сонячна електростанція із центральною сонячною вежею складається із розташованих на великій площі плоских дзеркал, які стежать (повертаються) за Сонцем і відбивають сонячне випромінювання на вершину сонячної вежі (рис. 4.20).

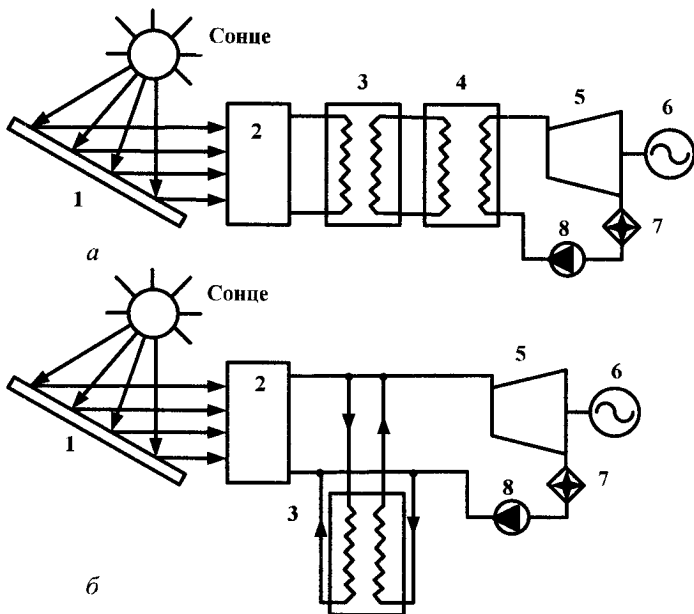


Рис. 4.18. Технологічні схеми сонячної електричної станції: а – з послідовним акумулятором тепла; б – з паралельно увімкненим тепловим акумулятором:

1 – концентратор сонячних променів, 2 – приймач сонячної енергії, 3 – тепловий акумулятор, 4 – теплообмінник (парогенератор), 5 – парова турбіна, 6 – електрогенератор, 7 – конденсатор, 8 – конденсатна помпа

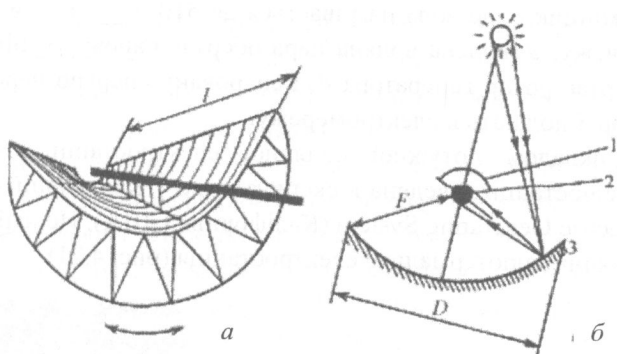


Рис. 4.19. Загальний вигляд параболічного концентратора:
 1 – екран; 2 – поглинальна поверхня; 3 – дзеркало;
 F – фокусна віддаль; D – довжина колектора

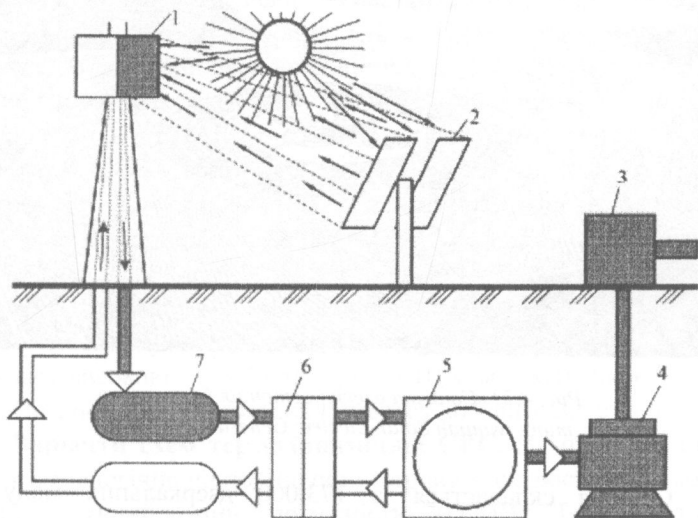


Рис. 4.20. “Вежова” сонячна електростанція:
 1 – вежа із вмонтованим теплоприймачем; 2 – плоскодзеркальні
 колектори; 3 – трансформатор; 4 – генератор; 5 – парова турбіна;
 6 – паровий котел; 7 – тепловий нагромаджувач (акумулятор)

На вежі 1 розташовано теплоприймач, у якому нагрівається до 525 °С натрій, що через тепловий нагромаджувач 7 подається у

теплообмінник 6, де вода нагрівається до $510\text{ }^{\circ}\text{C}$, а натрій повертається у вежу. Утворена водяна пара обертає парову турбіну 5, вал якої обертає ротор генератора 4. Генеровану енергію через трансформатор 3 подають в електромережу.

Прикладом потужної сонячної електростанції баштового типу є геліостанція, уведена в експлуатацію у Каліфорнії – Ivanpah Solar Electric Generating System (Каліфорнія, США). Це найбільша в світі сонячна геліотермальна електростанція (рис. 4.21).

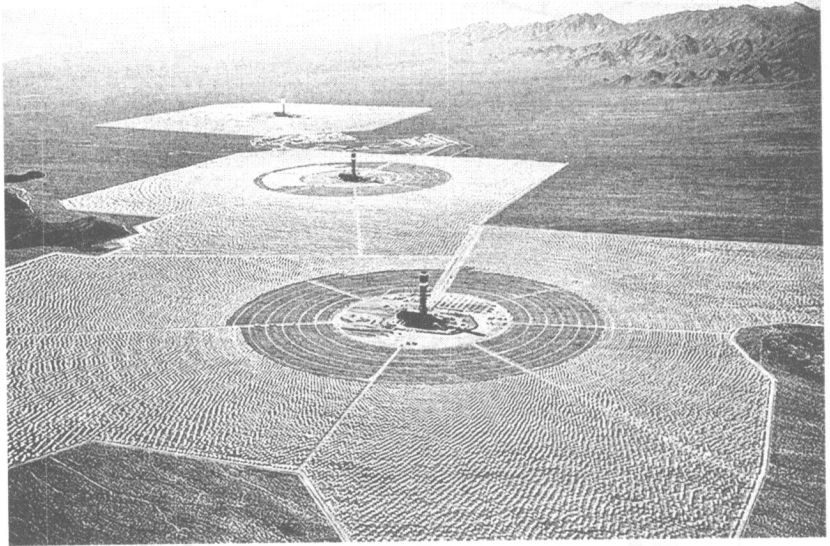


Рис. 4.21. Сонячна електростанція баштового типу Ivanpah Solar Electric Generating System

Станція складається із 173 000 дзеркальних модулів – геліостатів. Усі ці дзеркала-геліостати спрямовують сонячні промені на вершини трьох надвисоких веж, розташованих у центрі дзеркального поля. Кожен геліостат рухається за командою комп'ютера, а всі 173 000 дзеркал повертаються за Сонцем. Завдяки цьому сонячні промені потрапляють до веж протягом усього світлового дня. Висота кожної вежі 148 метрів. На вершині веж встановлено котли із рідиною. Унаслідок нагрівання сонячними

променями, які спрямовуються дзеркалами, рідина перетворюється на пару. Температура в котлах може досягати 700 °С. Загальна потужність Ivanpah Solar – 392 МВт. Пара передається у низ вежі на турбогенератори, які виробляють електроенергію.

Істотною перевагою геліотермальних електростанцій є можливість акумулювати надлишок сонячної енергії, а отже, працювати і після заходу сонця. Перегріта рідина накопичується у спеціальних об'ємних сховищах, і вночі її використовують для виробництва електроенергії. Сховища можуть забезпечити роботу турбін протягом 15 год із повною потужністю, тому геліотермальні станції виробляють електроенергію протягом 24 год щодоби, сім днів на тиждень. Надзвичайно важливо, що такий інноваційний енергозберігальний проект реалізовано з великою відповідальністю щодо довкілля, зокрема стосовно захисту тварин (рідкісних видів черепах), які живуть у цій пустелі.

У світі вже функціонує близько 100 таких станцій (усі споруджено за останні п'ять років), будують ще 50 таких об'єктів.

Світова практика експлуатації станцій баштового типу свідчить про їхню технічну доцільність і працездатність. Головні їхні недоліки – висока вартість і значна площа забудови: для розташування СЕС потужністю 100 МВт потрібна площа 200 га, а для атомної електростанції потужністю 1000 МВт – лише 50 га. Баштові СЕС потужністю до 10 МВт нерентабельні, їх оптимальна потужність дорівнює 100 МВт, а висота башти – 250 м. Реальна ціна таких станцій потужністю до 10 МВт через велику матеріалоемність виявилася високою – 10–15 тис. дол. США за 1 кВт пікової потужності. Цим пояснюють зниження інтересу до баштових станцій.

Варіанти схем термодинамічної СЕС. На півдні Австралії будують екологічно чисту сонячно-вітрову електростанцію, або так званий “сонячний комин”, потужністю 200 МВт. Ця споруда стане найвищою у світі. Конструкційно – це бетонна труба заввишки 1 км, оточена скляним кожухом. За принципом дії ця електростанція подібна до ГЕС, але рушієм її турбін є не вода, а потік нагрітого сонцем повітря. Нагріте сонцем повітря у скляному кожусі підніматиметься трубою й урухомлюватиме генератори електростанції. Спорудження станції планували завершити в 2005 р. Вона повинна забезпечити екологічно чистою електроенергією близько

200 тис. мешканців цього району. Вночі генератори станції діятимуть від гарячого повітря, що нагріватиметься в спеціальних водяних колекторах, які запасатимуть сонячне тепло протягом дня.

Сонячні аеростатні електростанції можуть стати одним із нових напрямів, що дасть змогу ефективніше використовувати сонячну енергію. Основний елемент сонячних аеростатних електростанцій – аеростат – можна вивести на декілька кілометрів над поверхнею Землі, вище від хмар, що забезпечить безперервне використання сонячної енергії упродовж дня (рис. 4.22).

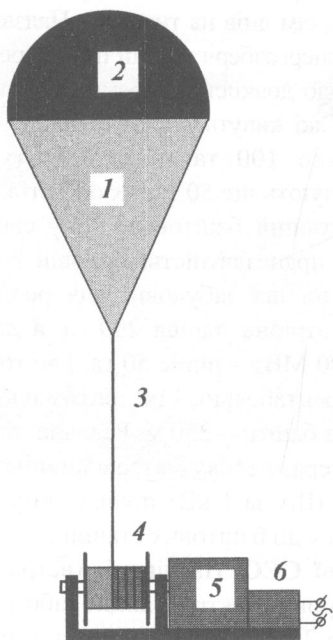


Рис. 4.22. Аеростатна сонячна електростанція: 1 – оболонка балона аеростата; 2 – тонкоплівкові сонячні елементи; 3 – канат із електричним кабелем; 4 – барабан; 5 – електромотор-редуктор; 6 – інвертор

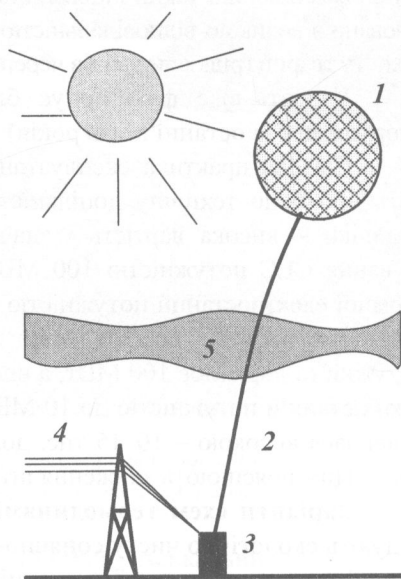


Рис. 4.23. Принципова схема аеростатної ФЕУ: 1 – оболонка аеростата із фотоелектричним шаром; 2 – електричний кабель; 3 – перетворювач; 4 – лінія електропересялення; 5 – хмари

Принцип роботи сонячної аеростатної електростанції (САЕС) із паровою турбіною полягає у поглинанні поверхнею аеростата сонячного випромінювання і нагріванні водяної пари, що міститься всередині. Оболонку аеростата виконують двошаровою. Сонячні промені, проходячи через зовнішній прозорий шар, нагрівають внутрішній шар оболонки із нанесеним покриттям, яке поглинає сонячне випромінювання.

Водяну пару, що міститься всередині оболонки, тепловий потік, який потрапляє через оболонку, нагріває до температури 100–150 °С. Прошарок газу (повітря) між шарами, виконуючи роль теплоізоляції, зменшує втрати теплоти в атмосферу. Тиск пари фактично дорівнює тиску зовнішнього повітря. Водяна пара через гнучкий паропровід потрапляє на парову турбіну, потім конденсується в конденсаторі, вода з конденсатора знову подається помпами у внутрішню частину оболонки, де випарюється, контактуючи із перегрітою водяною парою. ККД такої установки може досягати 25 %, причому завдяки запасу водяної пари у внутрішній частині аеростата установка працюватиме і вночі. За діаметра аеростата 150 м і розташування на висоті 1 км потужність установки може становити 2 МВт.

Такі САЕС можуть розташовуватися на кількасотметровій висоті над поверхнею Землі чи над поверхнею моря із силовою установкою на платформах з якорем, до платформ також кріплять аеростат. Якщо аеростат розташувати на висоті 5–7 км, роботу САЕС забезпечують незалежно від погодних умов, навіть якщо силова паротурбінна установка розташована на землі або в льодці аеростата з пересиланням електроенергії кабелем на землю. Вже є досвід використання таких САЕС на Тайвані.

Створено фотоелектричні перетворювачі енергії у вигляді плівки, ККД яких дорівнює 15–20 %. Таку плівку можна нанести на поверхню аеростата й підняти його за хмари (рис. 4.23). Протягом світлої частини доби електричну енергію постійним струмом кабелем можна пересилати на перетворювальну підстанцію і в електричну систему. Якщо діаметр аеростата 150 м, то на його освітлену частину падає сонячне випромінювання 18000 кВт. Із

урахуванням ККД можна отримати у середньому 3000 кВт потужності. Ускладнює використання такої схеми пересилання на землю великої потужності за низької напруги.

Іншим можливим напрямом використання сонячної енергії є створення орбітальних електростанцій із сонячними батареями, які акумулюють енергію Сонця і перетворюють її на мікрохвильове чи лазерне випромінювання, спрямоване до Землі, де його сприймають спеціальні антени і воно перетворюється на електричну енергію.

Перетворювачами сонячної енергії на електричну зазвичай слугують з'єднані сонячні елементи, які разом утворюють сонячні батареї.

У космосі, де відсутні атмосфера, хмари, зміни дня і ночі, на одиницю площі цілодобово потрапляє сонячної енергії в десять разів більше, ніж на земній поверхні. Дослідницькі роботи відносно сонячних орбітальних електростанцій розпочато в 70-ті роки ХХ ст. у США та інших країнах.

СЕС такого типу фактично не забруднюють довкілля (крім теплового забруднення).

4.6. Переваги та недоліки сонячної електроенергетики

Переваги технології використання сонячної енергії для виробництва електроенергії такі:

- ✓ загальна доступність джерела енергії на всій земній кулі;
- ✓ енергетичні запаси Сонця практично невичерпні;
- ✓ енергія, що надходить на Землю, безкоштовна;
- ✓ використання сонячної енергії не шкодить довкіллю (за винятком технологій виробництва фотоелементів чи виготовлення будівельних матеріалів);
- ✓ використання сонячної енергії не впливає негативно на клімат Землі;

✓ розвиток сонячної енергетики зумовлює створення нових робочих місць, як під час будівництва, так і у ході експлуатації енергетичних комплексів.

До основних недоліків сонячної енергетики та використання сонячної енергії для генерування електричної енергії зараховують такі:

✓ цей вид енергії надходить на земну поверхню нестабільно за порами року і лише у сонячні дні;

✓ необхідно накопичувати енергію для роботи енергоустановок (наприклад, використання теплових акумуляторів);

✓ потужні енергетичні установки потребують концентраторів сонячного випромінювання, оскільки випромінювання розсіює на великій території;

✓ порівняно висока вартість сонячних фотоелементів (хоч шороку зменшується);

✓ низький ККД сонячних елементів;

✓ поверхню фотопанелей потрібно очищати від пилу та інших забруднень;

✓ ефективність фотоелементів знижується через їх нагрівання, тому необхідно їх охолоджувати, зазвичай водою;

✓ фотоелементи містять отруйні речовини (свинець, кадмій, галій, арсен тощо);

✓ термін служби фотоелементів обмежений і виникає проблема їх утилізації.

4.7. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні

Перспективність та доцільність розвитку сонячної енергетики в Україні визначають такими основними положеннями:

✓ на територію України надходить енергії сумарної сонячної радіації 750 трильйонів кВт·год/рік;

✓ існує розвинена промислова інфраструктура, потенційно готова для швидкого налагодження виробництва сонячних енергоустановок та необхідного комплектування у промислових великих масштабах;

✓ можлива організація значних експортних поставок сонячних енергоустановок та комплектування до них, що зумовить швидко окупність вкладених коштів.

Україна має потужну інфраструктуру, зокрема розвинені сировинну базу, машинобудування і металооброблення, електротехнічну промисловість, мікроелектроніку, які можуть сприяти ефективному розвитку геліоенергетики.

На підставі зазначеного та з урахуванням світового досвіду пріоритетними напрямками розвитку сонячної енергетики називають такі:

✓ освоєння комплексу технологій пасивного сонячного опалення будівель;

✓ упровадження систем гарячого водопостачання та опалення із використанням сонячних колекторів;

✓ створення високоефективного обладнання для фотоелектричної енергетики;

✓ створення комбінованих сонячно-паливних електростанцій та котельень.

Варіанти технологій пасивного опалення нині почали широко застосовувати у житловому будівництві. Доцільно передбачити розроблення типових рішень щодо використання елементів цих технологій для поліпшення теплозабезпечення адміністративних та виробничих приміщень. Це також стосується створення систем сонячного колекторного теплопостачання. У сфері розвитку фотоелектричної енергетики необхідно виконати комплекс науково-конструкторських робіт, щоб розробити високоефективні фотоелектричні модулі для комплектування фотоелектричних станцій. Будівництво ФЕС може бути перспективним переважно в південних приморських районах спільно з ВЕС, які комплектують

вітроагрегатами з модулем постійного струму та інвертором постійного струму в змінний трифазний стандартних характеристик напруги і частоти.

Якщо ФЕС укомплектовувати фотоелектричними модулями з концентраторами сонячного випромінювання великої кратності (100–300 і більше), то, крім електричної енергії, такі модулі можуть генерувати пару, яку можна використовувати для потреб теплопостачання чи ж на комбінованій сонячно-паливній електростанції.

У південних регіонах України на основі чинних ТЕС можна створювати інші варіанти сонячно-паливних електростанцій, зокрема з використанням систем підігрівання води параболоциліндричними чи параболоїдними концентраторами сонячного випромінювання.

Основні завдання розвитку сонячної енергетики такі:

- ✓ визначення регіональних показників потенціалу сонячної радіації;
- ✓ розроблення типових архітектурних і технічних рішень для модернізації адміністративних та виробничих приміщень з метою орієнтації підприємств галузі на енергоощадну технологію сонячного опалення – “Сонячний дім”, спорудження експериментального “Сонячного дому” на одній із РЕМ у південних областях України;
- ✓ розроблення конструкції та технології налагодження серійного виробництва високоефективних сонячних колекторів для потреб галузі;
- ✓ виконання науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт для створення високоефективних фотоелектричних модулів на основі арсеніду галію та із концентраторами сонячного випромінювання;
- ✓ розроблення технологічних схем, проєктів та спорудження експериментальних комбінованих сонячно-паливних електростанцій та ВЕС+ФЕС-енергокомплексів.

Контрольні запитання

1. Які основні фактори визначають інтенсивність випромінювання?
2. Назвіть способи використання сонячної енергії.
3. Які є способи перетворення сонячної енергії на електричну?
4. Схема й основні елементи геліоустановки для теплопостачання.
5. Назвіть форми теплосприймальних елементів сонячних колекторів.
6. Опишіть конструкцію вакуумного сонячного колектора.
7. Назвіть види нагримаджувачів сонячної енергії.
8. Які передумови є в Україні для розвитку сонячної енергетики?
9. Які завдання потрібно виконати для розвитку сонячної енергетики в Україні?
10. Як здійснюють перетворення сонячної енергії на фотоелектричних станціях?
11. Які відомі вам концентратори сонячного випромінювання?
12. Як працює сонячна електростанція баштового типу?
13. Що таке аеростатна сонячна електростанція?
14. Який принцип дії сонячно-вітрової електричної станції?
15. З якою метою застосовують теплові акумулятори на сонячних електричних станціях?
16. Опишіть схему функціонування фотоелектричної сонячної станції.
17. Перелічіть переваги і недоліки геліоенергетики.

Розділ 5

ВІТРОЕНЕРГЕТИКА

5.1. Енергетичні характеристики вітру

Енергія вітру – це кінетична енергія маси повітря, яка рухається під дією різниці атмосферних тисків, спричиненої різницею температури поверхонь води і землі, нерівномірно розігрітих сонячним випромінюванням. Різниця атмосферного тиску змушує повітря пересуватися від зони високого тиску до зони низького тиску. На енергію рухомої маси повітря перетворюється приблизно 2,5 % енергії випромінювання Сонця, яке потрапляє на поверхню Землі. Отже, вітер – це вид відновлюваної енергії, яку людство навчилася використовувати з давніх-давен. Одним із найперших способів використання вітру було винайдення вітрила десь у п'ятому тисячолітті до н. е. У першому сторіччі до нашої ери давньогрецький вчений Герон Олександрійський створив вітряк, що керував органом. У Китаї вітряки застосовували для наповнення водою зрошувальних систем рисових полів. Через низьку ефективність давніх вітроустановок їх поступово витіснили інші види енергії, використовуваної для приведення у рух різних механізмів і машин (насамперед млинів, водяних pomp тощо). Вітроенергетикою та вітроенергетичними установками (ВЕУ) знову зацікавилися після 1973 р., коли під час світової енергетичної кризи різко зросла світова ціна на такий енергоносіє, як нафта.

Значну частину вітроенергетичних установок використовують для виробництва електроенергії в автономному режимі, іншу частину – у єдиній енергосистемі. Царину відновлюваної енергетики, яка використовує кінетичну енергію вітру для перетворення на електроенергію, називають вітроенергетикою. ВЕУ для виробництва електроенергії вперше застосували у Данії в 1890 р. В Україні енергію вітру почали широко використовувати з початком

XX ст. У 1917 р. налічувалося близько 30 тис. вітряків сумарною потужністю близько 200 тис. кВт.

Енергія вітру забезпечує потреби людства екологічно чистою енергією. Після рекордного для галузі 2017 р. у Європі встановлена вітроенергетична потужність досягла 169 ГВт. Тепер вітер забезпечує 12 % електроенергії в країнах Європи, зокрема 44 % – у Данії та 22 % – у Німеччині. Вітроенергетична промисловість забезпечує 260 тисяч висококваліфікованих робочих місць у Європі. У глобальному масштабі цей показник становить 1,15 млн осіб.

Установлена потужність світової вітроенергетичної галузі становить 539 ГВт. Чотири штати США, Уругвай і штат Південна Австралія забезпечують сьогодні понад 30 % електропостачання за рахунок енергії вітру.

15 червня – Всесвітній день вітру. У табл. 5.1 наведено класифікацію вітрів за шкалою Бофорта.

Таблиця 5.1

Класифікація вітрів за шкалою Бофорта

Бали	Швидкість вітру, м/с	Потенційна питома потужність, Вт/м	Характеристика сили вітру	Характерні особливості дії вітру
1	2	3	4	5
0	0–0,4	0–0,04	штиль	Дим піднімається вертикально вгору
1	0,4–1,8	0,4–3,8	тихий	На воді з'являються брижі, флогер не рухається
2	1,8–3,6	3,8–30,3	легкий	Шелестить листя, на воді виразне хвилювання
3	3,6–5,8	30,3–126,8	слабкий	Коливається листя, розвіваються легкі прапори
4	5,8–8,5	126,8–400	помірний	Коливаються тонкі гілки, піднімається пил
5	8,5–11	400–865	свіжий	Розгойдуються листяні дерева, усі хвилі у баранця

1	2	3	4	5
6	11–14	865–1783,6	сильний	Розгойдуються товсті гілки, гудуть телефонні мережі
7	14–17	1783,6–3193	потужний	Усі дерева розгойдуються, з гребенів хвиль зривається піна
8	17–21	3193–6020	дуже потужний	Ламаються гілки дерев, важко йти проти вітру
9	21–25	6020–10156*	шторм	Вітер зриває димарі, невеликі руйнування
10	25–29	10156–15853	сильний шторм	Дерева вирвано з корінням, значні руйнування
11	29–34	15853–25550**	жорстокий шторм	Широкомасштабні руйнування
12	>34	>25550	ураган	Спустошувальні руйнування

* ВЕУ виведено з робочого стану.

** Можливі пошкодження ВЕУ, навіть до руйнування.

Характеристика вітру. Вітер утворюється унаслідок нерівномірного нагрівання земної поверхні Сонцем. Відомо, що на тій самій географічній широті є неоднорідні ділянки поверхні Землі – ґрунти і водянні простори, гори і лісові масиви, пустелі й болотяні низовини, які нагріваються по-різному. Над морями та океанами протягом дня повітря залишається порівняно холодним, значна частина енергії сонячних променів витрачається на випаровування води чи поглинається водою. Над поверхнею Землі повітря прогрівається більше, внаслідок чого розширюється, його густина знижується, а це сприяє переміщенню його у верхні атмосферні шари. Звільнене місце займають холодніші, щільніші повітряні маси, які до того були над водними просторами. Так виникає вітер як спрямоване переміщення великих мас повітря.

Різкі зміни температури в берегових районах великих морів і океанів зумовлюють циркуляції повітря більшого об'єму і швидкості, які називають мусонами і поділяють на морські та материкові. У них, як правило, великі швидкості, й упродовж ночі вони змінюють напрям. Аналогічні процеси відбуваються у гірських місцевостях і долинах, а також унаслідок різного нагрівання екваторіальних зон і полюсів. Характер циркуляції земної атмосфери ускладнюється дією сил інерції, які виникають внаслідок обертання Землі. Вони спричиняють різні відхилення повітряних течій, утворюючи багато циркуляційних потоків, які по-різному взаємодіють між собою.

Отже, вітер – це складний геофізичний процес, прогнозувати який можна тільки із певним ступенем імовірності. Для вітроенергетики важливими характеристиками вітру є поривчастість, вертикальний профіль, гранична швидкість.

Пульсації швидкості та енергії повітряного потоку пов'язані із загальним характером формування структури вітру, ландшафтними і рельєфними особливостями місцевості. Знання про такі пульсації важливі для ВЕУ. Нерідко причиною руйнувань вітроагрегату є динаміка і структура варіацій швидкості за короткі проміжки часу. До них належать прискорення потоку, тривалість поривів і їх збіг у різних точках поверхні вітроколеса, а також коефіцієнт поривчастості потоку. K_{II} – відношення максимальної вимірної швидкості до її середнього значення за вибраний проміжок часу (не більше від двох хвилин): $K_{II} = V_{\max}/V_{\text{ср}}$. Його значення змінюється від 1 до 3, і чим більша середня швидкість, тим менше значення K_{II} .

Вертикальний профіль вітру – це зміна його швидкості залежно від висоти в приземній зоні. Вплив земної поверхні на швидкість і напрям зменшується зі збільшенням висоти. Тому швидкість вітру з висотою зростає, а поривчастість і прискорення потоку зменшуються (рис. 5.1). Градієнт швидкості влітку, як правило, менший, ніж взимку, коли вертикальний перепад температур порівняно невеликий.

Для відображення профілю швидкості вітру та виконання розрахунків горизонтальної швидкості вітру на більших висотах у світовій практиці найчастіше застосовують дві аналітичні моделі, які для розрахунків використовують логарифмічний і степеневий закони. Але комплексна і динамічна природа приземного шару атмосфери не дає змоги стверджувати, що отриманий профіль надаватиме послідовно надійну екстраполяцію швидкості вітру від однієї висоти до іншої. Тому рекомендують використовувати обидві моделі та порівнювати одержані результати.

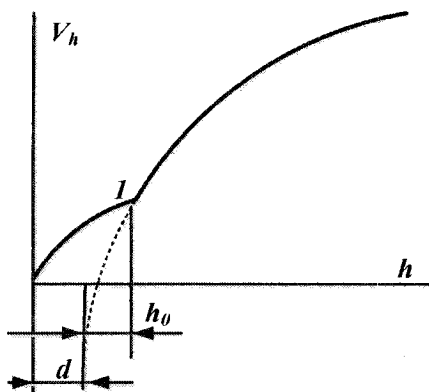


Рис. 5.1. Залежність швидкості вітрового потоку від висоти над поверхнею землі

Залежність швидкості вітру від висоти описують виразом

$$V_1 = V_\Phi \left(\frac{h_1}{h_\Phi} \right)^m, \quad (5.1)$$

де V_Φ — швидкість вітру на висоті флюгера (анемометра), м/с; V_1 — швидкість вітру на оцінювальній висоті, м/с; h_Φ — висота флюгера (анемометра), м; h_1 — висота оцінки швидкості вітру, м; m — показник степеня, який залежить від шорсткості поверхні ($m = 0,05-0,50$), для відкритих місць параметр $m=1/7=0,143$.

Залежність швидкості вітру від висоти вище від точки 1 (рис. 5.1) описують рівнянням

$$V_h = V_0 \ln \left(\frac{h-d}{h_0} \right), \quad (5.2)$$

де h — висота над поверхнею землі, м; h_0 — висота місцевих об'єктів (будинки, дерева) відносно рівня d , м; d — зміщення нульового рівня землі, м; V_0 — швидкість вітру на висоті місцевих об'єктів, м/с.

Місцевість, де швидкість вітру $V_0 \leq 5$ м/с, непридатна для встановлення ВЕУ. Якщо $V_0 \geq 8$ м/с, вже можна споруджувати ВЕУ.

Дані спостережень за швидкістю вітру на метеостанціях, крім приведення до умов відкритого місця, повинні бути екстрапольовані на висоту розташування ротора сучасних ВЕУ, яка нині сягає 100 м. Зміну профілю швидкості потоку повітря з висотою (чи вертикальний розподіл швидкості вітру) можна подати за різними наближеними функціями.

Логарифмічний закон виник на стику механіки рідини та атмосферних досліджень. Для визначення зміни середньої швидкості вітру залежно від висоти над землею поверхнею Д. Л. Лайтман (1970) запропонував формулу

$$V = V_1 \frac{\ln \frac{h}{h_0}}{\ln \frac{h_1}{h_0}}, \quad (5.3)$$

де V – швидкість вітру на висоті h , м; V_1 – відома швидкість вітру на висоті h_1 , м/с; h_0 – висота, на якій швидкість вітру в місці вимірювання дорівнює нулю (коефіцієнт шорсткості поверхні).

Сезонні відмінності в локальних умовах місцевості можуть впливати на значення h_0 у зв'язку зі зміною рослинного покриву, появою та зникненням снігового покриву тощо. Вираз (5.3) використовують за нейтрального профілю вітру, незначної конвекції, адіабатичного градієнта температури і нейтральної стратифікації приземного шару атмосфери. Вираз справедливий для відкритої рівної місцевості з висотами від 10 см до 100 м за адіабатичного стану атмосфери. Його не рекомендують використовувати для визначення середніх швидкостей вітру, якщо найбільший відрізок часу менший від десятихвилинного інтервалу, а також на пересіченій місцевості, оскільки характер зміни вітру з висотою передбачити складніше, і в таких умовах використання формули може призвести до значних похибок.

Швидкість вітру змінюється протягом доби, сезону і року. Тому розглядають добові, місячні та сезонні варіації швидкостей, за якими визначають тенденційну зміну їх у вказані періоди й

оцінюють макроструктуру повітряного потоку. Швидкості вітру в різних регіонах країни наведено у табл. 5.2. Незважаючи на незначні швидкості вітру на території України, його вітроенергетичний потенціал достатньо великий. У нашій державі виділено сім регіонів, для яких вітроенергетика економічно ефективна: Карпатський, Причорноморський, Приазовський, Донбаський, Західно-Кримський, Гірсько-Кримський, Керченський, а також Харківська та Полтавські зони.

Таблиця 5.2

**Середньомісячні та середньорічні швидкості вітру
для деяких пунктів України**

Пункт	Ви- сота флю- гера, м	Середньомісячні швидкості на висоті флюгера, м/с											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Період спостереження 10 років													
Дніпро	11	5,5	6,0	5,4	5,2	4,6	3,7	3,6	3,8	4,2	4,3	5,1	5,4
До- нецьк	10	6,2	6,7	5,6	5,4	4,6	3,6	3,6	3,6	3,9	4,3	6,5	5,8
Київ	17	2,7	2,9	2,7	2,6	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	2,3	2,5	2,5
Львів	10	3,8	4,2	4,2	3,5	2,9	2,8	2,6	2,5	2,7	3,0	4,3	3,6
Харків	14	4,6	5,1	4,5	4,5	4,2	3,3	3,5	3,2	3,5	3,6	4,3	4,5
Сімфе- рополь	12	4,9	5,2	4,9	4,7	4,7	3,7	3,8	3,5	3,6	4,0	4,8	4,8
Період спостереження 7–30 років													
Маріу- поль	10	6,7	7,1	7,2	6,7	6,2	5,2	4,9	4,4	4,7	5,6	7,0	7,1

У Женеві Всесвітня метеорологічна організація координує світові метеослужби, які вимірюють метеопараметри, зокрема швидкість вітру, значення якої усереднюють за показами анемометра за інтервал часу 10 хв на висоті 10 м на метеостанціях, розташованих поблизу міст і аеропортів. Характеристика сили вітру та дія його на роботу ВЕУ визначають умови експлуатації таких установок, методи керування таким НДЕ та узгодження його функціонування зі споживачами.

Основна умова проектування ВЕУ – захистити їх від руйнування сильними випадковими поривами вітру (їх створює горизонтальна складова вітру, більша від вертикальної). Один раз за 50 років швидкість вітру зростає до 5–10-кратних значень (порівняно із середньою). Оскільки вітрові навантаження на ВЕУ пропорційні до куба швидкості вітру, це потребує інженерних рішень щодо міцності конструкцій усіх ВЕУ, щоб запобігти аварійним ситуаціям.

Інститут відновлюваної енергетики НАН України склав карту вітроенергетичного потенціалу нашої країни. Найпривабливішими регіонами для використання енергії вітру є узбережжя Чорного та Азовського морів, гірські райони Криму, територія Карпатських гір, Одеська, Херсонська та Миколаївська області.

5.2. Перетворення енергії вітру вітротурбінами

Вітрові електростанції перетворюють кінетичну енергію вітру на енергію обертового руху, що обертає турбіну і генератор, створюючи електричний струм. Вітрова енергетична установка складається із вітродвигуна, машинного відділення, опори (вежі). Вітродвигуни, що використовують для урухомлення електричного генератора ВЕУ, поділяють на два види: роторного і пропелерного типу.

Переважно осі вітроенергетичного генератора розташовано горизонтально, а геометричні розміри лопатей великі. У табл. 5.3 наведено характеристики надпотужних ВЕУ різних фірм-виробників за даними [11, 12].

Електрогенератор та редуктор, який з'єднує його із вітровим колесом, розташовують звичайно зверху опорної башти у поворотній головці. Тут розміщені також: обгінна муфта, що від'єднує вал вітродвигуна від вхідного вала мультиплікатора для запобігання вентиляторному режиму; мультиплікатор зі змінним чи постійним передавальним відношенням для зведення частоти обертання вітродвигуна до рівня, визначеного характеристиками електрич-

ного генератора (мультиплікатор – підвищувальний редуктор, у якого частота обертання вихідного вала вища, ніж у вхідного); електричне, механічне чи гідравлічне гальмо; муфта зчеплення, що з'єднує вихідний вал мультиплікатора із валом електричного генератора; електромеханічний чи гідравлічний привід системи регулювання кута встановлення лопаті та кута конусності; інформаційні й контрольні блоки системи автоматичного регулювання; електромеханічний чи гідравлічний привід кута орієнтування на напрямок вітрового потоку; допоміжне обладнання.

Таблиця 5.3

Надпотужні моделі ВЕУ

№ з/п	Виробник	Модель ВЕУ	Номинальна потужність, МВт	Діаметр ротора, м
1	Enercon	E126	7,5	126
2	Gamesa	G14X-7 MW	7,0	140
3	Samsung	S7.9-171	7,0	171
4	Mitsubishi	SeaAngel 7 MW	7,0	165
5	Vestas	V164	7,0	164
6	MingYang	MingYangSCD 6.5 MW	6,5	140
7	Senvion	6.2 MW/126	6,2	126
8	Nordex	N150	6,0	150
9	REpower	REpower 6MW	6,0	126
10	Siemens	SWT-6.0-154	6,0	154
11	Senvion	5MW	5,1	126
12	Areva Multibrid	MultibridM5000-135	5,0	135
13	Bard Engineering	GmbHBard 5.0	5,0	122
14	Gamesa	G128-5 MW	5,0	128
15	Sinovel	SL5000	5,0	128
16	Zhejiang	WindayWD 139/5000	5,0	139

ВЕУ класифікують:

1. За положенням осі обертання на:

✓ вертикально-осьові, з вертикальною віссю обертання

(рис. 5.2);

- ✓ горизонтально-осьові (рис. 5.3).
- 2. За призначенням:
 - ✓ для виробництва електроенергії (вітроелектрогенератор);
 - ✓ для механічної роботи (млин, турбіна).
- 3. За потужністю:
 - ✓ малої потужності (до 100 кВт включно, діаметр колеса 3–10 м, дві–три лопаті; застосовують для побутових потреб, для виробництва електрики);
 - ✓ середньої потужності (від 100 до 1000 кВт, діаметр колеса 25–44 м, дві–три лопаті; призначені для виробництва електроенергії);
 - ✓ великої потужності (понад 1000 кВт, діаметр колеса більше ніж 45 м, дві лопаті; призначені для виробництва електроенергії).
- 4. За частотою обертання вітрового колеса:
 - ✓ постійна (ВЕУ працюють у складі потужної енергосистеми);
 - ✓ змінна (ВЕУ працюють автономно).
- 5. За з'єднанням вітрового колеса із електрогенератором:
 - ✓ пряме, жорстке (малоефективне);
 - ✓ через проміжний перетворювач енергії – буфер (зменшує коливання частоти обертання вітроколеса, ефективніше використовує енергію вітру і потужність електрогенератора).

Повітряний потік, що набігає на профіль лопаті під кутом α до її хорди, розділяється на дві частини: верхню і нижню. За законом Бернуллі про нерозривність потоку швидкість повітря над верхньою кромкою лопаті буде більшою, ніж над нижньою. Тому тиск на верхньому боці профілю менший, ніж під нижнім. Унаслідок різниці тиску утворюється аеродинамічна сила F , спрямована у бік нижчого тиску. Цю силу можна розкласти на дві складові: підйомну силу F_y , що перпендикулярна до вектора швидкості вітру, і силу опору повітряному потоку F_x , яка спрямована вздовж потоку (рис. 5.4).

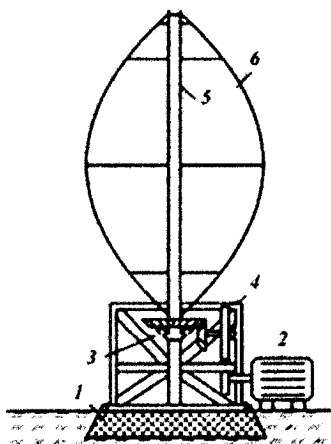


Рис. 5.2. Вертикально-осьові ВЕУ:
 1 – фундамент, 2 – генератор,
 3 – опорний підшипник,
 4 – редуктор,
 5 – головний вал, 6 – лопаті
 ротора

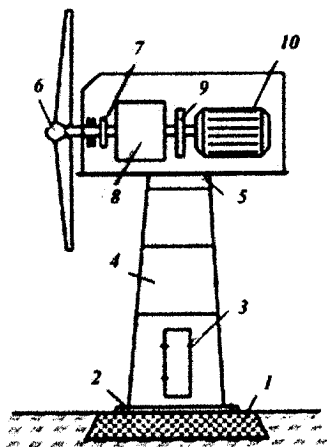


Рис. 5.3. Горизонтально-осьові ВЕУ:
 1 – фундамент, 2 – опорне кільце,
 3 – вхід у башту, 4 – башта з
 трьома секціями, 5 – поворотне
 кільце з приводом, 6 – лопатевий
 ротор, 7 – муфта, 8 – редуктор,
 9 – гальмівний диск, 10 – генератор

Значення цих сил розраховують за такими виразами [18]:

$$F_y = c_y \frac{1}{2} \rho S v^2, \quad (5.4)$$

$$F_x = c_x \frac{1}{2} \rho S v^2, \quad (5.5)$$

де ρ – густина повітря, кг/м^3 ; S – площа, яку описують лопаті вітрового колеса, м^2 ; v – швидкість потоку повітря, м/с ; c_y , c_x – безрозмірні коефіцієнти підйомної сили та сили опору повітряному потоку.

Коефіцієнти c_y , c_x залежать від типу і геометрії аеродинамічного профілю лопаті, а також від кута α набігання повітряного потоку (рис. 5.5). Їх визначають під час випробування в аеродинамічній трубі.

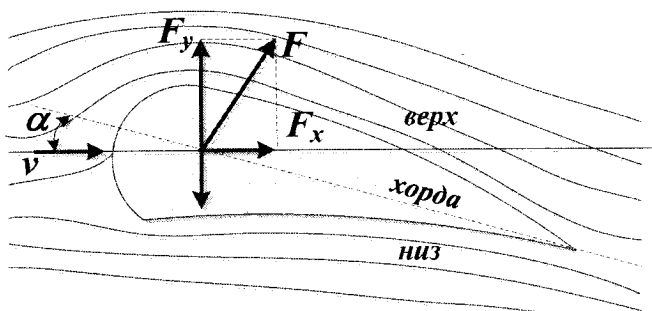


Рис. 5.4. Взаємодія аеродинамічного профілю лопаті з повітряним потоком

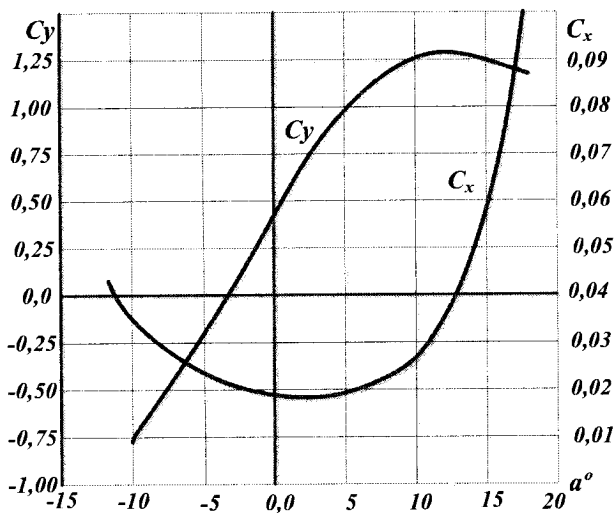


Рис. 5.5. Залежність коефіцієнтів C_y , C_x від кута потоку α

Сила тяжіння, що діє на лопать, урівноважується несучою конструкцією вітряка і не бере участі у формуванні крутного моменту колеса.

5.3. Виробництво електроенергії вітроенергетичними установками

5.3.1. Фізичні процеси перетворення енергії вітру

Потік повітря має певний запас кінетичної енергії E_K , яку можна перетворити на механічну роботу або електричну енергію за допомогою спеціальних пристроїв і установок. Важливою характеристикою технічних властивостей вітру є його швидкість. Кінетична енергія E_K вітрового потоку, що рухається зі швидкістю v і має масу m , дорівнює

$$E_K = \frac{mv^2}{2}. \quad (5.6)$$

Маса повітря густиною γ , що може пройти через площу S , охоплену вітроколесом за одиницю часу, дорівнює

$$m = \gamma v S, \quad (5.7)$$

де γ – густина повітря, кг/м^3 ; v – швидкість вітру, м/с ; S – площа, через яку протікає вітровий потік, м^2 ($S = \pi R^2$, R – довжина лопаті, м).

Маса повітря, що проходить через трубку радіусом поперечного перерізу R (рис. 5.6) зі швидкістю v за одиницю часу Δt , дорівнює

$$\begin{aligned} m &= \gamma S dl = \\ &= \gamma \pi R^2 v \Delta t, \end{aligned} \quad (5.8)$$

де dl – елемент шляху потоку, який долається за час Δt .

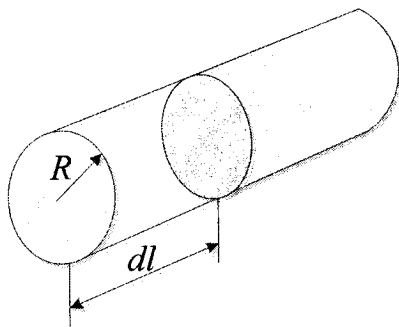


Рис. 5.6. Трубка потоку повітря

Підставивши значення маси повітря у формулу (5.6), отримаємо рівняння для визначення кінетичної енергії потоку повітря, а також формулу для визначення його потужності.

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\gamma\pi R^2 v^3 t, \quad (5.9)$$

$$P_B = \frac{E_K}{t} = \frac{1}{2}\gamma\pi R^2 v^3. \quad (5.10)$$

Густина повітря залежить від атмосферного тиску і температури повітря

$$\gamma = \frac{p}{R_S T}, \quad (5.11)$$

де p – тиск повітря, (Па); R_S – газова стала ($R_S = 287,058$ Нм/(кг·К)); T – абсолютна температура повітря, (К= t °C+273,15).

Потужність вітротурбіни дещо зменшується, якщо врахувати характеристичний коефіцієнт c_p , що визначає частку енергії, яку може видобути вітрова турбіна із вітрового потоку

$$P_{\text{пов}} = \frac{1}{2}\gamma c_p F v^3. \quad (5.12)$$

Якщо б вітротурбіна повністю використовувала енергію вітрового потоку, швидкість руху повітря за вітротурбіною дорівнювала б нулю. Німецький фізик Альберт Бетц визначив граничне значення характеристичного коефіцієнта турбіни, яке становить $c_p^{\text{max}} = 0,599$. Отже, лише 59 % кінетичної енергії вітру можна перетворити на механічну. Значення характеристичного коефіцієнта турбіни залежить також від відношення швидкості обертання турбіни λ , яке визначають так

$$\lambda = \frac{\omega_T R}{v}, \quad (5.13)$$

де ω_T – кутова швидкість обертання турбіни, рад/с; R – радіус вітроколеса, м.

Залежність $c_p = f(\lambda)$ наведено на рис. 5.7, з неї видно, що для досягнення максимальної потужності вітротурбіна повинна працювати з оптимальним відношенням швидкості обертання.

На практиці значення характеристичного коефіцієнта турбіни змінюється у діапазоні 0,25–0,45 в. о.

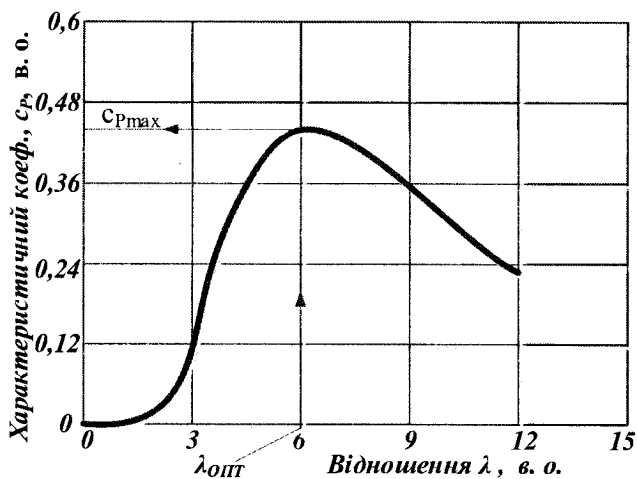


Рис. 5.7. Залежність характеристичного коефіцієнта турбіни від відношення швидкості обертання

На рис. 5.8 наведено залежність потужності ВЕУ від швидкості вітру. Тут виділено три характерні точки режиму роботи вітрового колеса. До точки А за малих швидкостей вітру до 3–4 м/с турбіна не працює. Далі ВЕУ генерує певну потужність, яка залежить від швидкості вітру, аж поки у точці Б (швидкість вітру приблизно 12–13 м/с) встановлюється номінальний режим роботи. На ділянці від точки Б до В підтримують номінальний режим роботи, незважаючи на збільшення швидкості вітру, аж до значення $v_{\text{ВИМК}}$ – швидкості вимкнення, яка для різних турбін змінюється у діапазоні 20–25 м/с. Після досягнення такого значення швидкості ВЕУ від’єднується від мережі.

У ВЕУ використовують дво- і трилопатеві вітроколеса. Сьогодні у світі найпоширеніші трилопатеві горизонтальні вітро-турбіни. Багатолопатеві колеса, які розвивають великий крутний момент за незначного вітру, використовують переважно там, де не потрібно великої частоти обертання вітрового колеса (наприклад,

на помпових станціях для перекачування води). Оптимальна частота обертання вітроколеса то менша, що більший його радіус, тому невеликі вітроколеса радіусом менше ніж 2 м вдається з'єднати із генератором напряму. У ВЕУ великих розмірів застосовують редуктори для підвищення частоти обертання генератора чи використовують багатополосні генератори. Традиційно у ВЕУ три лопаті, але можуть бути дві, чотири, шість тощо. Для окремого значення діаметра вітрового колеса зі збільшенням кількості лопатей коефіцієнт використання вітру зростає. Збільшення цього коефіцієнта за переходу від однієї до двох лопатей становить 10 %, а з переходом від двох до трьох лопатей – 5 %.

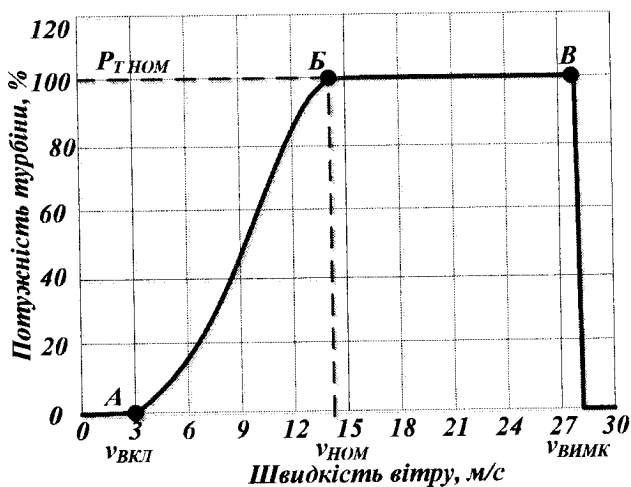


Рис. 5.8. Залежність потужності вітрової турбіни від швидкості вітру

На рис. 5.9 наведено графік залежності діаметра ротора (діаметра круга, що описують лопаті вітряка) від потужності ВЕУ. Очевидно, що для підвищення потужності ВЕУ необхідно збільшувати діаметр ротора.

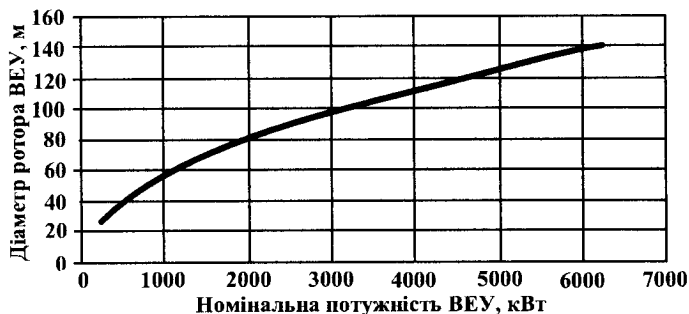


Рис. 5.9. Залежність діаметра ротора від потужності ВЕУ

5.3.2. Регулювання потужності вітроенергетичних установок

Зі зміною швидкості вітру змінюється вихідна потужність електростанції (рис. 5.8). Це основна залежність, на яку треба звертати увагу під час планування будівництва ВЕУ. Важливим параметром станції є її стартова швидкість, за якої починають виробництво електроенергії.

За способом регулювання потужності всі вітроустановки поділяють на два типи: регулювання зміною кута атаки лопатей відповідно до швидкості вітру та конструкцією профілю лопаті по її довжиною так, щоб ефективність окремих ділянок лопаті знижувалась зі зростанням швидкості вітру, в результаті чого після досягнення номінальної потужності зі збільшенням швидкості вітру потужність ВЕУ не зростає чи зростає незначно.

Можливе також регулювання зміною напрямку встановлення гондоли залежно від сили і напрямку вітру. Ці процедури спрямовані насамперед на підтримування постійного значення потужності та необхідних якісних характеристик електричної енергії, яка віддається в електричну мережу.

Регулювання зміною кута встановлення лопатей ротора (англ. *Pitch regulation*) полягає у зміні кута атаки вітру на лопаті

ротора (рис. 5.10). Це дає змогу підтримувати сталу швидкість обертання ротора. Пристрій автоматичного регулювання на підставі інформації про швидкість вітру та величину генерованої потужності за допомогою сервомеханізмів змінює кут встановлення лопатей ротора щодо напрямку атаки вітру. На рис. 5.10, *а* показано положення лопаті, коли кут атаки дорівнює нулю (це *флюгерне* положення). Рівність тисків повітряного потоку над і під лопаттю утримує її у цьому положенні. На рис. 5.10, *б* кут атаки $\alpha > 10^\circ$. Потік повітря, обтікаючи лопать, створює обертальну силу, що зумовлює повільне обертання вітродвигуна. На рис. 5.10, *в* зображено розташування лопаті, коли кут атаки достатній для створення необхідного для розганяння ротора генератора до синхронної частоти обертання і навіть вищої у допустимих межах.

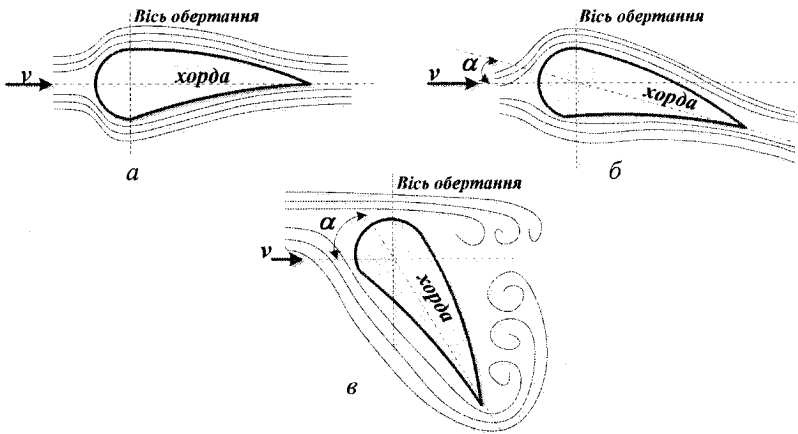


Рис. 5.10. Розташування лопаті під час регулювання зміною кута атаки: *а* – кут атаки $\alpha = 0$; *б* – $\alpha > 0$; *в* – $\alpha \gg 0$

Стала швидкість обертання ротора безпосередньо впливає на стабільність та ефективність роботи вітроенергетичної установки, а також на зниження рівня шуму. Якщо швидкість вітру зростає до значень, що загрожують руйнуванням вітроустановки, можливе

аеродинамічне гальмування через встановлення лопатей у так званий прапорець.

Вітроенергетичні установки обладнують системою зміни кута встановлення лопатей у межах $0-80^\circ$ із застосуванням гідравлічних приводів. Вузол регулювання кута встановлення лопатей розміщено у ступиці ротора. Гідравлічна частина системи регулювання діє окремо на кожну лопать, забезпечуючи одночасно оптимальне використання ВЕУ, зниження рівня шуму та гальмування ротора у разі необхідності. В електростанціях потужністю до 200 кВт ротор встановлюють на повільнообертovому валу, оберти якого передаються через редуктор до швидкообертovого вала. Швидкообертovий вал сполучається із валом генератора. Найчастіше ротор обертається з частотою 15–30 об./хв, а редуктор збільшує частоту обертання у 50 разів до 1500 об./хв. Недоліком такого способу регулювання є наявність рухомих частин у конструкції вітрового колеса, що збільшує ймовірність виникнення аварії.

Істотною вадою такого способу регулювання є велика кількість рухомих частин у конструкції вітротурбіни, що знижує її надійність.

Регулювання через розрідження (англ. *Stall regulation*) полягає у використанні аеродинамічної характеристики лопатей ротора, тобто належить до найпростіших пасивних методів. За певної швидкості вітру за лопатями ротора починає створюватися турбуленція і настає так зване розрідження лопатей. Обертальний момент, переданий генератору ротором вітродвигуна, зменшується, що дає змогу підтримувати порівняно постійною вихідну потужність вітроенергетичної установки. Лопаті мають відповідну форму і наглухо закріплені в ступиці ротора. Основною перевагою цього виду регулювання є відсутність багатьох додаткових елементів і деталей систем, пов'язаних із управлінням та регулюванням кута встановлення лопатей ротора, що істотно спрощує конструкцію вітроенергетичної установки.

Основні недоліки такого способу регулювання – дещо менша ефективність перетворення енергії вітру, нестабільність вихідної

потужності під час виникнення турбулентності, а також погіршення параметрів якості генерованої електричної енергії.

Регулювання зміною встановлення гондоли за напрямком вітру (англ. *Yaw control*) полягає у такій зміні положення осі обертання ротора відносно напрямку вітру (аж до перпендикулярного), що забезпечує косе набігання потоку вітру. У такому разі через ротор протікає менша кількість повітря, а також зменшується підйомна сила унаслідок зміни кута атаки. Потужність вітро-двигуна P_γ за відхилення ротора від прямого потоку змінюється прямо пропорційно до куба косинуса кута відхилення γ

$$P_\gamma = P_0 \cos^3 \gamma, \quad (5.14)$$

де P_0 – потужність вітро-двигуна за значення $\gamma=0^\circ$.

Таке регулювання можна реалізувати за допомогою стежного пристрою і додаткового привідного двигуна. Активне регулювання положення гондоли застосовують переважно у потужних вітро-установках, де керований двигун встановлює гондолу так, як необхідно, щодо напрямку вітру. Завдяки цьому можна підтримувати на постійному рівні вихідну потужність вітроустановки. Пасивне регулювання за допомогою спеціального напрямного прапорця застосовують у вітроустановках меншої потужності.

Регулювання вітро-двигуна зривом потоку повітря із лопаті застосовують на сучасних вітроустановках великої потужності. Суть цього методу полягає у заздалегідь розрахованому зриві потоку із певних ділянок лопаті, міцно закріпленої на роторі, у разі зростання швидкості вітру і відповідно збільшення кута атаки. Для реалізації цього методу регулювання необхідний спеціальний профіль лопаті.

Регулювання зривом потоку із лопаті застосовують на ВЕУ великої потужності із асинхронним генератором.

Регулювання зміною опору обмотки ротора (англ. *Load control*) здійснюють зміною опору обмотки ротора генератора. Унаслідок цього відбувається перехід від однієї зовнішньої характеристики на іншу, вигіднішу за конкретних умов. Опір можна змінювати увімкненням у коло ротора генератора додаткового опору або використати напівпровідникові перетворювачі у колі ротора.

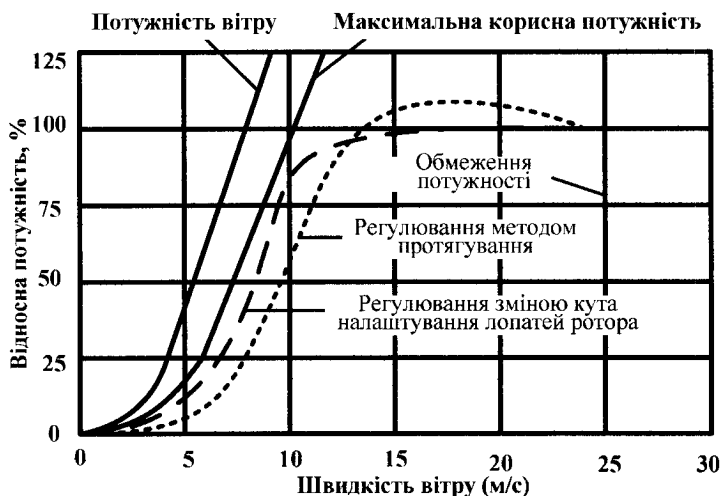


Рис. 5.11. Залежність потужності малої ВЕУ від швидкості вітру

Регулювання за методом протягування (рис. 5.6) полягає у використанні природної аеродинамічної характеристики ротора, особливістю якої є обмеження обертового моменту за високих швидкостей вітру. Лопаті потрапляють в область протягування, коли ламінарна течія повітря над лопаттю загинається і лопать втрачає підйомну силу. Що вища швидкість вітру, то більша частина лопаті перебуває у стані протягування. Перевагою цього методу регулювання є відсутність рухомих частин у конструкції ротора, лопаті закріплені під сталим кутом, що істотно спрощує будову вітрової станції.

В електростанціях великої потужності частіше використовують безпосередній привід генератора (без редуктора), швидкість узгоджують зміною кількості пар полюсів асинхронної машини.

5.3.3. Особливості роботи генераторів ВЕУ

Ефективність перетворення механічної енергії на електричну у ВЕУ досягає 95 %, а втрати від пересилання електроенергії

становлять 10 %. Зважаючи на це, у ході проектування ВЕУ потрібно врахувати такі умови:

- ✓ для максимальної ефективності роботи вітроколеса необхідно змінювати частоту його обертання зі зміною швидкості вітру; водночас для максимальної ефективності роботи електрогенератора потрібна постійна частота обертання;

- ✓ механічні системи керування частотою обертання вітроколеса складні й дорогі, тому доцільно керувати частотою обертання вітроколеса, змінюючи електричне навантаження генератора;

- ✓ малі вітроколеса, радіусом до 2 м, варто з'єднувати із генератором безпосередньо; для вітроколес більших радіусів встановлюють редуктори чи застосовують багатополюсні генератори, які працюють на менших частотах обертання;

- ✓ у конструкції ВЕУ передбачають можливість відімкнення генератора від вітроколеса із переходом на акумуляторне живлення електроспоживачів.

У ВЕУ переважно використовують синхронні, асинхронні електрогенератори, а у ВЕУ малої потужності також генератори постійного струму. Оскільки частота обертання вітроколеса залежить від швидкості вітру, для забезпечення синхронної частоти струму генератора застосовують певні режими регулювання, зокрема режим постійної (фіксованої) номінальної частоти обертання ротора генератора і режим змінної частоти обертання ротора.

Режим фіксованої частоти обертання ротора має певні особливості стосовно синхронних і асинхронних генераторів.

ВЕУ із синхронними генераторами. Динамічна стійкість і синхронність (рівність частоти струму генератора і системи) роботи таких ВЕУ з енергосистемою можливі за умов фіксованої номінальної частоти обертання. Тоді вал вітрового колеса повинен обертатися із фіксованою або близькою до неї швидкістю у широкому діапазоні зміни швидкості вітру. Це означає, що добуток фіксованої частоти обертання вала вітроколеса і передавального відношення мультиплікатора (редуктора) повинен бути пропорційним до частоти струму енергосистеми з урахуванням кількості пар полюсів генератора. Тому доцільно застосовувати явнополюсні

синхронні генератори. В умовах зміни швидкості вітру стабільність частоти обертання вала генератора найефективніше забезпечують регулюванням кута встановлення лопатей за частотою обертання вала на виході мультиплікатора.

ВЕУ із асинхронними генераторами. У вітроустановках із фіксованою частотою обертання застосовують асинхронні генератори із короткозамкненим або з фазним ротором (рис. 5.12).

Такі ВЕУ перетворюють енергію вітрового потоку на електроенергію, якщо статор генератора увімкнений в електромережу, а добуток частоти обертання вітродвигуна і передавального відношення мультиплікатора (коробки передач) більший від синхронної частоти струму. Асинхронна ВЕУ повинна мати захист від перевищення частоти обертання, бо пориви вітру можуть перевести асинхронну машину на нестійку ділянку механічної характеристики, що може призвести до аварійної ситуації. Запуск асинхронного генератора ВЕУ відбувається у режимі двигуна на неробочому ході. Після досягнення підсинхронної частоти обертання ротора підмикають вітрове колесо, яке збільшує частоту обертання ротора і переводить асинхронну машину в режим генератора.

Загальний коефіцієнт використання енергії вітрового потоку ВЕУ з асинхронними генераторами нижчий, ніж у синхронної. Це зумовлено тим, що для збудження асинхронного генератора споживається реактивний струм від енергосистеми. Струм намагнічування асинхронної машини становить 20–25 % номінального струму, тому й потужність збудження близька до 20–25 % від номінальної потужності. Потужність системи збудження синхронної машини не перевищує 1 % від номінальної потужності.

На рис. 5.12, а наведено варіант ВЕУ із асинхронним генератором із короткозамкненим ротором. Для створення необхідного обертального магнетного поля у вітроустановці застосовано батарею статичних конденсаторів БСК. У цих генераторах регулювання потужності здійснюють зміною кількості пар полюсів. За малої швидкості вітру кількість пар полюсів може змінюватися до чотирьох, шести й восьми пар. Перевагою таких генераторів є простота їх виконання, надійна робота і низька вартість, а недоліком – неможливість регулювання реактивної потужності.

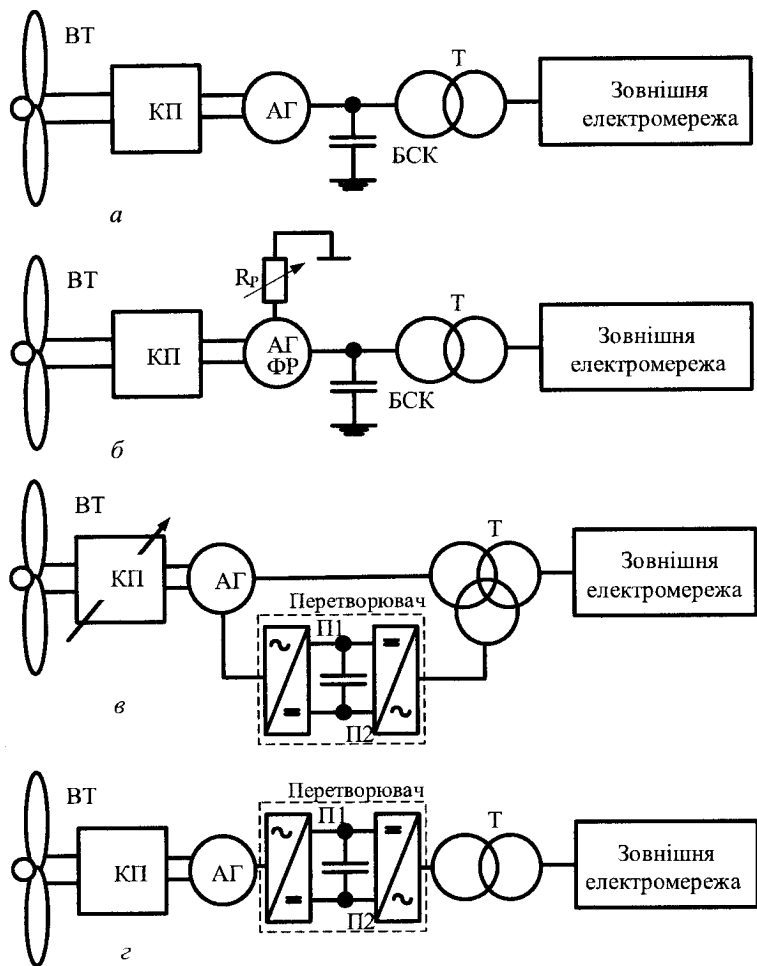


Рис. 5.12. ВЕУ із асинхронним генератором: а – генератор із короткозамкненим ротором; б – генератор із фазним ротором зі змінним опором у колі ротора; в – асинхронний генератор із подвійним живленням; г – генератор із перетворювачем і регульованою коробкою передач; ВТ – вітротурбіна; КП – коробка передач; АГ – асинхронний генератор; АГФР – асинхронний генератор із фазним ротором; БСК – батарея статичних конденсаторів; Т – трансформатор; П1, П2 – перетворювачі; СГ – синхронний генератор

Унаслідок фіксованої частоти обертання ротора в разі зміни швидкості вітру виникають коливання моменту турбіни, а у малопотужній електромережі можливі значні коливання напруги.

У ВЕУ із *асинхронним генератором із фазним ротором* (рис. 5.12, б) опір R_p у колі ротора регулюють. Збільшення опору R_p дає змогу підвищити значення ковзання характеристики моменту $M = f(s)$. Для створення обертового магнетного поля генератор споживає із електромережі велику реактивну потужність, для компенсації якої також використовують БСК.

В *асинхронних генераторах із подвійним живленням* статор підімкнений безпосередньо до електромережі, а живлення фазної обмотки ротора здійснюють напругою із частотою ковзання за допомогою силового перетворювача. Потужність перетворювача сягає 25–30 % від потужності генератора. Частота обертання ротора може змінюватися у межах 25–30 %. Подвійне живлення асинхронного генератора дає змогу регулювати активну і реактивну потужність. Перетворювач П1 здійснює незалежне регулювання активної потужності у місці підмикання ВЕУ до мережі, а П2 підтримує задане значення постійної напруги у колі живлення ротора. Застосування перетворювача дає змогу розділити частоту електромережі й частоту обертання ротора генератора та керувати режимом ВЕУ за зміни швидкості вітру.

Залежно від частоти обертання ротора генератора потужність, генерована ВЕУ, передається у мережу по обмотці статора та генерується (або споживається) через обмотку ротора. Якщо частота обертання ротора перевищує синхронну, то потужність через обмотку ротора передається у мережу, а якщо менша – споживається з мережі. Якщо ж частота обертання ротора дорівнює синхронній, то асинхронний генератор із подвійним живленням можна розглядати як синхронну машину. Можливість зміни кутової швидкості обертання ротора у широкому діапазоні дає змогу підтримувати максимальне значення характеристичного коефіцієнта турбіни за різних швидкостей вітру.

У ВЕУ із *повним перетворювачем* (рис. 5.12, г) генератор підмикають до електромережі через перетворювач, який забезпечує

видавання активної та реактивної потужності в мережу із незалежним регулюванням значення потужностей. Повне розділення генератора і зовнішньої мережі створює умови, коли генератор не реагує на збурення в енергосистемі, яке спричиняє відхилення частоти струму. Недоліком таких генераторів є висока вартість перетворювачів, які повинні забезпечити видавання повної потужності у мережу.

Режим змінної частоти обертання ротора ефективніший від режиму із фіксованою частотою. Тут частота обертання вітроколеса пропорційна до швидкості вітру, а механічна потужність вітроколеса вища як за малої, так і за великої швидкості вітру порівняно із режимом фіксованої частоти. Тому й забезпечують більший сумарний коефіцієнт використання енергії вітрового потоку. Напруга генератора у такому режимі буде пропорційною до частоти обертання ротора, тому для забезпечення необхідного значення напруги і її частоти, яку вимагає споживач, необхідно застосовувати регульований перетворювач частоти. Отже, погодження характеристик вітроколеса й електричного навантаження покладається на електричну частину ВЕУ.

Сьогодні спостерігають тенденцію до застосування безредукторних ВЕУ (або із одноступеневим редуктором) за такими схемами:

- багатополосна синхронна машина, некерований або керований випрямляч, перетворювач постійного струму на змінний 50 Гц;
- багатополосна асинхронна машина зі збудженням від автономного інвертора, випрямляч, перетворювач постійної напруги на змінну 50 Гц.

За вартістю напівпровідникові перетворювачі майже дорівнюють вартості мультиплікатора, але можливості узгодження навантаження і вітрогенератора у широкому діапазоні зміни швидкості вітру значно більші, а також забезпечують високий ККД та надійність ВЕУ.

У табл. 5.4 наведено призначення та характеристики ВЕУ перелічених класів.

Класи вітроенергетичних установок

Клас	Потужність ВЕУ	Ступінь автономності	Спосіб керування
А	$P > P_{ЕНС}$	Автономна	а) кроком вітроколеса; б) навантаженням
В	$P = P_{ЕНС}$	Вітро/дизельна	а) окрема робота ВЕУ і дизель-генератора; б) спільна (паралельна робота ВЕУ і дизель-генератора)
С	$P \ll P_{ЕНС}$	Підключена до потужної ЕНС	а) паралельна робота генератора постійного струму; б) інвертування постійного струму; в) зміною значення ковзання асинхронного генератора

Клас А. $P \geq 5P_{ЕНС}$ (рис. 5.8).

Такі ВЕУ призначені: для освітлення, живлення приладів маяків, засобів зв'язку у віддалених районах, де споживана потужність не перевищує 5 кВт, чи для опалення із потужністю до 20 кВт.

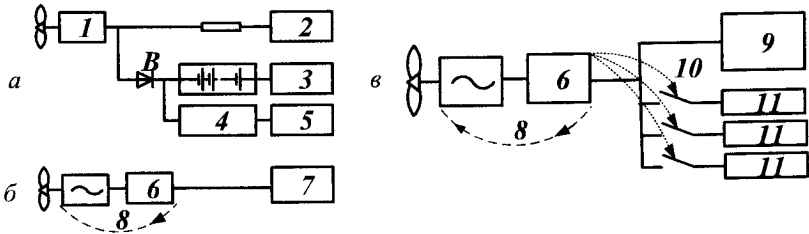


Рис. 5.13. Схеми узгодження ВЕУ зі споживачами: 1 – ланка нестабілізованої напруги або частоти; 2 – нагрівач; 3 – акумуляторні батареї; 4 – інвертор напруги; 5 – ланка стабілізованої напруги і частоти; 6 – регулятор; 7 – ланка стабілізованого струму; 8 – зворотний зв'язок; 9 – пріоритетне навантаження; 10 – керування навантаженням; 11 – споживачі ЕЕ; В – випростувач напруги

У першому випадку застосовують такі способи стабілізації частоти обертання генератора:

✓ механічним керуванням лопатями вітроколеса – крок лопатей змінюється зі зміною швидкості вітру. Недоліки такого способу: втрати енергії вітропоток, складність і невисока надійність;

✓ зміною навантаження електрогенератора. Лопаті працюють в оптимальному режимі. Електронне керування робить цей спосіб надійним й дешевим (рис. 5.13, б, в).

Клас В. Для таких ВЕУ часто другим джерелом електроенергії є дизель-генератор, котрий вмикають автономно за відсутності вітру чи паралельно в умовах слабого вітру. На практиці використовують дві схеми розподілу виробленої електроенергії (рис. 5.14):

1. Одноканальна схема. На виході системи – стабілізована за частотою трифазна напруга (рис. 5.14, а). Дизель-генератор працює майже цілодобово (особливо для освітлення) за відсутності вітру. В умовах сильного вітру майже 70 % електроенергії гаситься на баластних опорах.

2. Багатоканальна схема (рис. 5.14, б). За слабого вітру споживачів дешевої електроенергії (від ВЕУ) відмикають автоматично, що зменшує навантаження на ЕНС. Завдяки цьому можна стабілізувати частоту вітроелектрогенератора. Переважно дорогу стабілізовану енергію за слабого вітру постачають споживачам від дизель-генератора.

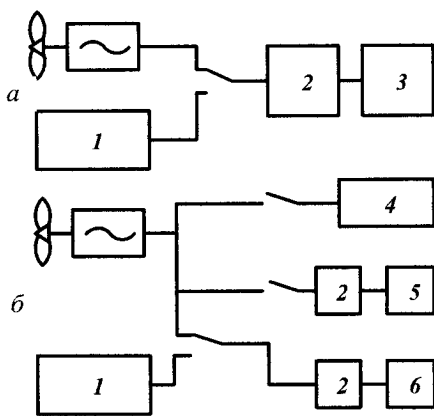
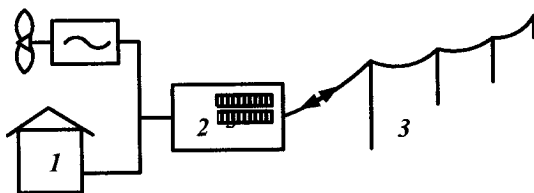


Рис. 5.14. Одно- (а) і багатоканальна (б) узгодження вітродизельної установки зі споживачами:
 1 – дизельний електрогенератор;
 2 – лічильник;
 3 – споживачі ЕЕ номінальної вартості;
 4 – нагромаджувач електроенергії;
 5 – споживачі дешевої електроенергії;
 6 – постачання електроспоживачів дорогою ЕЕ

Рис. 5.15. Узгодження роботи ВЕУ з ЕНС:

1 – споживач;
2 – перетворювальна підстанція; 3 – лінія електропередач



Клас С. $5P \leq P_{\text{ЕНС}}$

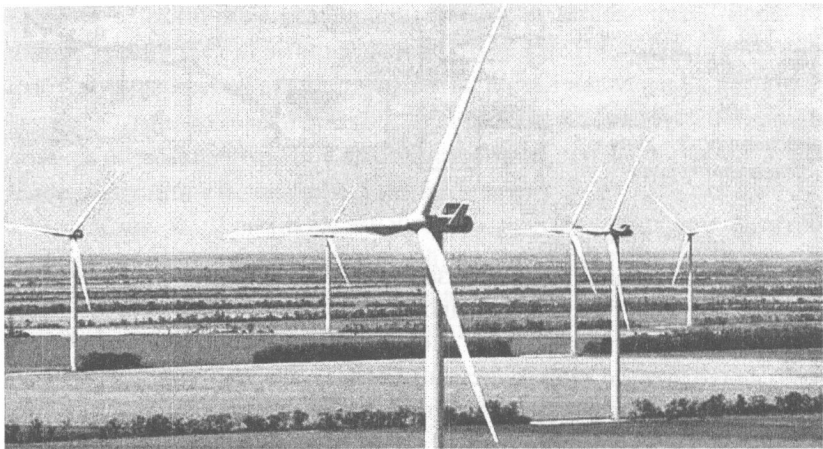
На схемі (рис. 5.15) показано поширений спосіб узгодження роботи ВЕУ з ЕНС. У цьому разі ВЕУ використовують безпосередньо для живлення споживачів, а надлишок енергії від ВЕУ надходить до енергосистеми (ЕНС). Для цього застосовують асинхронний генератор ВЕУ, увімкнений безпосередньо в ЕНС. Необхідність стабілізації частоти за такого увімкнення генератора в мережу не дає змоги підтримувати незмінною швидкохідність вітроколеса, що знижує його ККД. За браку вітру споживачі живляться від ЕНС.

Отже, застосування вітроелектричних станцій має такі особливості:

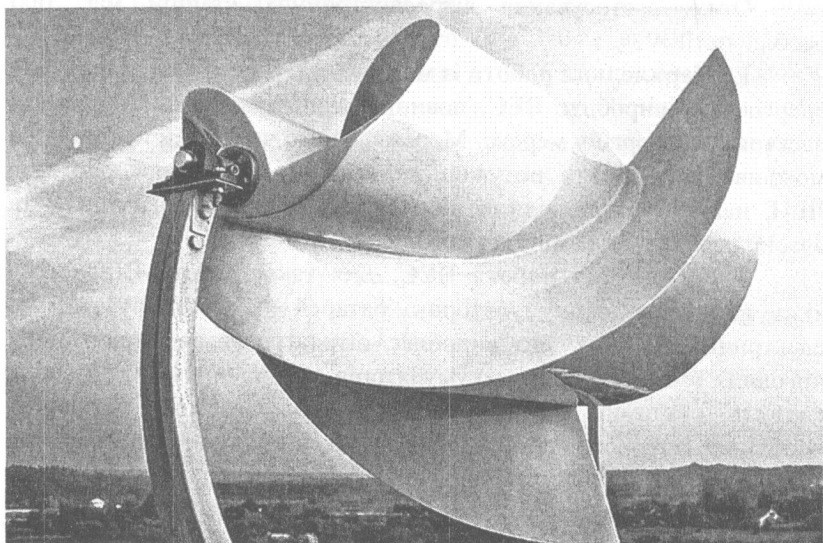
1. **Паралельна робота із мережею.** У цьому разі електрична енергія, яку виробляє ВЕС, повинна відповідати вимогам якості електричної енергії у мережі. Мережа, своєю чергою, повинна мати можливість прийняти потужність від ВЕС (пропускна здатність ЛЕП, наявність відповідних лічильників електроенергії тощо) та вчасно реагувати на зміну її кількості.

2. **Автономна робота ВЕС.** Для такої роботи ВЕС необхідне встановлення акумуляторних батарей, які накопичуватимуть електричну енергію, що виробляє вітроагрегат за сприятливих погодних умов. Наявність акумуляторів значно збільшує загальну вартість системи. Тому, щоб прийняти остаточне рішення, необхідно виконати техніко-економічні розрахунки. Встановити автономну ВЕС можливо в поєднанні із фотоелектричним модулем.

3. **Пряме перетворення електричної енергії на теплову.** Електричну енергію, що виробляють ВЕС, перетворюють на теплову, нагріваючи об'єм води електричними ТЕНами. Тобто акумулятором тепла є вода. Таку схему можна використовувати для попереднього нагрівання води в системі гарячого водопостачання.



*Рис. 5.16. ВЕС середньої потужності
на рівнинній місцевості*



*Рис. 5.17. Новий тип вітрокоlesa
Олексія Онипка, яке обертається уже за швидкості вітру 1 м/с*

Проектуючи велику вітроенергетичну станцію (ВЕС) – вітропарк із багатьма ВЕУ, необхідно розташовувати їх так, щоб вони мінімально аеродинамічно затінювали один одного. Коефіцієнт затінення визначають співвідношенням $K=L/D$, де L – відстань між сусідніми ВЕУ, м; D – діаметр вітрової турбіни, м. Зі збільшенням K втрати енергії вітрового потоку зменшуються, але зростає площа, яку займає вітрова станція. Значення K приймають у межах 6–12, а за $K>10$ –12 аеродинамічне затінення фактично не впливає на роботу ВЕС. На розташування вітропарків на місцевості впливає роза вітрів, а також тип і параметри ВЕУ, рельєф місцевості, екологічні та інші обмеження.

5.4. Розрахунок параметрів ВЕУ

Основні енергетичні показники вітрового потоку наведено у п. 5.3.1.

У табл. 5.5 подано значення питомої потужності вітрового потоку за температури $t = 15$ °С й атмосферного тиску $P=101,3$ кПа.

Таблиця 5.5

Питома потужність вітрового потоку

Швидкість вітру, м/с	4	6	8	10	14	18	22
Потужність потоку, кВт/м ²	0,04	0,13	0,31	0,61	1,67	3,6	6,25

Зі зниженням температури до 0 °С потужність потоку зростає на 6 %, а за температури +30 °С потужність цього потоку зменшується на 5 %. Якщо знижується атмосферний тиск, то й питома потужність потоку також зменшується.

Потужність $P_{\text{ВЕУ}}$ (Вт), яку розвиває ВЕУ, з урахуванням ККД вітродвигуна ($\eta_B=0,25$ – $0,35$) та ККД генератора ($\eta_E=0,7$ – $0,85$), а також довжини лопаті вітрової турбіни L , визначають за формулою

$$P_{\text{ВЕУ}} = \frac{\eta_B \eta_E \rho \pi L^2 V^3}{2}, \text{ Вт.}$$

За стандартної швидкості вітру $V = 12$ м/с та сумарного ККД ВЕУ $\eta = 0,35$ з 1 м² площі, охопленої вітровим колесом, отримаємо близько 300 Вт потужності.

Діаметр $D_{\text{ВК}}$ (м) вітрового колеса визначають за виразом

$$D_{\text{ВК}} = \sqrt{\frac{8P_{\text{НОМ}}}{\pi\rho\eta_{\text{ОПТ}}V_P^3}},$$

де $P_{\text{НОМ}}$ – номінальна потужність ВЕУ, кВт; V_P – розрахункова швидкість вітру, м/с; $\eta_{\text{ОПТ}}$ – оптимальний ККД ВЕУ.

Кутову частоту обертання вітрокола (1/с) у номінальному режимі обчислюють так:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{2n_s V_P}{D_{\text{ВК}}},$$

де n_s – коефіцієнт швидкохідності вітрокола, що визначається як відношення колової швидкості елемента лопаті до швидкості вітру

$$n_s = \frac{L \omega}{V_0},$$

де L – довжина лопаті вітрокола (чи радіус R вітрокола), м; ω – кутова частота обертання вітрокола, 1/с; V_0 – швидкість незбуреного потоку перед вітроколом, м/с.

У номінальному режимі частоту обертання вітрокола можна визначити за формулою (об./хв)

$$n_{\text{НОМ}} = \frac{30 \omega_{\text{НОМ}}}{\pi}.$$

Якщо вітроколесо з'єднується із синхронним генератором, то його частота обертання

$$n_{\text{НОМ}} = n_c = \frac{60 f}{p} = \frac{3000}{p},$$

де p – кількість пар полюсів генератора; f – частота струму в мережі (50 Гц).

У табл. 5.6 наведено параметри ВЕУ за швидкості вітру 12 м/с.

Таблиця 5.6

Параметри ВЕУ за швидкості вітру $V=12$ м/с

Клас ВЕУ	Проектна потужність, кВт			Діаметр вітрокола, D , м			Період обертання T , с		
Малі	10	25		6,4	10		0,3	0,4	
Середні	50	100	150	14	20	25	0,6	0,9	1,1
Великі	250	500	1000	32	49	64	1,4	2,1	3,1
Дуже великі	2000	3000	4000	90	110	130	3,9	4,8	5,7

5.5. Переваги та недоліки використання вітроенергетики

Основні переваги вітроенергетики

У вітроенергетики чимало переваг, зокрема енергетичні, екологічні, економічні.

Переваги для довкілля:

- відновлюване джерело енергії, що зменшує залежність від викопного палива;
- відсутність викидів парникових та інших шкідливих газів, що сприяє боротьбі зі змінами клімату;
- ВЕС займають мало місця і вписуються у будь-який ландшафт, а також поєднуються із іншими видами господарської діяльності;
- доцільно застосовувати їх для електропостачання віддалених і важкодоступних територій.

Економічні переваги:

- енергія вітру доступна практично в будь-якій країні й не залежить від коливання цін на викопне паливо, запаси якого невпинно скорочуються;
- витрати на встановлення й обслуговування значно знизилися, ці витрати й надалі зменшуватимуться. Встановити невелику ВЕУ можуть дозволити собі навіть окремі споживачі, особливо в тих країнах, де є дотації та пільги на розвиток вітроенергетики;
- за умови вдалого розташування вітроенергетичні станції можуть конкурувати за економічними показниками із атомними і тепловими електростанціями;
- сумісність з іншими джерелами енергії; можуть працювати автономно або паралельно із іншими джерелами енергії;
- низькі питомі витрати праці на спорудження ВЕС (термін будівництва може становити від трьох тижнів залежно від потужності);
- термін окупності ВЕС від трьох до восьми років;
- термін експлуатації 15–25 років.

Основні недоліки та обмеження

Географічні обмеження:

- необхідність розташування установок у певних районах із високою інтенсивністю вітру;
- необхідність виведення з експлуатації земель, які могли б використовуватись під інші види господарської та природоохоронної діяльності. Але витрати землі на вітрові електростанції набагато менші, ніж на електростанції традиційних типів.

Економічні недоліки:

- високі питомі інвестиції у вітроенергетичні проекти порівняно із традиційними галузями енергетики, що працюють на викопному паливі. З плином часу витрати на встановлення ВЕС знижуватимуться;
- порівняно малий вихід електроенергії та залежність від атмосферних умов;
- нестабільність виробництва електроенергії, особливо у разі безвітряної погоди.

Екологічні недоліки:

- шумові впливи (мінімальна відстань ВЕУ від житлових будівель – 150 м, а ВЕУ промислового призначення – 250 м; шумові характеристики вітроустановки потужністю 10 кВт – приблизно 40 дБА безпосередньо під установкою під час роботи на середніх обертах, для порівняння: шум міських доріг 70–80 дБА, а звук від роботи дизель-генератора – 90–110 дБА);
- можлива шкода для птахів, кажанів, деяких інших видів тварин (зіткнення птахів із лопатями та іншими елементами конструкції, захоплення їх турбулентним потоком за турбіною, що може призводити до поранення тощо); шкідливість дещо знижує використання тихохідних турбін;
- стробоскопічний ефект у північних регіонах;
- електромагнетні завади (недолік нівелюється належним вибором конструкційних матеріалів для лопатей ВЕУ, ретельним вибором майданчика для спорудження тощо).

Багато з описаних проблем можна вирішити, розвиваючи технології, проте питання негативного впливу на популяції птахів потребує подальшого вивчення і врахування під час планування вітроенергетичних проєктів.

Висновки

Енергія вітру – це нескінченний відновлюваний потік безкоштовної енергії. Її використання зменшує залежність від традиційних енергоносіїв – органічного палива. Привабливим видається застосування ВЕУ у районах, віддалених від централізованих електромереж.

Україна має великий потенціал вітрової енергії, оскільки розміщена в частині Європи із середньою швидкістю вітру 8 м/с. Підраховано, що ВЕС зі 100 силовими установками сумарною потужністю 300 МВт заощаджує стільки палива, скільки необхідно для роботи теплової станції потужністю 200 МВт.

Такі станції не спричиняють радіоактивного забруднення, спустошення територій, істотних втрат природних ресурсів тощо, що супроводжують експлуатацію традиційних електростанцій.

Тенденція до здешевлення ВЕУ та допоміжного обладнання дасть змогу в найближчому майбутньому ширше й ефективніше використовувати величезні запаси енергії, яку несуть вітрові потоки.

Контрольні запитання

1. Поясніть причини утворення вітру.
2. Охарактеризуйте параметри вітру, важливі для роботи ВЕУ.
3. Назвіть причини, які призводять до руйнування вітроагрегату.
4. За якими параметрами класифікують ВЕУ?
5. Наведіть класифікацію вітрових двигунів.

6. Які вимоги до ВЕУ під час вибору її типу і потужності?
7. Назвіть умови, які необхідно врахувати під час проєктування ВЕУ.
8. Опишіть можливі способи використання ВЕУ.
9. Подайте класифікацію вітрових коліс.
10. Які можливі варіанти з'єднання вітроколiс із електрогенератором?
11. Які є схеми роботи ВЕС із енергосистемою?
12. Які типи електрогенераторів застосовують у ВЕУ?
13. Який потенціал розвитку вітроенергетики в Україні?
14. Перелічіть основні переваги вітроенергетики.
15. Перелічіть основні недоліки вітроенергетики та поясніть їхні причини.
16. Від яких параметрів вітротурбіни залежить її корисна потужність?
17. Нарисуйте криву потужності вітрової установки та дайте їй характеристику.
18. Які природні умови впливають на ефективність роботи ВЕУ і як?
19. Назвіть способи регулювання частоти обертання електрогенератора на вітрової станції. Як вони впливають на генеровану потужність?
20. Опишіть принцип роботи вітрової установки.

Розділ 6

ІНШІ ВИДИ НЕТРАДИЦІЙНИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

6.1. Воднева енергетика

Водневою енергетикою називають технологію виробництва та використання водню як засобу для акумулювання, транспортування та використання енергії населенням.

Водень – це енергоносіє (як, наприклад, електрика), а не основне джерело енергії (як, наприклад, вугілля). Використання водню як палива позитивно вплине на енергетичну безпеку, екологію та економічне зростання. Водень допоможе поліпшити енергетичну безпеку (тобто незалежність від країн-постачальників), тому що його можна одержувати із багатьох первинних джерел енергії, зокрема відновних. Отже, водень може стати повноцінною альтернативою нафті.

Водень можна отримувати, використовуючи найрізноманітніші природні ресурси: газ, вугілля, органічні відходи, біопаливо, відходи сільського господарства. Основну частину промислового водню сьогодні видобувають із використанням природного газу. Передбачається збільшення ролі й інших джерел енергії, наприклад, викопних копалин, ядерної енергії та енергії відновних технологій (таких як сонячна, вітрова, гідравлічна, біо- та геотермальна енергії). Зважаючи на розмаїття енергоресурсів, водень можна буде виробляти у всіх регіонах України та в усьому світі. Сьогодні із понад 50 млн тонн отриманого водню половину одержують у результаті конверсії водяної пари із природним газом (48 %). Також водень добувають із нафти (30 %), вугілля (18 %) та води (4 %).

Прихильники майбутнього впровадження водневої енергетики у світових масштабах стверджують, що водень може бути екологічно чистим джерелом енергії для споживачів, особливо у

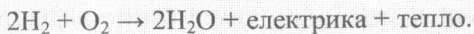
транспортній галузі. У місці кінцевого використання викидів не буде забруднювальних речовин та твердих часток або діоксиду вуглецю.

Перешкодою для упровадження водневої енергетики є побовання, що водень – легкозаймистий газ, який спалахує, змішуючись із повітрям. Водень справді має межі спалахування від 4 до 75 %. Але через дуже малу молекулярну масу молекули водню, яка дорівнює 2, він дуже швидко дифундує у повітрі (середня молекулярна маса повітря 29). Тому широкі межі спалахування водню не роблять його використання в замкненому просторі, наприклад, у тунелях або підземних паркінгах, небезпечнішим, ніж використання природного газу. Експеримент-порівняння вибуху водневого та бензинового авто здійснено 2001 р. у Флориді. Він показав, що водень безпечніший, ніж бензин, бо горить вертикальним струменем, тоді як бензин розливається підлогою та спалює все, на що потрапляє.

Перспективною технологією виявився спосіб отримання електричного струму (спрямованого руху електронів) за допомогою паливного елемента (рис. 6.1). У паливному елементі реакції окиснення палива і відновлення кисню просторово розділені, а “спалювання” відбувається, тільки якщо елемент віддає струм споживачеві. Як окиснювач у паливних елементах застосовують кисень. Оскільки кисню цілком достатньо в повітрі, окиснювача не бракуватиме. Що стосується палива, то ним є водень.

Найпростішим за конструкцією є паливний елемент із протонообмінною мембраною (рис. 6.1). Працює він так: молекула водню, яка потрапляє в елемент, розкладається під дією каталізатора на атоми, які у результаті хемосорбції, віддаючи кожен по електрону e^- , перетворюються на позитивно заряджені іони H^+ . Мембрана за хімічним складом має властивість пропускати через себе іони, але затримувати електрони. Накопичені на аноді електрони створюють надлишковий негативний заряд, а іони водню, які проникли через мембрану, створюють позитивний заряд

на катоді (напруга між електродами на елементі дорівнює близько 1 В). Унаслідок взаємодії кисню, що надходить на катод, з іонами водню, що проникли через мембрану, і електронами, які надходять із зовнішнього кола, утворюється вода. Отже, в паливному елементі відбувається реакція



У результаті утворюються корисна енергія і водяна пара.

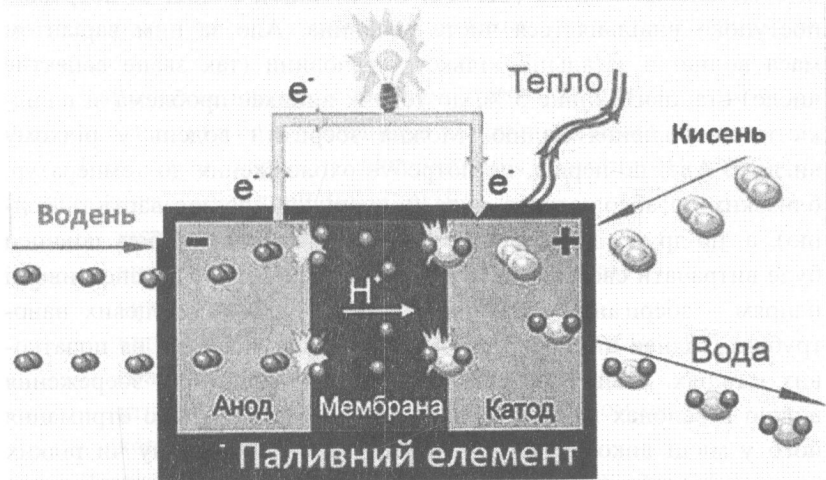


Рис. 6.1. Ілюстрація принципу дії паливного елемента

Щоб досягти великої потужності, паливний елемент збирають із багатьох осередків. Якщо між електродами приєднати навантаження споживача, електрони потечуть через нього до катода, утворюючи струм і завершуючи окиснення водню киснем. Як каталізатор у таких паливних елементах застосовують мікрочастинки платини, нанесені на вуглецеве волокно. Завдяки своїй структурі такий каталізатор добре пропускає газ. Мембрану, як правило, виготовляють із сірковмісного полімеру нафіону (Нафiон–Н – кисла форма полімеру, основний ланцюжок якого складається із ланок тетрафторетилену. Переваги нафiону: висока хiмiчна стiйкiсть до температури (до 150 °С), достатня механiчна

міцність, висока питома електропровідність, газонепроникність). Товщина мембрани дорівнює десятим часткам міліметра (0,12–0,3 мм). Під час реакції окиснення водню виділяється тепло, але його небагато, тому робочу температуру підтримують у межах 40–80 °С.

Проблема полягає у можливості транспортування і зберігання водню. Учені розглядають доволі багато варіантів. Наприклад, можна зберігати водень в акумуляторах на основі гідридів інтерметалевих сплавів (TiУаРе, СиМі тощо), з яких за потребою поступово вивільняється чиста речовина. Але за цим варіантом маса водню в загальній кількості речовини (так зване аспектне число) становить лише 5 %, до того ж виникає проблема зі швидкістю вивільнення водню. Можна зберігати водень у рідкому вигляді. Але, по-перше, це потребує охолодження до температур, близьких до абсолютного нуля (відповідно, зростає вартість водню), а, по-друге, заправлений у такий спосіб автомобіль повинен буде витрачати своє паливо якомога швидше. Дуже перспективний напрям – зберігання водню в наноструктурах (вуглецевих нанотрубках), однак ці дослідження перебувають поки що на початкових стадіях. Найперспективнішим учені вважають збереження водню в балонах високого тиску – понад 350 атм. або отримання його у місці використання з іншого палива (метанолу чи рідких вуглеводнів: бензину, дизельного палива тощо), у спеціальних каталітичних реакторах.

6.2. Використання метану із вугільних шахт

Метан – супутній газ у покладах кам'яного вугілля, якого в нашій державі видобувають сьогодні близько 80 млн т за рік. Розрахункові запаси метану у вугленосних родовищах – від 12 до 25 трлн м³. У певних концентраціях метан утворює із киснем повітря вибухонебезпечну суміш, і його наявність є головним чинником і основною причиною вибухів у вугільних шахтах із важкими наслідками. Системи дегазації сьогодні видаляють із шахт лише 15 % метану, з цієї кількості утилізують тільки 7 %.

Метан – екологічно чистіший енергоносіє, ніж вугілля, бо під час спалювання тонни вугілля в атмосферу викидається 35 кілограмів пилу, 4 кілограми двоокису сірки, 5 кілограмів окису азоту та інші шкідливі гази.

Доведено, що метан – активний учасник глобального потепління, причому кожна його одиниця в 22 рази сильніше сприяє цьому процесу, ніж одиниця вуглекислого газу, який вважають головним винуватцем негативних змін клімату планети. Отже, з погляду екологічної безпеки перероблення шахтного метану дуже актуальне.

Найраціональнішим способом утилізації шахтного метану є його використання безпосередньо в місцях отримання.

Переважно варіанти використання шахтного метану на гірничодобувному підприємстві такі:

- використання як палива для котелень;
- використання у газотурбінних установках;
- використання як моторного палива;
- виробництво теплової та електричної енергії;
- спалювання шахтного метану в факелі;
- утилізація шахтного газу із малим вмістом метану;
- когенерація.

Реалізація проекту із використання метану вугільних родовищ забезпечить досягнення економічного, екологічного та соціального ефекту. Використання метану як альтернативного джерела палива зробить Україну менш залежною від імпорту палива. (За матеріалами авторів Д. В. Мирошниченко, канд. техн. наук, О. Л. Зав'ялова, Донецький національний технічний університет, Україна).

6.3. Використання метану зі сміттєзвалищ

Газ метан також утворюється внаслідок перетворення органічних решток на сміттєзвалищах. Щорічно у світі накопичується величезна кількість органічних відходів побутового, комерційного,

промислового та сільськогосподарського походження. Це вкрай нестабільна і неконтрольована суміш паперу, картону, харчових відходів, пластмаси, гуми, скла, будівельного сміття, металів тощо. Тільки в містах утворюється 400–450 млн тонн твердих побутових відходів (ТПВ), причому на одного мешканця в середньому припадає 250–700 кг/рік. Кількість ТПВ щорічно збільшується на 3–6 %, що істотно перевищує швидкість приросту населення Землі. Основним методом поводження із побутовими відходами були і залишаються вивезення та захоронення їх на сміттєзвалищах і спеціальних полігонах, які розташовані поблизу міст і приймають, відповідно, міські відходи. В умовах сміттєзвалищ відбувається інтенсивне біологічне розкладання відходів, яке супроводжується виділенням звалищного газу.

Макрокомпонентами звалищного газу є метан (CH_4) і діоксид вуглецю (CO_2), їх співвідношення може змінюватися від 40–70 % до 30–60 % відповідно. Супутні компоненти – азот (N_2), кисень (O_2), водень (H_2), а також різні органічні сполуки. Хімічний склад звалищного газу зумовлює його специфічні властивості. Насамперед, звалищний газ горючий, у певних концентраціях токсичний, його середня калорійність приблизно 5500 ккал/м^3 . Конкретні показники токсичності визначаються наявністю низки мікродомішок, таких, наприклад, як сірководень (H_2S). Зазвичай звалищний газ має різкий неприємний запах.

Найефективніший спосіб зменшити викид в атмосферу метану з полігонів ТПВ – це його збирання і утилізація. Звалищний газ розпочали добувати в багатьох країнах на початку 80-х років ХХ ст., щоб запобігти екологічним проблемам, пожегам і вибухам. Надалі набуло поширення енергетичне використання звалищного газу (рис. 6.2). Реалізація проєктів із регенерації енергії звалищного газу сприяє зниженню викиду парникових газів і забруднювальних речовин у повітря, що позитивно позначається на якості повітря і знижує потенційний ризик для здоров'я людини.

До заходів із підготовки сучасного полігона ТПВ належать ущільнення і гідроізоляція дна, влаштування дренажної системи

для відведення фільтраційних вод, прокладання труб для збирання утвореного біогазу. Пласти ТПВ формують на полігоні, їх завозять автотранспортом. Утворений під час біоконверсії органічних складових ТПВ звалищний газ надходить через вертикальні свердловини в колектор. Далі газ примусово подають у пункт газопідготовки для відокремлення газового конденсату. Підготовлений газ прямує у газгольдер або безпосередньо подається у блок когенераційних установок. Вироблену генераторами електричну і теплову енергію пересилають мережами споживачам.

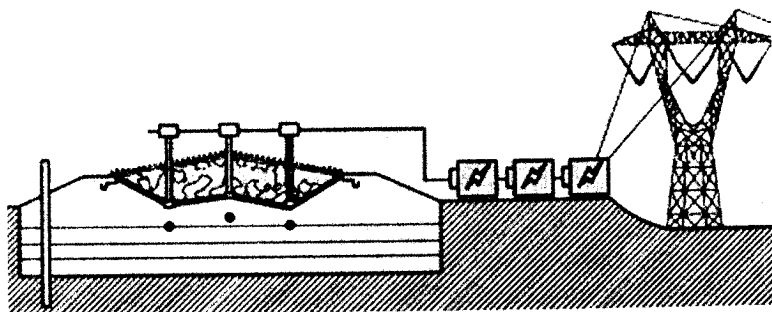


Рис. 6.2. Принципова схема добування, збирання та утилізації звалищного газу

Кількісні показники. З однієї тонни побутових відходів можна отримати 150–250 м³ звалищного газу із вмістом метану 60–80 %.

У світовій практиці відомі такі способи утилізації звалищного газу:

✓ факельне спалювання, що забезпечує усунення неприємних запахів і зниження пожежонебезпеки на території полігона ТПВ, у цьому разі енергетичний потенціал звалищного газу не використовується у господарських цілях;

✓ пряме спалювання звалищного газу для виробництва теплової енергії;

✓ використання звалищного газу як палива для газових турбін з метою отримання електричної та теплової енергії;

✓ доведення вмісту метану в звалищному газі (збагачення) до 94–95 % з подальшим його використанням у газових мережах загального призначення.

Доцільність застосування того чи іншого способу утилізації звалищного газу залежить від конкретних умов господарської діяльності на полігоні ТПВ, її визначають за наявністю платоспроможного споживача енергоносіїв, отриманих на основі використання звалищного газу. У більшості розвинених країн цей процес стимулює держава за допомогою спеціальних законів. Проекти із видобування та використання звалищного газу можуть бути доволі рентабельними за економічними показниками, особливо якщо поблизу звалища є промисловий споживач газу.

6.4. Використання геотермальної енергії

Вираз “геотермальна енергетика” буквально означає, що це енергія тепла Землі (“гео” – земля, “термальна” – тепла). Основним джерелом цієї енергії слугує постійний потік теплоти із розжарених надр, спрямований до поверхні Землі. Земна кора отримує теплоту в результаті тертя ядра, радіоактивного розпаду елементів (торію і урану), хімічних реакцій. Сталі часу цих процесів настільки великі відносно часу існування Землі, що неможливо встановити, збільшується чи зменшується її температура.

Розрізняють п'ять основних типів геотермальної енергії:

- нормальне поверхнєве тепло Землі на глибині від декількох десятків до сотень метрів;
- гідротермальні системи, тобто резервуари гарячої чи теплої води, здебільшого самовиливної;
- парогідротермальні системи – родовища пари і самовиливної пароводяної суміші;
- петрогеотермальні зони чи теплота сухих гірських порід;
- магма (нагріті до 1300 °С розплавлені гірські породи).

Геотермальні води класифікують за температурою, кислотністю, рівнем мінералізації, жорсткістю.

Основними показниками придатності геотермальних джерел для використання є їх природна температура, за значенням якої їх поділяють на низькотермальні води з температурою 40–70 °С, середньотермальні із температурою 70–100 °С, високотермальні води і пару з температурою 100–150 °С, парогідротерми і флюїди з температурою понад 150 °С (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

Сфера використання термальних вод

Температура термальної води, °С	Сфера використання
37–50	Бальнеологія
50–70	Дрібномасштабна теплофікація, гаряче водопостачання, технологічне використання води
70–120	Великомасштабна теплофікація (міста і великі сільськогосподарські об'єкти), комплексне багатодільове використання вод у міру вироблення теплового потенціалу
120–170	“Мала” електроенергетика з використанням робочих речовин типу фреону, аміаку тощо
170–220	“Середня” електроенергетика із прямим використанням пароводяної суміші
Більше ніж 220	“Велика” електроенергетика на природній сухій парі

Геотермальні електростанції (геоТЕС) можна розділити на три основні типи:

- станції, які працюють на родовищах сухої пари;
- станції із пароутворювачем, які працюють на родовищах гарячої води під тиском;
- станції із бінарним циклом, в яких геотермальна теплота передається вторинній рідині (наприклад, фреону або ізобутану).

На рис. 6.3 наведено принципову схему станції третього типу – із бінарним циклом роботи.

У табл. 6.2 наведено потужності основних світових геотермальних ТЕС.

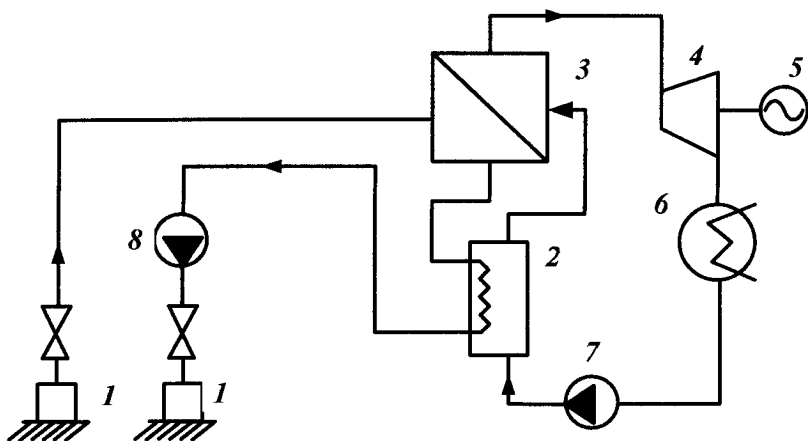


Рис. 6.3. Принципова схема двоконтурної геоТЕС: 1 – свердловина; 2 – теплообмінник; 3 – парогенератор; 4 – турбіна; 5 – електрогенератор; 6 – конденсатор із повітряним охолодженням; 7 – конденсатна pompa; 8 – нагнітальна pompa

Таблиця 6.2

Геотермальні джерела та потужності геоТЕС

Країна	Основні термальні поля	Електрична потужність, МВт
США	Гейзери	700
Італія	Лардерелло	420
Нова Зеландія	Уайракей	250
Мексика	Серро Пріето	150
Японія	Мацукава	250
Філіппіни	–	250
Росія	Паужетське	6
Сальвадор	–	100
Ісландія	Неймеф'ял	40

Геотермальні електростанції мають певні особливості:

- постійна наявність енергоресурсів, що забезпечує використання повної встановленої потужності обладнання геоТЕС;

- достатньо простий рівень автоматизації;
- наслідки можливих аварій обмежені;
- питомі капіталовкладення і собівартість електричної енергії переважно нижчі, ніж на електростанціях із використанням інших відновних джерел енергії.

Сьогодні 58 країн використовують тепло своїх геотермальних ресурсів не тільки для виробництва електроенергії, а й безпосередньо у вигляді тепла: для обігрівання ванн і басейнів – 4 %; для опалення – 23 %; для теплових pomp – 12 %; для обігрівання теплиць – 9 %; для підігрівання води в рибних господарствах – 6 %; у промисловості – 5 %; для сушіння сільгосппродуктів, танення снігу і кондиціювання – 1 %; для інших цілей – 2 %.

За різними прогнозами потужність геотермальних станцій у світі до 2030 р. зросте до 40–70 млн кВт.

Переваги і недоліки геотермальної енергетики.

Переваги:

- ✓ геотермальну енергію отримують від джерел тепла з великими температурами;
- ✓ температура теплоносія значно менша, ніж температура під час спалювання палива;
- ✓ найкращий спосіб використання геотермальної енергії – комбінований (видобування електроенергії та обігрівання).

Недоліки:

- ✓ низька термодинамічна якість;
- ✓ необхідність використання тепла поблизу місця видобування;
- ✓ вартість спорудження свердловин зростає зі збільшенням глибини.

Джерело геотермальних вод характеризують різноплановим впливом на природне середовище:

- ✓ в атмосферу надходить додаткова кількість розчинених у підземних водах сполук сірки, бору, арсену, аміаку, ртуті;
- ✓ викидається водяна пара, збільшуючи вологість;
- ✓ супроводжується акустичним ефектом;
- ✓ опускається земна поверхня;
- ✓ засолюються землі.

Україна має значні ресурси геотермальної енергії. Родовища геотермальних вод в Україні, придатних для промислового освоєння, розташовані в Закарпатській, Миколаївській, Одеській, Херсонській областях і в АР Крим. Найперспективніші для використання геотермальних ресурсів Карпатський регіон і Крим, менший потенціал геотермальних вод у Полтавській, Харківській, Сумській і Чернігівській областях. Річний технічний потенціал геотермальної енергії оцінюють як еквівалентний 12 млн т у. п., що свідчить про перспективність розвитку геотермальної енергетики в країні.

6.5. Переваги та недоліки відновлюваних джерел енергії

Проблеми використання та технічної реалізації систем із ВДЕ можна вирішити на основі таких дій:

- моніторингу навколишнього середовища;
- визначення характеристик споживачів енергії;
- узгодження джерел енергії зі споживачами;
- визначення методів керування енергосистемами із ВДЕ.

Використовують три типи систем керування енергією від ВДЕ:

- зі скиданням надлишку енергії;
- із нагромаджувачами (акумуляторами) енергії;
- із регулюванням навантаження відповідно до потреб споживачів.

Прикладом керування зі скиданням надлишку енергії можуть бути такі джерела: ГЕС, використання сонячного проміння для обігрівання, вітрові колеса ВЕУ зі змінним кроком.

Коротка характеристика наведених структур:

- а) розміри енергетичної установки (ЕНУ) то менші, що нижчий опір потоку енергії на всіх ділянках контуру розподілу енергії;

б) від'ємний зворотний зв'язок у керуванні за потоком призводить до втрат енергії;

в) нагромаджувач енергії створює розв'язку в часі виробництва та споживання енергії;

г) унезалежнення виробництва від споживання енергії за допомогою потужної енергосистеми (ЕНС);

д) пряме керування за навантаженням: можна безперервно узгоджувати кількість споживачів із потоком наявної енергії й на основі цього керувати енергетичною установкою.

Зважаючи на наведені вище особливості експлуатації ВДЕ, можна відзначити переваги та недоліки таких джерел. До переваг можна зарахувати:

- ✓ невичерпність енергії (за винятком гідроресурсів);
- ✓ майже відсутній негативний вплив на довкілля (немає викидів забруднювальних речовин, парникових газів, радіоактивного і теплового забруднення тощо);
- ✓ немає потреби видобування та транспортування палив;
- ✓ не потрібно пересилати електроенергію на далекі відстані;
- ✓ не використовується великий обсяг води для охолодження та видалення продуктів спалювання палив (золи, жужелю);
- ✓ не використовуються дефіцитні високотемпературні матеріали для їх спорудження (за винятком сонячних концентраторів енергії).

Недоліками НДЕ є:

- ✓ нерівномірність виробництва електроенергії залежно від пори року;
- ✓ не завжди збігаються місця генерування та використання енергії;
- ✓ мала густина енергетичного потоку (сонячної енергії $1,36 \cdot 10^{-3}$ МВт/м², вітрової за швидкості вітру 10 м/с – $6 \cdot 10^{-4}$ МВт/м², геотермальної – $3 \cdot 10^{-8}$ МВт/м², тоді як для енергії АЕС – $0,2$ МВт/м²);
- ✓ порівняно висока капіталоємність енергетичних установок і споруд.

- Додаткові причини необхідності розвитку ВДЕ в Україні такі:
- ✓ дефіцит традиційних паливно-енергетичних ресурсів;
 - ✓ значна перевага виробництва електроенергії на АЕС (40–50 %) за відсутності виробництв з отримання ТВЕЛів та місць захоронення ядерних відходів;
 - ✓ сприятливі кліматично-метеорологічні умови для використання ВДЕ;
 - ✓ наявність промислової бази для виготовлення обладнання та спорудження установок ВДЕ;
 - ✓ можливість вирішення соціально-економічних питань (зокрема створення робочих місць).

Контрольні запитання

1. Які переваги використання водню як нетрадиційного виду палива?
2. Чому варто використовувати водень (гідроген) для забезпечення енергетичних потреб?
3. Що утруднює використання водню в енергетиці?
4. Що таке паливний елемент (паливна комірка) та які процеси у ньому відбуваються?
5. Які можливі способи транспортування водню та які труднощі цієї технології?
6. Що таке шахтний газ і які його складові?
7. Чим небезпечний шахтний газ для довкілля?
8. Як можна використати шахтний газ і чи доцільно це робити?
9. Який вид палива можна отримати зі звалищ твердих побутових відходів?
10. Чим загрожує довкіллю неналежна експлуатація звалищ ТПВ?
11. Які існують способи використання звалищного газу і чому його необхідно використовувати?
12. Що розуміють під геотермальною теплою?
13. Опишіть типи геотермальної енергії.
14. Охарактеризуйте основні методи добування геотермальної теплоти.
15. Опишіть способи використання геотермальної теплоти.
16. Назвіть основні характеристики геотермальної води.
17. Наведіть схему подання геотермальної теплоти для генерування електроенергії.

Розділ 7

ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

7.1. Умови приєднання ВДЕ в енергосистемі

Електроенергетика традиційно розвивалася у напрямі централізації виробництва електроенергії на потужних електричних станціях та об'єднання їх в електроенергетичні системи: європейську ENTSO-E, ЄЕС Росії, ОЕС України тощо [19]. Так створювався потік електроенергії від центрів генерування до периферійних електроспоживачів, і у такому самому напрямі змінювалися параметри електричних мереж: рівні напруг, перерізи проводів. В умовах зростання дефіциту та підвищення вартості енергоресурсів одним із напрямів гарантування екологічної та енергетичної безпеки України є використання відновлюваних джерел енергії. Розвиток ВДЕ та збільшення їх частки у структурі об'єктів генерування потужності в енергетичній системі приводить до зростання їх впливу на режими роботи електричних мереж. Оскільки джерела електроенергії з відновлюваних ресурсів наближаються до споживачів, віддалених від енергетичних центрів, виникає так звана розподілена генерація (РГ): газотурбінні, парогазові установки, сонячні та вітрові електростанції, сумарна установлена потужність яких сягає кількох десятків ГВт (рис. 7.1, 7.2). РГ – це невеликі електростанції потужністю до 30 МВт, безпосередньо з'єднані із розподільною мережею чи розташовані поблизу кінцевих споживачів електричної енергії [19].

Стратегічною метою використання ВДЕ є економія органічного палива унаслідок зменшення генерування електроенергії на традиційних ТЕС, а також зменшення викидів CO₂ у довкілля. Обґрунтуванням такого заміщення є висока вартість електроенергії на ТЕС та невідворотний вплив на довкілля. Упровадження ВДЕ в електричних мережах, крім позитивних екологічних наслідків та

розвантаження електричних мереж, створює низку технічних проблем, які стосуються планування, експлуатації та керування режимами мереж. Це позначається на якості регулювання активної потужності й частоти, реактивної потужності та напруги, потребує удосконалення диспетчерського керування енергосистемами [16, 17].

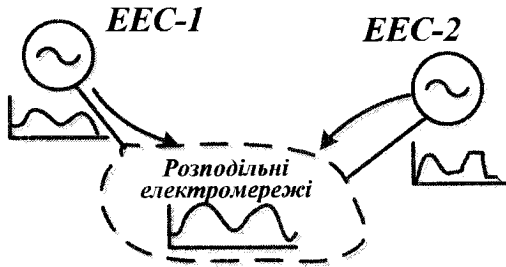


Рис. 7.1. Централізоване живлення споживачів електромереж

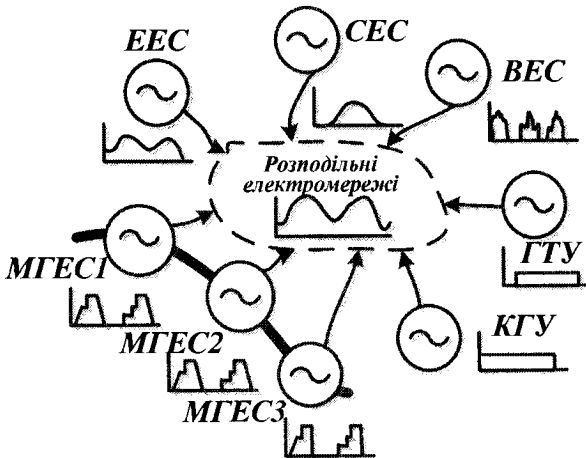


Рис. 7.2. Комбіноване живлення споживачів електромереж:
 ЕЕС – електроенергетична система; МГЕС – малі ГЕС; КГУ – когенераційні установки; ГТУ – газотурбінні установки; ВЕС – вітрові електростанції;
 СЕС – сонячні електростанції

У структурі ВДЕ найперспективнішими є сонячні електростанції (СЕС) прямого та непрямого перетворення, вітрові (ВЕС) та малі ГЕС. Розташування їх у розподільних мережах дає змогу розвантажити магістральні лінії та підвищити енергоефективність енергосистеми.

ВЕС та СЕС є електростанціями негарантованої потужності (висока ймовірність, що видавання їх активної потужності в мережу призупиниться: для ВЕС за швидкості вітру $< 3\text{--}5$ м/с, а для СЕС у разі зменшення сонячної радіації до рівня < 200 Вт/м²), тому приєднувати їх до розподільних мереж допустимо за наявності техніко-економічного обґрунтування.

Значні коливання режимної генерації ВЕС та СЕС протягом доби призводять до ускладнень регулювання добового графіка потужності Об'єднаної електроенергетичної системи. Наприклад, значне зниження (штиль) чи збільшення (шторм) потужності декількох ВЕС може спричинити не тільки дефіцит чи надлишок потужності регіону приєднання, але й подальше порушення стабільності усієї енергосистеми, якщо не вжити відповідних заходів. Одним із таких заходів є можливість залучити систему керування сучасних вітроагрегатів до централізованого диспетчерського керування, що дає змогу не тільки змінювати активну потужність ВЕС і швидко реагувати на відповідні режими в мережі, але й регулювати реактивну потужність та напругу на шинах ВЕС. За даними іноземних досліджень доведено, що промислові ВЕС у країнах Західної Європи, які обладнані сучасними ВЕУ із синхронними, асинхронізованими генераторами та генераторами на постійних магнетах, характеризуються високою стійкістю до зміни як потужності, так і, відповідно, частоти в енергосистемі в широкому діапазоні: 50 ± 3 Гц. Наприклад, у діапазоні частот 50,5–49 Гц в Об'єднаній енергосистемі Європи допускається робота вітрових турбін на повну потужність.

Щоб покращити умови регулювання балансу потужності в енергосистемі у разі впровадження значних обсягів ВДЕ, необхідно акумулювати надлишки електричної енергії, виробленої на таких

електростанціях (першочергово на СЕС), а також додатково вводити нові маневрові блоки на парогазових та газотурбінних установках.

Протягом останніх років системний оператор України (НЕК “Укренерго”) видав велику кількість технічних завдань на виконання техніко-економічного обґрунтування та технічних умов приєднання ВДЕ до мереж Об’єднаної енергосистеми (ОЕС) України. За наближеними оцінками, йдеться про загальну встановлену потужність ВДЕ на рівні 7–10 ГВт, значну частину якої буде зосереджено у південній частині ОЕС України. За таких умов постає низка питань щодо врахування особливостей роботи ВДЕ під час планування та керування режимами роботи ОЕС України. Як відомо, ВДЕ створюють певні проблеми, пов’язані зі стабільністю, надійністю та економічністю режимів роботи електромереж, до яких їх приєднують. Ці проблеми насамперед постають перед диспетчерськими службами стосовно “ведення режиму” ОЕС України. Вплив флюктуаційного характеру роботи ВДЕ на керованість та стійкість режимів роботи енергосистеми є важливим чинником, оскільки одночасне коливання потужності багатьох ВДЕ може спричинити істотну нестабільність режиму роботи енергосистеми.

Сучасні вітрові турбіни, як правило, з’єднані з мережею через повний перетворювач, тому немає принципової відмінності між сонячними (СЕС) та вітровими (ВЕС) електростанціями. Складний характер впливу ВДЕ на енергосистему зумовлює необхідність розроблення спеціальних вимог до таких електростанцій. Зокрема, це стосується можливості підтримання частоти та напруги на заданому рівні. Генерування електроенергії електростанціями на основі ВДЕ може змінюватись відповідно до місяця, години доби та погодних умов (хмарності, сили вітру тощо), тоді як системний оператор повинен постійно підтримувати баланс між генерацією та споживанням енергії. Зважаючи на зазначене, на шляху широкого впровадження ВДЕ в Україні виникатимуть певні технічні проблеми, причому неоднакові на різних етапах. Об’єднує їх одне – необхідність посилення електричних мереж та/чи застосування гнучких засобів компенсації. До того ж проблеми, притаманні ВДЕ, можуть посилюватись, якщо ВДЕ підімкнено в

неоптимальному місці з погляду ефективності функціонування ЕМ. Визначення місць підімкнення ВДЕ до мережі з урахуванням усіх чинників – доволі складна проблема. Зважаючи на високу вартість заходів із посилення мережі та засобів гнучкої компенсації флюктуаційності роботи ВДЕ, спочатку доцільно розглянути можливість та умови приєднання ВДЕ без таких додаткових засобів.

7.2. Вплив ВДЕ на показники якості електроенергії

Джерела розподіленої генерації (РГ) в електричних мережах істотно впливають на якість електричної енергії [19]:

- призводять до збільшення дози флікера, що можливо за умови виведення чи введення в роботу потужних джерел, раптової зміни вихідної потужності джерел РГ, взаємодії між джерелами РГ та регульовальними пристроями;

- можуть генерувати в електромережу гармоніки вищих порядків, якщо приєднані до неї через інвертор;

- впливають на провали напруги, що частіше пов'язано із типом генератора. Наприклад, якщо використовується синхронний генератор, то після провалу напруга відновлюється майже до початкового рівня, а за асинхронних генераторів вона не відновлюється до початкового рівня через зниження генерації реактивної потужності.

Розглядаючи вплив РГ на напругу електромережі, можна виділити такі аспекти.

1. У традиційних електромережах радіального типу напруга знижується вздовж напрямку потоку енергії від головної ділянки лінії електропередавання (ЛЕП) до її кінця. Якщо РГ відбувається у кінці лінії, то знижується навантаження живильного фідера, а напруга вздовж ЛЕП може збільшуватися. Значення зміни напруги залежить від місця встановлення джерел РГ, їхньої потужності та $\cos \varphi$ (генерування чи споживання).

2. У розподільній електромережі споживання активної та реактивної потужності змінюється з часом, тому виникають певні

зміни напруги. У кінці ЛЕП ці зміни, як правило, більші, ніж на початку. Приєднання РГ може збільшувати чи зменшувати розмах цих коливань, особливо у разі неузгодженого із графіком споживання за місцевим навантаженням генерування ними потужності. Ефект зміни напруги то більший, що вища встановлена потужність джерел.

Аналізуючи вплив сонячних та вітрових електростанцій на роботу електроенергетичної системи, треба враховувати, що до їх складу входять інвертори чи повні перетворювачі, вихідним каскадом яких є інвертори, які перетворюють постійний електричний струм на змінний. Ці елементи нелінійні, вони призводять до спотворення синусоїдної форми кривої напруги в електричній мережі та погіршення якості електричної енергії. Якість електричної енергії (ЯЕ) характеризується показниками, що визначають ступінь відповідності напруги і частоти їх нормованим значенням. Сьогодні в Україні вимоги до якості електричної енергії в точках, до яких приєднуються електроспоживачі в мережах загального призначення змінного трифазного струму з частотою 50 Гц, встановлюють два чинні стандарти:

- національний стандарт України ДСТУ EN 50160:2014, ідентичний європейському стандарту EN 50160:2010, який набрав чинності з 1.10.2014 р.;

- міждержавний стандарт ГОСТ 13109-97, який діє на території України з 1.01.2000 р. і дотепер не втратив чинності.

Положення зазначених стандартів обов'язкові для виконання, і це потребує оцінювання впливу зазначених електростанцій на такі показники якості електричної енергії (ПЯЕ) в електричній мережі: коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги K_U ; коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$.

Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги K_U визначають у відсотках для діапазону гармонійних складових напруги від 2-ї до 40-ї гармоніки

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{Ui}^2}{N}}, \quad (7.1)$$

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=i}^{40} U_{ni}^2}}{U_{НОМ}} \cdot 100, \quad (7.2)$$

де K_{Ui} – коефіцієнт спотворення напруги за i -м спостереженням.

Значення коефіцієнта n -ї гармонійної складової напруги у відсотках визначають за виразом

$$K_{Un} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{U_{ni}}^2}{N}}, \quad (7.3)$$

$$K_{U_{ni}} = \frac{U_{ni}}{U_{НОМ}} \cdot 100, \%, \quad (7.4)$$

де $U_{НОМ}$ – номінальна напруга електричної мережі; U_{ni} – напруга n -ї гармоніки для i -го спостереження; N – кількість спостережень протягом 24 годин.

Збільшення гармонік напруги у мережі електростанціями з інверторами призводить до зростання значень коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги і коефіцієнтів n -ї гармонійної складової напруги. Отже, ці показники якості в мережі з такими електростанціями потрібно контролювати та за необхідності вживати заходів щодо нормалізації якості електроенергії в мережі. За необхідності ВЕС та СЕС мають бути оснащені відповідними швидкодійними засобами компенсації реактивної потужності із фільтрами вищих гармонік струму. Відповідність обладнання електростанцій вимогам щодо якості електричної енергії повинна підтверджуватись моделюванням та/чи експериментально.

7.3. Вплив місця приєднання ВДЕ на втрати енергії в ЕЕС

Функціонування ВДЕ в електроенергетичних системах (ЕЕС), за певних умов, може забезпечити істотну економію енергоресурсів. Економії досягають у результаті використання відновлюваних джерел первинної енергії та децентралізації виробництва електроенергії та, як наслідок, зменшення витрат на її пересилання

та розподіл. Сьогодні спостерігається поступовий перехід від централізованої моделі електропостачання споживачів із генеруванням електроенергії потужними ТЕС і АЕС до комбінованої, коли частину електроенергії виробляють відновлювані джерела. ВДЕ, працюючи безпосередньо у розподільних електричних мережах, дають змогу розвантажити магістральні мережі, підвищуючи їх пересильний потенціал та ефективність експлуатації ЕЕС загалом. Однак за такою схемою електропостачання функціонування електричних мереж може ускладнюватись у разі зростання установленої потужності приєднаних відновлюваних джерел електроенергії. Аналогічні ускладнення виникають у разі неузгодженого приєднання до електричних мереж нетрадиційних джерел електроенергії (когенераційних, газотурбінних та парогазових установок) порівняно невеликої потужності. Оскільки електричні мережі проектували для умов централізованого електропостачання, розбудова в них ВДЕ РГ може змінювати напрямок потоків енергії. Можливі такі три ситуації:

- власне споживання кожного вузла в ЕМ більше чи дорівнює вихідній потужності джерел РГ, приєднаних до цього джерела;

- в ЕМ існує щонайменше один вузол, вихідна потужність джерел РГ якого більша, ніж власне його споживання, але сумарна потужність джерел РГ у ЕМ менша, ніж сумарна потужність навантаження;

- в ЕМ існує щонайменше один вузол, вихідна потужність джерел РГ якого більша за власне споживання цього вузла і сумарна потужність джерел РГ електромережі більша, ніж її сумарне навантаження.

У першому випадку встановлені джерела впливатимуть на зменшення втрат потужності в електромережі. У другому випадку втрати потужності можуть зростати в окремих лініях, але сумарні втрати в електромережі знижуються. У третьому випадку сумарні втрати потужності будуть більшими, ніж до встановлення джерел РГ.

Розглянемо варіант розподільної електричної мережі (РЕМ) 6–10 кВ, яку спроектували й експлуатують за розімкненою схемою,

лінії електропередавання працюють у режимі з одностороннім живленням, а трансформатори понижувальні. Відповідно до цього в РЕМ вибрано комутаційні апарати, засоби релейного захисту й автоматики, встановлено системи обліку електроенергії тощо. Стосовно до вимог надійності електропостачання споживачів та їх характеристик сформовано схему РЕМ та виконано пункти секціонування, що відповідно сформувало потоки потужності в мережі. РЕМ характеризується певним значенням втрат електроенергії та рівнем напруг. Із розбудовою у розподільних електричних мережах ВДЕ виникають нові завдання: необхідність оптимізації комбінованого електропостачання від ЕЕС і розосередженого генерування, узгодження покриття графіка навантаження відновлюваних джерел, які через фізичні особливості можуть видавати потужність за різними графіками, оцінювання впливу ВДЕ на значення струмів короткого замикання і, відповідно, на роботу релейного захисту та автоматики, оцінювання впливу на техніко-економічні показники РЕМ тощо.

Сьогодні втрати електроенергії в електричних мережах енергопостачальних компаній України становлять 11,5–12,1 % від її відпускання в електричну мережу, що значно більше ніж у США (6,5 %), Англії (8,6 %), Франції (4,5 %) і навіть у Росії (8,7 %). Очевидно, що на значення втрат в електромережах впливають як параметри ВДЕ, так і схеми їх приєднання, а також обсяг та графік споживання суміжних навантажень.

На рис. 7.3 наведено можливі схеми приєднання ВДЕ в розподільній електромережі, які істотно відрізняються впливом на потоки потужності та, відповідно, на втрати потужності й енергії в мережі. На рис. 8.3, а ВДЕ приєднано до шин підстанції зв'язку із ЕЕС. У цьому разі трансформатор підстанції розвантажується на потужність, яку виробляє ВДЕ, унаслідок цього зменшуються втрати потужності у трансформаторі. У лініях електропередавання втрати не змінюються.

У варіанті, показаному на рис. 7.3, б, розвантажуються як трансформатор підстанції, так і частина ЛЕП, що забезпечує додаткове зменшення втрат потужності та електроенергії.

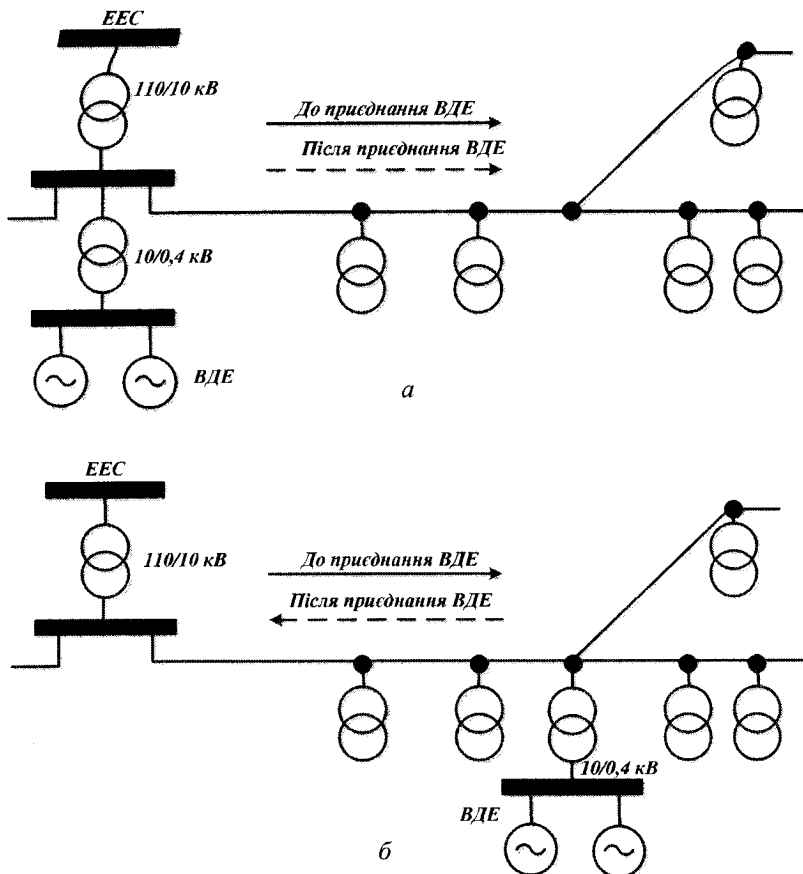


Рис. 7.3. Варіанти присіднання ВДЕ в електромережі

Оскільки зменшується потік потужності, знижуються також втрати напруги, що сприяє покращенню рівнів напруги на шинах підстанцій 10/0,4 кВ. Відповідно до типових схем присіднання ВДЕ до розподільних мереж, за певної потужності генерування вони частково компенсують потоки потужності, зумовлені навантаженням споживачів, і надходження електроенергії з боку системи зменшується. Разом із цим знижуються втрати електроенергії в розподільних мережах. Загалом їх можна оцінити як [17]

$$\Delta W = \frac{S_C^2}{U_H^2} r_{EK} k_\Phi^2 T_\Pi =$$

$$= \frac{(P_H - P_\Gamma)^2 + (P_H \tan \varphi_H - P_\Gamma \tan \varphi_\Gamma)^2}{U_H^2} r_{EK} k_\Phi^2 T_\Pi, \quad (7.5)$$

де S_C – повна потужність, що надходить до шин приєднання ВДЕ з боку енергосистеми; P_H, P_Γ – відповідно, активна потужність навантаження споживачів та ВДЕ; U_H – номінальна напруга електромережі; r_{EK} – еквівалентний опір електросистеми, зведений до U_H ; k_Φ – коефіцієнт форми графіка навантаження споживачів, суміжних із ВДЕ; T_Π – тривалість звітного періоду.

Отже, встановлення джерел РГ може як збільшувати, так і зменшувати втрати потужності у розподільній мережі, що залежить від місць їх установлення, потужності, їхнього $\cos \varphi$, від топології ЕМ тощо.

7.4. Можливості регулювання потужності та частоти вітровими електростанціями

Регулювання частоти ЕЕС виконує визначальну роль у забезпеченні споживачів електричною енергією належної якості, а також в економічності та надійності функціонування ЕЕС та їх об'єднань.

На рис. 7.4 проілюстровано баланс потужності у разі рівності споживання і генерування енергії. Якщо за заданої частоти струму (наприклад, 50 Гц) порушується баланс, відбувається зміна частоти. Щоб відновити значення частоти, у разі збільшення споживання електроенергії необхідно використати резерви генерування: інерційний, первинний, вторинний та третинний резерви.

Тривалість дії інерційного, первинного, вторинного та третинного контролів показано на рис. 7.5. Інерція системи пропорційна до кількості обертових мас у ній. Цим визначається швидкість зміни частоти (ШЗЧ) після порушення балансу споживання і генерування потужності. Що більша інерція системи, то менша ШЗЧ після дисбалансу потужності. Коли виникає невідповідність

між генеруванням і споживанням електроенергії, ротори приєднаних генераторів вивільняють чи поглинають кінетичну енергію і, як наслідок, частота їх обертання і частота струму змінюються. Це явище відоме як “реакція” інерції. “Реакція” інерції доступна відразу ж після зміни потужності споживання і триватиме близько 3–5 с.

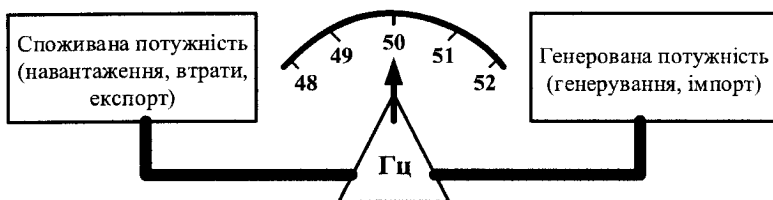


Рис. 7.4. Ілюстрація режиму балансу потужності

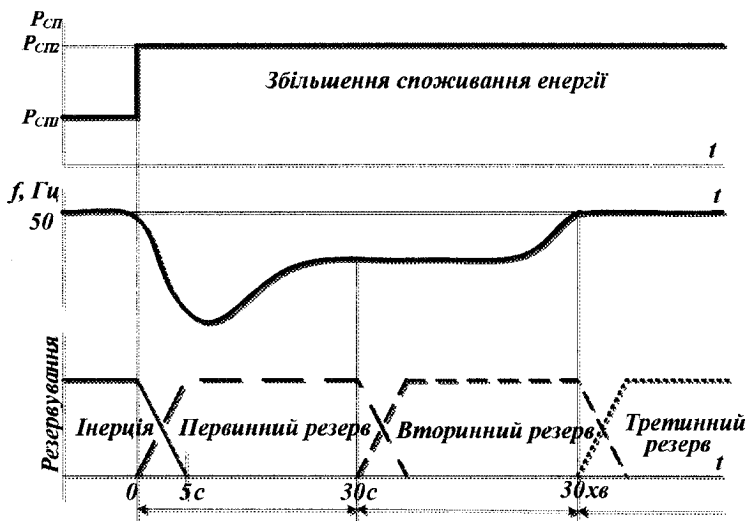


Рис. 7.5. Тривалість дії інерційного та первинного, вторинного і третинного резервів після збільшення навантаження від $P_{сп1}$ до $P_{сп2}$

На наступному етапі після зміни споживання енергії, як тільки частота відхилиться від заданого встановленого значення (зменшиться чи збільшиться відносно 50 Гц), регулятор швидкості

прийме відповідні сигнали і відрегулює подавання пари/води в турбіну, затримавши додаткову зміну швидкості. Початкова дія регулятора відома як первинний (основний) контроль, що відновлює баланс активної потужності між генеруванням і споживанням за допомогою дії пропорційного контролю, що перешкоджає подальшому провалу частоти. Первинна реакція зазвичай триває протягом 20–30 секунд.

Згодом вторинні контролери змінюють активну потужність генераторів, що беруть участь у регулюванні активної потужності, так що резерв первинного контролю поповнюється протягом 20–30 хв, частота повернеться до її номінального рівня, і, отже, система буде готова до наступної зміни балансу. Вторинний резерв замінює первинний резерв і працює, поки не активується третинний (довготривалий) резерв. Отже, частота системи і потоки потужності відновлюються до запланованих значень після дисбалансу. Третинне регулювання частоти, призначене для перерозподілу резервів первинного та вторинного регулювання агрегатів чи поновлення витрачених резервів оперативного (вторинного) регулювання, повинно виконуватись з урахуванням потреб економічного розподілу (перерозподілу) навантаження енергосистеми між станціями й агрегатами. Це пояснюється необхідністю мінімізації витрат палива на станціях та втрат потужності в елементах електричних мереж із забезпеченням належної якості електроенергії.

Як правило, первинне регулювання частоти супроводжується одночасною зміною потужності споживання і генерування у нормальному режимі роботи, а вторинне – гідроелектростанціями (ГЕС) та гідроакumuлювальними (ГАЕС), тобто легкоманевреними електростанціями, які з високою швидкістю нарощують генерування. У вторинному регулюванні задіяні також ГЕС та теплові електричні станції. У третинному регулюванні беруть участь всі електричні станції ЕЕС.

Отже, ШЗЧ пропорційна до кількості обертових мас в електроенергетичній системі. Що більша інерція обертових мас системи, то менша ШЗЧ після дисбалансу між генеруванням та споживанням енергії.

Введення нових джерел енергії в ЕЕС, зокрема, таких як ВЕС чи СЕС, дає змогу знизити залежність від ископного палива і зменшити шкідливі викиди в довкілля. Сучасні генератори ВЕУ працюють у режимі змінної частоти обертання (ЗЧО), щоб оптимально використовувати енергію вітру. Електричне з'єднання між цими генераторами і генераторами ЕМ відсутнє через використання узгоджувальних пристроїв силової електроніки. Тому обертові маси їх генераторів “приховані” від ЕМ і не беруть участі у підтриманні балансу потужності та, відповідно, у регулюванні частоти. Отже, збільшення частки ВЕС, а також СЕС в ЕЕС знижує загальну інерцію ЕЕС і збільшує швидкість зміни частоти, що призведе до зростання відхилень частоти після змін рівноваги споживання і генерування енергії в системі.

Правила технічної експлуатації зобов'язують ВЕС брати участь у первинному і вторинному регулюваннях частоти. У нормальному режимі роботи вихідна активна потужність ВЕС може змінюватися до 15 % від встановленої потужності у межах 15 хв. Отже, вироблена потужність ВЕС може взяти участь у первинному та вторинному регулюваннях. ВЕС повинні виробляти більше потужності, щоб забезпечити вторинне регулювання частоти, якщо вона нижча від номінального значення. У разі підвищення частоти ЕЕС деякі ВЕС можна вимкнути.

7.5. Вплив інерції рухомих мас генераторів на швидкість зміни частоти

Для підтримання балансу потужності електричний обертовий момент $M_{ЕЛ}$ зрівноважується механічним обертовим моментом $M_{МЕ}$ (рис. 7.6).

Дисбаланс між обертовими моментами, що діють на обертові маси і змушують ротор коливатися, можна записати як

$$\Delta M = M_{МЕХ} - M_{ЕЛ}, \quad (7.6)$$

де ΔM – пришвиджувальний (або гальмувальний залежно від знака ΔM) обертовий момент, Н·м; $M_{МЕХ}$ – механічний обертовий момент, Н·м; $M_{ЕЛ}$ – електричний обертовий момент, об./хв.

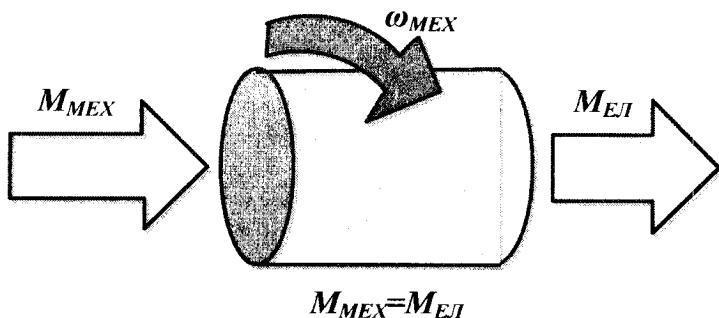


Рис. 7.6. Дія електричного і механічного
оберткових моментів елементів ЕЕС

У разі порушення рівності, якщо $M_{MEX} \neq M_{EЛ}$, частота обертання $d\omega_{MEX}/dt$ прискорюватиметься або сповільнюватиметься, і визначають її рівнянням руху

$$J \frac{d\omega_{MEX}}{dt} = M_{MEX} - M_{EЛ}, \quad (7.7)$$

де J – момент інерції обертової маси ротора, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; ω_{MEX} – механічна кутова швидкість маси ротора, рад/с .

Кінетичну енергію, накопичену в обертових масах, визначають за формулою

$$E = \frac{1}{2} J \omega_{MEX}^2. \quad (7.8)$$

Коли виникає дисбаланс між виробленою і спожитою енергією, частота обертання роторів генераторів збільшується чи зменшується, що відповідно і змінює (збільшує або зменшує) частоту струму ЕЕС. Тобто частота струму ЕЕС залежить передусім від частоти обертання роторів генераторів, а саме від їх інерції. Це явище прийнято називати “реакцією” інерції, чи інерційним відгуком. Причинами дисбалансу, тобто коливання частоти ЕЕС, можуть бути короткі замикання (КЗ), вимкнення ліній, збільшення чи зменшення споживання енергії, зміни в генерованій потужності тощо. Для забезпечення стійкої роботи системи потрібно постійно підтримувати баланс у системі.

Зміну потужності ΔP , МВт, визначають за таким рівнянням:

$$\Delta P = P_{\text{ГЕН}} - P_{\text{СП}} = \frac{dE}{dt} = J\omega_{\text{МЕХ}} \frac{d\omega_{\text{МЕХ}}}{dt}, \quad (7.9)$$

де $P_{\text{ГЕН}}$ – потужність генерування, МВт; $P_{\text{СП}}$ – потужність споживання, МВт.

Стала інерції (H , с) генераторів – тривалість часу, впродовж якої вона зможе видавати номінальну потужність, коли швидкість ротора зменшується від номінальної до нуля, використовуючи тільки наявну кінетичну енергію в масі ротора. Сталу інерції визначають із відношення кінетичної енергії обертових мас до номінальної потужності генератора за формулою

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\omega_{\text{МЕХ}}^2}{S}, \quad \text{звідки } J = \frac{2SH}{\omega_{\text{МЕХ}}^2}, \quad (7.10)$$

де S – номінальна потужність генератора, МВ·А.

Підставивши значення J у (7.9), отримаємо

$$\Delta P = \frac{2SH}{\omega_{\text{МЕХ}}} \frac{d\omega_{\text{МЕХ}}}{dt}. \quad (7.11)$$

Прийнявши, що зміна швидкості $\omega_{\text{МЕХ}}$ дуже мала і може бути апроксимована до номінальної швидкості $\omega_{\text{НОМ}}$ та замінивши $d\omega_{\text{МЕХ}}/dt$ на df/dt , $\omega_{\text{НОМ}}$ на номінальну частоту $f_{\text{НОМ}}$, отримаємо

$$\Delta P = \frac{2SH}{f_{\text{НОМ}}} \frac{df}{dt}. \quad (7.12)$$

Із (7.12) знаходимо швидкість зміни частоти

$$\frac{df}{dt} = \Delta P \frac{f_{\text{НОМ}}}{2SH}. \quad (7.13)$$

Інерція ЕЕС є загальною сумою постійних інерцій СГ, підімкнених до ЕМ. Типове значення постійної інерції для СГ міститься у діапазоні від 2–9 с, а у ВЕУ в діапазоні від 2–6 с. Проте інерція ВЕУ змінної частоти обертання залишається “прихованою” від електричної мережі через використання перетворювача. Отже, інерційний внесок цих машин дорівнює нулю, на відміну від звичайних тепло- чи гідроенергетичних одиниць.

Отже, збільшення частки ВЕС призведе надалі до зниження інерції ЕЕС, і, як наслідок, до зростання ШЗЧ після кожної зміни в балансі потужності.

Мережеві стандарти країн, де вітроенергетика розвивається динамічно, вимагають підтримувати ШЗЧ в межах 0,5 Гц/с, оскільки збільшення ШЗЧ може призвести до аварійних ситуацій в ЕЕС.

Висновок. Джерела відновлюваної енергії за їх розподіленого розташування різнопланово впливають на роботу електромережі. Цей вплив проявляється у погіршенні якості електроенергії, у зміні надійності та ефективності електропостачання, а також умов роботи системи релейного захисту й автоматики розподільних мереж. Такий стан потребує перегляду стратегій керування, організації експлуатації та планування розвитку електромереж. Одним із першочергових завдань стає розроблення оптимальної потужності та місць під'єднання таких джерел електроенергії з метою мінімізації втрат потужності в електромережах, нормалізації рівнів напруги у вузлах, підвищення надійності електропостачання споживачів, а також ефективного використання потужності джерел розподільної генерації [19].

Контрольні запитання

1. Що розуміють під терміном “розподілена генерація”?
2. Назвіть показники якості електричної енергії.
3. Від чого залежать втрати потужності в електромережах?
4. Які пристрої генерування реактивної потужності вам відомі?
5. Що впливає на рівень напруги у вузлах розподільної електромережі?
6. Назвіть способи приєднання вітрових електроустановок до мережі.
7. Чим відрізняються ВЕУ змінної та постійної швидкості обертання?
8. Назвіть причини зміни частоти струму в електромережі.
9. Чим відрізняються графіки навантаження ВЕС і СЕС?
10. Як впливає інерція рухомих мас на забезпечення рівня частоти в енергосистемі?
11. Чому вважають, що ВЕС має приховану інерцію рухомих мас?
12. Що таке первинний, вторинний та третинний резерви потужності в електроенергетичній системі?
13. Як впливає місце приєднання джерел розподіленої генерації на втрати потужності в мережах?
14. Поясніть можливий вплив ВДЕ на умови роботи релейного захисту та автомати електричних мереж.

Розділ 8

ПРОБЛЕМА ВЗАЄМОДІЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕКОЛОГІЇ

Інтенсивне залучення відновлюваних джерел енергії для практичного використання спонукає звернути особливу увагу на екологічний аспект їх впливу на довкілля. Вважають, що виробництво електроенергії із поновлюваних джерел є абсолютно екологічно “чистим” варіантом. Це не цілком слушно, оскільки спектр дії цих джерел енергії на довкілля принципово інший порівняно із традиційними енергоустановками на органічних, мінеральних, гідравлічних енергоносіях, причому в окремих випадках впливи останніх становлять навіть меншу небезпеку.

Різновидом відновлюваних джерел енергії є гідроенергетичні ресурси. Тривалий час їх також зараховували до екологічно “чистих” джерел енергії. Незважаючи на екологічні наслідки такого використання, не розробляли природоохоронних заходів та заходів захисту довкілля, що спричинило глибоку кризу гідроенергетики на межі 90-х років ХХ ст.

Тому можливі екологічні наслідки застосування нетрадиційних джерел енергії необхідно дослідити заздалегідь.

Перетворення енергії нетрадиційних відновлюваних джерел на найпридатніші форми її використання (електрику або тепло) на рівні сучасних знань і технологій обходиться доволі дорого. Проте їх використання призводить до еквівалентного зниження витрат органічного палива і меншого забруднення довкілля.

Дотепер в усіх методиках, в яких передбачене техніко-економічне зіставлення традиційних видів отримання енергії з відновлюваними джерелами, ці чинники не враховували взагалі або тільки відзначали, але не оцінювали кількісно.

8.1. Екологічні наслідки розвитку сонячної енергетики

Вплив сонячних станцій на довкілля недостатньо вивчено, тому зарахування їх до екологічно чистих електростанцій не можна вважати повністю обґрунтованим. Порівняно екологічно

чистою можна вважати кінцеву стадію – стадію експлуатації СЕС, і то у кращому разі.

Сонячні станції займають великі земельні площі. Питома землеємність СЕС змінюється від 0,001 до 0,006 га/кВт з найвірогіднішими значеннями 0,003–0,004 га/кВт. Це менше, ніж для ГЕС, але більше, ніж для ТЕС і АЕС. Потрібно також врахувати, що сонячні станції дуже матеріалоемні (метал, скло, бетон тощо), до того ж у наведених значеннях землеємності не враховано вилучення землі на етапі видобування і оброблення сировини.

У разі створення СЕС із сонячними ставками питома землеємність підвищиться і збільшиться небезпека забруднення підземних вод розсолами.

Сонячні концентратори затіняють великі площі земель, що призводить до сильних змін ґрунтових умов, рослинності тощо.

Небажану екологічну дію у районі розташування станції спричиняє нагрівання повітря під час проходження через нього сонячного випромінювання, сконцентованого дзеркальними відбивачами. Це призводить до зміни теплового балансу, вологості, напрямку вітрів; у деяких випадках можливі перегрівання і займання систем, що використовують концентратори, із усіма небажаними наслідками.

Застосування низькокиплячих рідин і неминучі їх витoki в сонячних енергетичних системах під час тривалої експлуатації можуть призвести до значного забруднення питної води. Особливо небезпечні рідини, що містять хромати і нітрит, що є високо-токсичними речовинами.

Геліотехніка також непрямо впливає на довкілля. Під час виготовлення кремнієвих, кадмієвих і арсенідогелієвих фотоелектричних елементів у повітрі виробничих приміщень з'являються кремнієвий пил, кадмієві й арсенідні сполуки, небезпечні для здоров'я людей.

Космічні СЕС через НВЧ-випромінювання можуть впливати на клімат, створювати перешкоди для телевізійного і радіозв'язку, діяти на незахищені живі організми, що потрапили в зону його

впливу. Тому необхідно використовувати екологічно чистий діапазон хвиль для передавання енергії на Землю.

Отже, до несприятливих впливів сонячної енергетики на довкілля належать такі:

- відчуження земельних площ, їх можлива деградація;
- велика матеріалоемкість;
- можливість витоку робочих рідин, що містять хлорати і нітрити; зараження продуктів токсичними речовинами у разі використання сонячних систем у сільському господарстві;
- загроза перегрівання і займання систем;
- зміна теплового балансу, вологості, напряму вітру в районі розташування станції;
- затінення великих територій сонячними концентраторами, можлива деградація земель;
- вплив на клімат космічних СЕС;
- створення завад для телевізійного і радіозв'язку;
- передавання енергії на Землю у вигляді мікрохвильової.

8.2. Вплив вітроенергетики на природне середовище

Чинники дії ВЕС на природне середовище, а також наслідки цього впливу й основні заходи щодо зниження і усунення негативних проявів наведено у табл. 8.1.

Під потужні промислові ВЕС потрібна площа з розрахунку від 5 до 15 МВт/км² залежно від троянди вітрів і місцевого рельєфу району, для ВЕС потужністю 1000 МВт – від 70 до 200 км². Виділення таких площ у промислових регіонах утруднене, хоч ці землі можна частково використовувати й під господарські потреби. Наприклад, у Каліфорнії на відстані 50 км від р. Сан-Франциско на перевалі Алтамонт-пас землю, відведену під парк потужної ВЕС, одночасно використовують для сільськогосподарських цілей.

Таблиця 8.1

Негативний вплив на довкілля ВЕУ та методи його усунення

Чинники впливу	Методи усунення
Вилучення земельних ресурсів, зміна властивостей ґрунтового шару	Розташування ВЕУ на невикористовуваних землях. Оптимізація розташування – мінімізація витрати землі. Цілеспрямований облік змін властивостей ґрунтового шару
Акустична дія (шумові ефекти)	Зміна кількості обертів вітроколеса (ВК). Зміна форм лопаті ВК. Віддалення ВЕУ від об'єктів соціальної інфраструктури. Заміна матеріалів лопатей ВК
Вплив на ландшафт і його сприйняття	Урахування особливостей ландшафту під час розташування ВЕУ. Рекреаційне використання ВЕУ. Дослідження різних форм опорних конструкцій, забарвлення тощо
Електромагнетне випромінювання, вплив на телебачення і радіозв'язок	Спорудження ретрансляторів. Заміна матеріалів лопатей ВК. Упровадження спеціальної апаратури в конструкцію ВЕУ. Віддалення від комунікацій
Вплив на орнітофауну на перелітних трасах і морську фауну в разі розміщення ВЕС на акваторіях	Аналіз ураження птахів на трасах перельоту і риб на шляхах міграції. Розрахунок вірогідності ураження птахів і риб
Аварійні ситуації, небезпека пошкодження і відлітання пошкоджених частин ВК	Розрахунок вірогідності поломок вітроколеса, траєкторії і дальності відлітання. Оцінка надійності безаварійної роботи ВЕУ. Зонування виробництва поблизу ВЕУ
Чинники, що покращують екологічну ситуацію	Зменшення сили вітру. Зниження вітрової ерозії ґрунтів. Зменшення вітрів з акваторій водоймищ і водосховищ

Проблема використання території ВЕС спрощується, якщо їх розташовано на акваторіях. Із площі акваторії, що відводять для ВЕС, безпосередньо під споруди для ВЕУ знадобиться лише близько 2 %. У Данії гребля, на якій встановлено парк ВЕУ, одночасно є пірсом для риболовецьких суден.

Використання території, зайнятої вітровим парком, з іншою метою залежить від шумових ефектів і ризику поломок ВЕУ. У великих ВЕУ відірвану лопать іноді відкидає на 400–800 м.

Найважливіший чинник впливу ВЕС на довкілля – акустична дія. У зарубіжній практиці виконано доволі багато досліджень і натурних замірювань рівня і частоти шуму для різних ВЕУ з вітроколесами, що відрізняються за конструкцією, матеріалами, висотою, і для різних природних умов (швидкість і напрям вітру, підстильна поверхня тощо).

Шумові ефекти від ВЕУ мають різну природу. Розрізняють механічні (шум від редукторів, підшипників і генераторів) і аеродинамічні шуми. А останні можуть бути низькочастотними (менше ніж 16–20 Гц) і високочастотними (від 20 Гц до декількох кГц). Вони спричинені обертанням робочого колеса, і визначаються такими явищами: утворенням розрідження повітря за ротором або вітроколесом зі спрямуванням потоків повітря в деяку точку збігу турбулентних потоків; пульсаціями підйомної сили на профілі лопаті; взаємодією турбулентного пограничного шару із задньою кромкою лопаті.

Віддалення ВЕС від населених пунктів і місць відпочинку обмежує шумовий вплив на людей. Проте шум може впливати на фауну, зокрема на морську фауну в районі екваторіальних ВЕС. За зарубіжними даними, вірогідність ураження птахів вітровими турбінами оцінюють у 10 %, якщо шляхи міграції проходять через вітровий парк. Розташування вітрових парків екваторіальних ВЕС вплине на шляхи міграції птахів і риб.

Вважають, що екранувальна дія ВЕС на шляху природних повітряних потоків буде незначною і її можна не брати до уваги. Це пояснюють тим, що ВЕУ використовують невеликий приземний шар рухомих повітряних мас (близько 100–150 м) і не більше ніж 50 % їх кінетичної енергії. Потужні ВЕС можуть вплинути на довкілля, зменшивши зміни повітря в районі вітрового парку. Екранувальна дія вітрового парку може виявитися еквівалентною дії підвищення такої самої площі на близько 100–150 м.

Перешкоди, спричинені відбиванням електромагнетних хвиль лопатями вітрових турбін, можуть позначатися на якості телевізійних і мікрохвильових радіопередач, а також різних навігаційних систем у районі розташування вітрового парку ВЕС на

відстані декількох кілометрів. Радикальним способом зменшення перешкод є віддалення вітрового парку на відповідну відстань від комунікацій. Іноді перешкод можна уникнути, встановивши ретранслятори.

Отже, до несприятливих чинників вітроенергетики належать такі:

- шумові дії, радіо і телевізійні завади;
- відчуження земельних площ;
- локальні кліматичні зміни;
- небезпека для птахів, які мігрують, і комах;
- ландшафтна несумісність, непривабливість, візуальне несприйняття, дискомфорт;
- несприятливий вплив на морську фауну.

8.3. Можливі екологічні прояви геотермальної енергетики

Негативний вплив на довкілля геотермальних електростанцій проявляється на етапі розроблення родовища, будівництва паропроводів і будівлі станцій, але він зазвичай обмежений районом розташування родовища. Природну пару видобувають бурінням свердловин завглибшки від 300 до 2700 м. Під дією власного тиску пара піднімається до поверхні, де збирається в теплоізольовані трубопроводи і подається до турбін. Наприклад, у долині гейзерів (США) продуктивність кожної свердловини забезпечує у середньому 7 МВт корисної потужності. Для роботи станції потужністю 1000 МВт потрібно 150 свердловин, які займають територію понад 19 км².

Потенційними наслідками геотермальних розробок є осідання ґрунту і сейсмічні ефекти. Осідання можливе усюди, де нижні шари перестають підтримувати верхні шари ґрунту, що проявляється зниженням дебетів термальних джерел і гейзерів і навіть повним їх зникненням. Наприклад, експлуатація родовища Вайрокей (США) від 1954 до 1970 рр. призвела до просідання поверхні

землі майже на 4 м, а площа ділянки, на якій ґрунт просів, вже близько 70 км² і продовжує щорічно збільшуватися.

Висока сейсмічна активність є однією із ознак близькості геотермальних родовищ, яку використовують під час пошуку цих ресурсів. Проте інтенсивність землетрусів у зоні термальних родовищ, спричинених вулканічною діяльністю, зазвичай значно менша від інтенсивності землетрусів, зумовлених великими зміщеннями земної кори на розломах. Тому немає підстав вважати, що розроблення геотермальних ресурсів збільшує сейсмічну активність.

На геотЕС не відбувається спалювання палива, тому обсяг отруйних газів, викинутих в атмосферу, значно менший, ніж на ТЕС, а їхній хімічний склад інший порівняно із газоподібними викидами станцій на органічному паливі. Пара, видобута із геотермальних свердловин, зазвичай водяна. У геотермальних водах у розчиненому стані є такі гази: SO₂, N₂, NH₃, H₂S, CH₄, H₂. Газові домішки на 80 % складаються із двоокису вуглецю і містять невелику частку метану, водню, азоту, аміаку і сірководню. Найшкідливішим є сірководень (0,0225 %).

Кількість води, яка потрібна на геотЕС для охолодження конденсату на 1 кВт·год генерованої електроенергії, у чотири–п'ять разів більша, ніж для ТЕС на органічному паливі, через менший ККД. Скидання відпрацьованої води і конденсату для охолодження у водоймища може спричинити їх теплове забруднення, а також підвищення концентрації солей, зокрема хлористого натрію, аміаку, кремнезему, і таких елементів, як бор, арсен, ртуть, рубідій, цезій, калій, фтор, натрій, бром, йод, хоча і в невеликих кількостях.

Один із несприятливих проявів геотЕС – забруднення поверхневих і ґрунтових вод у разі виливання розчинів високої концентрації (розсолу) під час буріння свердловин. Скидання відпрацьованих термальних вод може призвести до заболочування окремих ділянок ґрунту в умовах вологого клімату, а в посушливих районах – до засолення. Можлива небезпека прориву трубопроводів і виливання на землю великої кількості розсолу.

ГеоТЕС, ККД яких у два–три рази менший, ніж АЕС і ТЕС, спричиняють у два–три рази більше теплових викидів у атмосферу. Як простий спосіб зменшення впливу на довкілля необхідно передбачити циркуляцію теплоносія геоТЕС у системі “пласт 1–свердловина – теплові агрегати – свердловина – пласт 2”. Це дасть змогу уникнути виходу термальних вод на поверхню землі, у ґрунтові води і поверхневі водойми, забезпечити збереження тиску пласта, уникати просідання ґрунту і будь-якої можливості сейсмічних проявів.

Отже, несприятливі впливи геотермальної енергетики на екологію такі:

- відчуження земель;
- зміна рівня ґрунтових вод, просідання ґрунту, заболочування;
- переміщення земної кори, підвищення сейсмічної активності;
- викиди газів (метану, водню, азоту, аміаку, сірководню);
- викидання тепла в атмосферу або в поверхневі води;
- скидання отруйних вод і конденсату, забруднених аміаком, ртуттю, кремнеземом;
- забруднення підземних вод і водоносних шарів, засолення ґрунтів;
- викиди великої кількості розсолів у разі розривання трубопроводів.

8.4. Екологічні наслідки використання енергії океану

Перетворення будь-яких видів океанічної енергії супроводжуються неминучими змінами природного стану екосистем.

До негативних наслідків роботи установок, що використовують термальну енергію океану, можна зарахувати можливі витіки в океан

аміаку, пропану або фреону, а також речовин, використовуваних для промивання теплообмінників (хлор тощо). Можливе значне виділення вуглекислого газу з холодних глибинних вод, що піднімаються на поверхню, через зменшення у них парціального тиску CO_2 і підвищення температури. Виділення CO_2 з води під час роботи океанічних ТЕС, імовірно, на 30 % більше, ніж ТЕС тієї самої потужності, що використовують органічне паливо.

Охолодження вод океану спричиняє збільшення вмісту поживних речовин у поверхневому шарі та значне розростання фітопланктону. Піднімаючись до поверхні, глибинні мікроорганізми забруднюватимуть океан і доведеться застосовувати спеціальні заходи для його очищення.

Будівництво ПЕС несприятливо впливає на стан прибережних земель, узбережжя та аквальної берегової смуги: змінюються умови підтоплення, засолення, розмивання берегів, формування пляжів тощо. Зміна руху ґрунтових вод впливає на динаміку засолення прибережних земель.

Експлуатація ПЕС "Ранс" у Франції показала, що передбачена в її проекті однобасейнова схема двосторонньої дії максимально зберігає природний цикл коливань басейну і гарантує тим самим екологічну безпеку припливної енергії.

Використання енергії хвиль на глибоководних місцях у відкритому океані позначається на процесах в акваторії океану. Перетворювачі розміщують далеко від берега, вони не виявляють негативної дії на стійкість узбережжя. Установлення перетворювачів поблизу узбережжя створює естетичні проблеми, оскільки їх видно з берега.

Ланцюжок пристроїв типу качок Солтера, які пірнають, завдовжки в декілька кілометрів, виглядає естетично менш привабливо, ніж група окремо розташованих перетворювачів енергії. Крім того, безперервна лінія перетворювачів може стати перешкодою для навігації та виявитися небезпечною для суден під час сильних штормів.

Несприятливі екологічні наслідки гідротермальної енергетики:

- витоки в океан аміаку, фреону, хлору тощо;
- виділення CO₂ з води;
- зміна циркуляції вод, поява регіональних і біологічних аномалій під впливом гідродинамічних і теплових збурень;
- зміна клімату.

Несприятливі екологічні наслідки припливної енергетики:

- періодичне затоплення прибережних територій, зміна землекористування у районі ПЕС, флори і фауни акваторії;
- будівельне замушення води, поверхневі скидання забруднених вод.

Несприятливі екологічні наслідки хвильової енергетики:

- ерозія узбережжя, зміна руху прибережних пісків;
- значна матеріаломісткість;
- зміна судноплавних шляхів уздовж берегів;
- забруднення води під час будівництва, поверхневі скидання.

8.5. Екологічна характеристика використання біоенергетичних установок

Біоенергетичні станції порівняно з традиційними електростанціями та іншими нетрадиційними й відновлюваними джерелами енергії екологічно найбезпечніші. Вони сприяють уникненню забруднення довкілля всілякими відходами. Наприклад, анаеробна ферментація – ефективний засіб не лише реалізації відходів тваринництва, але й забезпечення екологічної чистоти, оскільки тверді органічні речовини втрачають запах і стають менш привабливими для гризунів і комах (під час перегнивання гинуть хвороботворні мікроорганізми). Крім того, утворюються додатковий корм для худоби (протеїн) і добрива.

Міські стоки і тверді відходи, відходи вирубувань лісу і деревообробної промисловості, хоч це можливі джерела сильного

забруднення природного середовища, є водночас сировиною для отримання енергії, добрив, цінних хімічних речовин. Тому розвиток біоенергетики ефективний із погляду екології. Проте несприятливі впливи на об'єкти природного середовища в разі енергетичного використання біомаси все ж існують. Пряме спалювання деревини дає велику кількість твердих часток, органічних компонентів, оксиду вуглецю й інших газів. За концентрацією деяких забруднювачів вони перевершують продукти згорання нафти і її похідних. Іншим екологічним наслідком спалювання деревини є значні теплові втрати.

Порівняно з деревиною біогаз – чистіше паливо, проте потрібні заходи безпеки під час виробництва і споживання біогазу, оскільки метан вибухонебезпечний. Тому під час його зберігання, транспортування і використання необхідно здійснювати регулярний контроль для виявлення і ліквідації витоків.

Під час ферментативних процесів із перероблення біомаси на станол утворюється велика кількість побічних продуктів (промивальні води і залишки перегонки), що є серйозним джерелом забруднення середовища, оскільки їх маса у декілька разів (до десяти) перевищує масу отриманого етилового спирту.

Несприятливі впливи біоенергетики на екологію такі:

- викиди твердих часток, канцерогенних і токсичних речовин, оксиду вуглецю, біогазу, біоспирту;
- викидання тепла, зміна теплового балансу;
- збіднення ґрунтової органіки, виснаження і ерозія ґрунтів;
- вибухонебезпечність;
- велика кількість відходів у вигляді побічних продуктів (промивальні води, залишки переганання).

Контрольні запитання

1. Які джерела енергії належать до нетрадиційних і чому?
2. Які негативні наслідки використання сонячних електричних установок?
3. Як впливають СЕС на стан ґрунту?
4. Чому змінюються тепловий баланс, вологість у районі розташування СЕС?
5. Які негативні наслідки розташування СЕС у космосі?
6. Які можливі перешкоди виникають під час експлуатації ВЕУ?
7. Чи ВЕУ впливають і як саме на стан фауни у місцях їх розташування?
8. Чи впливають ВЕС на морські перевезення?
9. Як ВЕУ впливають на радіо і телевізійний зв'язок?
10. Які несприятливі екологічні наслідки експлуатації геотермальних станцій?
11. Які наслідки застосування гідротермальної енергетики?
12. Як впливає на довкілля припливна енергетика?
13. Які екологічні переваги біоенергетики над іншими типами станцій?
14. Які небезпечні для довкілля дії біоенергетичних установок?

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ (ГЛОСАРІЙ)

Акумуляція енергії відновлюваних джерел – спосіб збереження енергії відновлюваних джерел за відсутності потреби в її використанні одночасно з генеруванням.

Альтернативні види палива – будь-яке паливо, яке є альтернативою традиційним – газу, вугіллю, електроенергії тощо та яке виробляється (видобувається) з нетрадиційних джерел та видів енергетичної сировини.

Альтернативні джерела енергії – по-перше, це відновлювані джерела енергії, до яких належать енергія сонця, вітру, геотермальна енергія, енергія хвиль та припливів, гідроенергія, енергія біомаси, газу з органічних відходів, газу каналізаційно-очисних станцій, біогазів тощо. По-друге, це вторинні енергетичні ресурси, до яких належать доменний та коксівний газ, газ метан дегазації вугільних родовищ, перетворення скидного енергопотенціалу технологічних процесів. Необхідно відрізнити від нетрадиційних джерел енергії.

Альтернативна енергетика – сфера енергетики, що забезпечує вироблення електричної, теплової та механічної енергії з альтернативних джерел енергії.

Анаеробна ферментація біомаси – спосіб перетворення біомаси без доступу повітря, за якого одержують переважно метан та залишки перероблення у вигляді добрив.

Атомна електрична станція – електростанція, яка перетворює енергію поділу ядер атомів на електроенергію чи на електроенергію і тепло.

Біогаз – газ, що утворюється під час бактеріального розкладу відходів, здебільшого тваринного походження. Складається переважно з метану і вуглекислого газу.

Біоенергетика – галузь відновної енергетики, яка використовує енергію біомаси.

Біоетанол – спирт етиловий зневоднений, виготовлений із біомаси або спирту етилового – сирцю для використання як біопалива.

Біомаса – органічні речовини рослинного і тваринного походження (деревина, гній, солома тощо), які містять вуглець.

Відновлювані (відновні) джерела енергії – постійні чи періодичні потоки енергії у довкіллі, які функціонують без участі людини та можуть бути перетворені на електричну енергію.

Вітроенергетична (вітроелектрична) установка – установка, в якій енергія вітру перетворюється на електричну енергію.

Вітрова електростанція – сукупність вітроенергетичних установок, в яких енергія вітру перетворюється на електричну енергію.

Вітроенергетика – галузь відновної енергетики, яка використовує енергію вітру.

Вітрова енергія – вторинний вид сонячної енергії чи результат побічного впливу Сонця на атмосферу Землі.

Воднева енергетика – один із напрямів розвитку нетрадиційної енергетики, що використовує водень як енергоносіє.

Газифікація біомаси – високотемпературний процес, під час якого вуглець твердого палива в обмеженій кількості повітря перетворюється на генераторний газ.

Геліоенергетика – галузь відновної енергетики, яка використовує сонячну енергію для отримання теплової та електричної енергії.

Геліотехніка – інженерна наука про безпосереднє використання сонячної енергії.

Геотермальна енергія – тепло Землі, яке утворюється внаслідок розпаду радіоактивних речовин у земній корі й мантії.

Геотермальна електростанція – електростанція, на якій геотермальна енергія перетворюється на електричну.

Геотермальна установка – енергетична установка, що перетворює геотермальну енергію на інші види енергії.

Гідравлічна турбіна – турбомашина, в якій енергію потоку води використовують для обертання ротора генератора чи робочого колеса.

Гідроакмулювальна (гідроакмулююча) електростанція – гідроелектростанція, що використовує верхнє і нижнє водосховища для циклічної роботи: нагнітання води у верхнє водосховище і подальше її використання для вироблення електроенергії.

Гідроелектростанція – комплекс споруд і устаткування, за допомогою яких механічна енергія води перетворюється на електрику.

Гідроенергетика – галузь енергетики, пов’язана із використанням механічної енергії водних ресурсів для виробництва електроенергії.

Горючі вторинні ресурси – побічні продукти технологічних процесів, які містять хімічно зв’язану енергію відходів технологічних процесів і можуть бути використані як енергетичне чи технологічне паливо.

Джерело енергії – джерело, з якого можна отримати енергію безпосередньо чи за допомогою перетворення.

Енергетика – галузь господарства, науки і техніки, яка охоплює енергетичні ресурси, вироблення, передавання, перетворення, акумулювання, розподілення та використання різних видів енергії.

Енергетичні ресурси – запаси енергетичної сировини, які за досягнутого рівня розвитку техніки та економічної доцільності можна використовувати як джерело енергії.

Економічний потенціал – частина технічного потенціалу, освоєння якого економічно виправдане сьогодні за чинного рівня цін на обладнання, матеріали, робочу силу і конкурувальні ресурси.

Електрична мережа – взаємозв’язана мережа, призначена для постачання та розподілу електричної енергії від постачальників до кінцевих споживачів.

Енергія вітру – кінетична енергія руху повітряних мас.

Енергія морських течій – енергія природного руху морських течій.

Енергія припливів та відпливів – енергія потоків води, що виникають внаслідок різниці рівнів моря під час припливів і відпливів.

Енергія хвиль – енергія руху хвиль.

Енергозбереження – діяльність (організаційна, наукова, практична, інформаційна), яка спрямована на раціональне використання та економне витрачання первинної та перетвореної енергії і природних енергетичних ресурсів у національному господарстві та реалізується із використанням технічних, економічних та правових методів.

Концентратор сонячної енергії – оптичний пристрій для збільшення густини сонячного випромінювання, дія якого ґрунтується на явищах відбивання і заломлення променів.

Мала гідроелектростанція – гідроелектростанція потужністю від 1 МВт до 30 МВт.

Метанове зброджування – процес перетворення органічної речовини на біогаз в анаеробних умовах під дією бактеріальної мікрофлори.

Метантенк – споруда для анаеробного зброджування осаду стічних вод, а також висококонцентрованих стічних вод за умов підвищених температур.

Мікрогідроелектростанції – гідроелектростанції потужністю до 100 кВт.

Мінігідроелектростанції – електростанції потужністю від 100 кВт до 1000 кВт включно.

Нетрадиційні джерела енергії – альтернативні викопному паливу джерела енергії, до яких належать установки прямого перетворення теплової й хімічної енергії на електричну, нетрадиційні види палива та вторинні ресурси.

Паливний елемент – електрохімічний генератор, пристрій, що забезпечує пряме перетворення хімічної енергії на електричну.

Паливно-енергетичні ресурси – сукупність усіх природних і перетворених видів палива та енергії, які використовують у національному господарстві.

Первинна біомаса – рослини, які безпосередньо використовують для одержання енергії.

Піроліз біомаси – процес термічного розкладу органічних речовин без доступу кисню за температури 500–800 °С.

Потужність вітрового потоку – кінетична енергія вітрового потоку, що проходить через площину, перпендикулярну до напрямку руху, протягом 1 с.

Припливна електростанція – електростанція, що перетворює енергію морських припливів на електричну.

Пряме перетворення енергії – перетворення одного виду енергії на кінцевий інший вид без проміжних перетворень.

Розподільна генерація – джерела електричної енергії, з'єднані безпосередньо із розподільною електричною мережею чи під'єднані до такої мережі з боку електроспоживачів.

Сонячна енергетична установка – енергетична установка, що перетворює енергію сонячного випромінювання на інші види енергії, наприклад, теплову чи електричну.

Сонячна електростанція – електростанція, яка для отримання електричної енергії використовує енергію сонячного випромінювання (радіації).

Сонячна енергія – енергія сонячного випромінювання.

Сонячна теплоенергетика – розділ геліоенергетики, що вивчає принципи отримання електричної енергії за допомогою сонячної теплоти.

Сонячна фотоелектроенергетика – розділ геліоенергетики, який вивчає безпосереднє перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію за допомогою фотоелементів.

Сонячний колектор – пристрій, який призначений для ефективного перетворення сонячної енергії на теплову і складається із теплоізолюваного корпусу, всередині якого розміщена панель із високоселективним поглинальним покриттям та тепловідвідними трубками.

Сонячний концентратор енергії – оптична система, яка спрямовує потік сонячних променів із більшою густиною випромінювання на приймач.

Сонячний фотоелектричний елемент – перетворювач сонячного випромінювання на електричну енергію на основі фото ефекту, переважно напівпровідникові перетворювачі на основі фотопровідності.

Спалювання біомаси – реакція горючих речовин, що містяться в біомасі, з киснем, причому вона самостійно підтримується після досягнення температури займання.

Теплова електрична станція – електростанція, яка перетворює енергію згорання палива на електроенергію чи електроенергію і тепло.

Теоретичний потенціал – максимально можливий обсяг використання енергетичного ресурсу певного виду (сумарна енергія, зосереджена у цьому виді енергоресурсу).

Технічний потенціал – частина теоретичного потенціалу, яку можна практично використати за досягнутого рівня розвитку техніки.

Традиційні джерела енергії – джерела енергії, в яких використовують традиційні види палива.

Хвильова електростанція – установка, розташована у водному середовищі, робота якої основана на впливі хвиль на робочі органи – поплавці, маятники, лопаті, турбіни тощо.

Хвильові генератори – електрогенератори, що використовують енергію хвиль.

Фотоелемент – прилад, який перетворює світлове випромінювання на електричний струм.

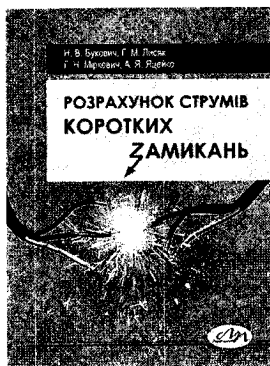
Фотоенергетика – галузь енергетики, яка використовує сонячне випромінювання для його прямого перетворення на електрику.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соловей О. І. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії: навч. посіб. / О. І. Соловей, Ю. Г. Лега, В. П. Розен, О. О. Ситник, А. В. Чернявський, Г. В. Курбака; за заг. ред. О. І. Солов'я. – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – 484 с.
2. Гнатишин Я. М. Перетворення та використання відновної енергії: Я. М. Гнатишин, С. С. Мазепа, І. Р. Кенс. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2013. – 196 с.
3. Дудурич О. Б. Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії: конспект лекцій для студентів базової вищої освіти за напрямом 6.050701 “Електротехніка та електротехнології” усіх форм навчання. – Л.: Ліга-Прес, 2013. – 148 с.
4. Атлас енергетичного потенціалу відновлювальних та нетрадиційних джерел енергії України / НАНУ, Ін-т електродинаміки, Держ. комітет України з енергозбереження. – К., 2001.
5. Магомедов А. Нетрадиционные возобновляемые источники энергий / Абук Магомедов. – Махачкала, 1996. – 245 с.
6. Величко С. А. Энергетика навколишнього середовища України (з електронними картами): навч.-метод. посіб. для магістрів. – Харків: Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, 2003. – 52 с.
7. Обухов С. В. Використання відновлюваних джерел енергії: навч. посіб. / С. В. Обухов. – Одеса: ТЕС, 1999. – 254 с.
8. Соловей О. І. Від виробництва до ефективного споживання енергії: посібник для вчителів / О. І. Соловей, А. В. Праховник, Є. М. Іншеков та ін. – К., 1999. – 126 с.
9. Мхитарян Н. М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы. – К.: Наукова думка, 1999. – 320 с.
10. Маляренко В. А. Энергетика, довкілля, енергозбереження / В. А. Маляренко, Л. В. Лисак; під заг. ред. проф. В. А. Маляренка. – Х.: Рубікон, 2004. – 368 с.
11. Энергетика: історія, сучасність і майбутнє. Книга 5. Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики у сучасному світі.
12. Офіційний сайт компанії WINDPOWER [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.windpowermonthly.com/10-biggest-turbines>
13. База даних офшорних вітроагрегатів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.4coffshore.com/windfarms/turbines.aspx>

14. Корчемний М. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. Корчемний, В. Федорейко, В. Щербань. – Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. – 984 с.
15. Конспект лекцій вибіркової навчальної дисципліни циклу дисциплін за вибором ВНЗ; розроблено для студентів очної форми навчання галузі знань 0401 “Природничі науки” напрямів підготовки 6.040106 “Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування” та 6.050301 “Гірництво” / уклад. В. К. Костенко, В. В. Колеснікова, О. Л. Зав’ялова. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – 180 с.
16. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими / за заг. ред. акад. НАН України О. В. Кириленка; Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
17. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. – Вінниця: Вінниця: ВНТУ, 2014. – 204 с.
18. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
19. Кириленко А. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах / А. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. Н. Луцяненко; НАНУ, Ін-т електродинаміки // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 46–53.
20. Сегеда М. С. Моделювання зміни частоти електроенергетичних систем з вітровими електричними установками змінної швидкості обертання з асинхронними генераторами з подвійним живленням / М. С. Сегеда, О. Б. Дудурич // Наукові праці Вінницького нац. техн. ун-ту, 2017. – № 3. – С. 1–5.
21. Сегеда М. С. Швидкість зміни частоти електроенергетичних систем в результаті збільшення частки генерованої потужності вітровими електричними станціями / М. С. Сегеда, О. Б. Дудурич // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 6. – С. 68–75.
22. Scheda M., Dudurych O. Issues of Inertia Response and Rate of Change of Frequency in Power Systems with Different Penetration of Variable Speed Wind Turbines. EPNet 2016 // Konferencja Naukowo-Techniczna “Electrical Power Networks”, 19–21 września 2016, Szklarska Poręba, Poland. – ISBN 978-1-5090-5517-3. IEEE Catalog Number CFP16J91-USB.

Книги для навчання і роботи!



Букович Н. В. та ін.

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ

Навчальний посібник / Н. В. Букович, Г. М. Лисяк,
Г. Н. Міркевич, А. Я. Яцейко. Львів : Видавництво
Львівської політехніки, 2018. – 236 с.
Формат 145×200 мм. М'яка обкладинка.

ISBN 978-966-941-142-6

У навчальному посібнику викладено загальні відомості, а також теоретичні основи методи та алгоритми розрахунку струмів коротких замикань в електроенергетичних системах. Практичне застосування теоретичного матеріалу проілюстровано за допомогою значної кількості прикладів розрахунку та побудови векторних діаграм.

Для студентів спеціальності “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” денної, заочної та дистанційної форм навчання, а також для інженерно-технічних працівників електроенергетичних підприємств, слухачів курсів підвищення кваліфікації та післядипломної освіти.

Малиновський А. А., Музичак А. З.

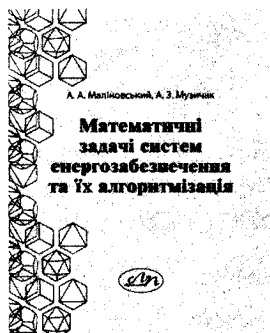
МАТЕМАТИЧНІ ЗАДАЧІ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЇХ АЛГОРИТМІЗАЦІЯ

Навчальний посібник. – Львів : Видавництво Львівської
політехніки, 2018. – 284 с. Формат 170×215 мм.
Тверда оправа.

ISBN 978-966-941-138-9

Розглянуто узагальнений підхід до аналізу режимів енергетичних систем різної фізичної природи, що ґрунтується на принципах метричної та енергетичної аналогій. Це надало змогу покласти в основу рівняння вітки енергетичного кола фундаментальний закон збереження енергії з урахуванням двох її форм – кінетичної та потенціальної. Одержаний математичний апарат є спільним для енергетичних кіл різної фізичної природи, враховуючи електричні, механічні, гідравлічні, теплові тощо.

Для студентів спеціальності “Енергетика, електротехніка та електромеханіка” вищих навчальних закладів та спеціалістів відповідного профілю.



Сегеда М. С.

ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

Підручник / Третє видання, допов. та перероб. – Львів :
Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 540 с.
Формат 170×240 мм. Тверда оправа.

ISBN 978-617-607-831-9

Викладено характеристику електричних мереж і систем та їхніх режимів, основи теорії пересилання електричної енергії, наведено заступні схеми елементів електроенергетичних мереж і систем та обчислення їхніх параметрів, методи аналізу усталених режимів розімкнених та замкнених електричних мереж з використанням інженерних підходів й формалізованих методів, несиметричні та несинусоїдні режими, поняття про реактивну потужність в електричних мережах, пересилання електричної енергії лініями надвисокої напруги, основи керування режимами та проектування розвитку електроенергетичних мереж і систем, основи механічної частини повітряних ліній електропересилання. Для студентів електроенергетичних спеціальностей вищих навчальних закладів, аспірантів, викладачів і спеціалістів відповідного профілю.

Олійник М. Й., Лисяк В. Г.

ОСНОВИ ЕКОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА, ПЕРЕСИЛАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

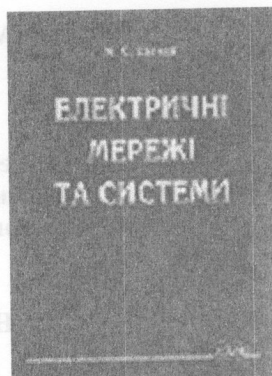
Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської
політехніки, 2018. – 192 с. Формат 145×215 мм.

М'яка обкладинка.

ISBN 978-966-941-253-9

Висвітлено питання антропогенного впливу на довкілля, зокрема описано технологічні процеси видобування, перетворення та використання енергоресурсів під час генерування тепла й електроенергії. Розглянуто вплив об'єктів енергетики та промислових підприємств на атмосферу, гідросферу та літосферу. Висвітлено питання співпраці України зі світовим співтовариством щодо питань збереження довкілля та сталого розвитку. Наведений матеріал відповідає програмі навчальної дисципліни “Екологія виробництва, пересилання та використання електричної енергії”.

Посібник буде корисним для студентів спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” спеціалізації “Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” усіх форм навчання та для широкого загалу читачів.



Видавництво Львівської політехніки

вул. Ф. Колесси, 4, корп. 23А, м. Львів, 79013

тел. +380 32 2582146, факс +380 32 2582136, <http://vlp.com.ua>, vmr@vlp.com.ua



НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

**Сегеда Михайло Станкович
Олійник Михайло Йосипович
Дудурич Олександра Борисівна**

**НЕТРАДИЦІЙНІ ТА
ВІДНОВЛЮВАНІ
ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

Навчальний посібник

Редактор *Оксана Чернигевич*
Коректор *Наталія Колтун*
Технічний редактор *Лілія Саламін*
Комп'ютерне верстання *Олени Катачиної*
Художник-дизайнер *Маріанна Рубель-Кадирова*

Здано у видавництво 23.05.2019. Підписано до друку 25.10.2019.
Формат 60×84¹/₁₆. Папір офсетний. Друк офсетний.
Умовн. друк. арк. 11,8. Обл.-вид. арк. 9,2.
Наклад 100 прим. Зам. 190897.

Видавець і виготівник: Видавництво Львівської політехніки
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4459 від 27.12.2012 р.

вул. Ф. Колесси, 4, Львів, 79013
тел. +380 32 2582146, факс +380 32 2582136
vlp.com.ua, ел. пошта: vmr@vlp.com.ua



СЕГЕДА Михайло Станкович

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики та систем управління Національного університету «Львівська політехніка».

Нагороджений Нагрудним знаком Міністерства освіти і науки України «Відмінник освіти», Лауреат Всеукраїнського конкурсу «Лідер паливно-енергетичного комплексу 2008» у номінації «Вчений». Автор понад 150 публікацій: трьох монографій, п'яти підручників з грифом Міністерства освіти та науки України, п'яти навчальних посібників з грифом Міністерства освіти та науки України та п'яти авторських свідоцтв і патентів. Основний напрям наукової діяльності – математичне моделювання електромагнетних процесів у електроенергетичних системах.



ОЛІЙНИК Михайло Йосипович

Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління Національного університету «Львівська політехніка», автор понад 60 наукових праць, 11 авторських свідоцтв на винаходи, чотирьох навчальних посібників, співавтор двох монографій, двох термінологічних стандартів України та понад 30 методичних розробок.

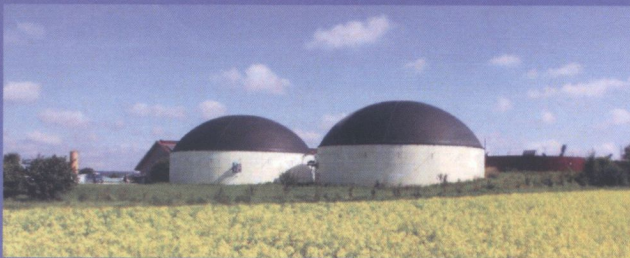
Нагороджений почесним знаком «Відмінник освіти України». Напрями наукової діяльності – нетрадиційні та відновні джерела енергії, обмеження втрат тепла із застосуванням теплоізоляційних матеріалів, екологічні проблеми енерговикористання.



ДУДУРИЧ Олександра Борисівна

Технічний спеціаліст MAGAL Power Inc. із більш ніж п'яти-річним досвідом викладання у галузі електроенергетики. Протягом року стажувалася у Дублінському технологічному інституті за програмою EWENT Erasmus Mundus.

Автор 40 праць, зокрема двох навчальних посібників, комплексу лекцій та понад 20 методичних розробок. Напрям наукової діяльності – нетрадиційні та відновлювані джерела енергії, зокрема вітроенергетика.



ISBN 978-966-941-404-5



9 789669 414045 >