МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут
Кафедра суднового машинобудування та енергетики

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсового проєкту з дисципліни

«ТЕОРІЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ АЛЬТЕРНАТИВНИХ І ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК»

для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
спеціальності G11 «Машинобудування»
(спеціалізація G11.02 «Двигуни та енергетичні установки»)
освітньо-професійної програми
«Альтернативні та відновлювальні енергоустановки»
денної та заочної форм навчання

Херсон – 2026

Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни «Теорія робочих процесів альтернативних і відновлювальних енергоустановок» / уклад. Андрєєв А.А. – Херсон : ХННІ НУК, 2026. – 45 с.

Укладач: *Андрєєв А.А*. – доцент кафедри теплотехніки Херсонського навчально-наукового інституту НУК, к.т.н., доцент.

Рецензент: *Димо Б.В*. – професор кафедри суднового машинобудування та енергетики Херсонського навчально-наукового інституту НУК, к.т.н., професор.

Розглянуто та схвалено на засіданні кафедри суднового машинобудування та енергетики, протокол № 01 від «24» серпня 2026 р.

Завідувач кафедри СМЕ, к.т.н., професор НУК _____ *А.А. Андреєв*

Затверджено методичною радою ХННІ НУК, протокол № 1 від «26» серпня 2026 р.

Анотація. Наведено мету, тематику та варіанти завдань, а також структуру й обсяг курсового проєкту з дисципліни «Теорія робочих процесів альтернативних і відновлювальних енергоустановок». Подано методики розрахунку робочих процесів вітрових, фотоелектричних, сонячних теплових, мікро- і міні-гідроелектричних, біогазових когенераційних та геотермальних енергоустановок, а також наскрізний приклад розрахунку вітроенергетичної установки. Викладено вимоги до оформлення пояснювальної записки та графічної частини, а також порядок захисту й критерії оцінювання.

© *Андрєєв А.А*., 2026

© ХННІ НУК, 2026

ЗМІСТ

Вступ 4
1. Загальні положення 7
2. Тематика та варіанти завдань 9
3. Структура та зміст пояснювальної записки 13
4. Методика розрахунку робочих процесів 16
4.1. Загальні енергетичні, економічні та екологічні показники 16
4.2. Вітроенергетична установка (варіанти 1–5) 18
4.3. Фотоелектрична станція (варіанти 6–10) 20
4.4. Сонячна теплова установка гарячого водопостачання (варіанти 11–15) 22
4.5. Міні-ГЕС (варіанти 16–20) 24
4.6. Біогазова когенераційна установка (варіанти 21–25) 25
4.7. Геотермальна установка з органічним циклом Ренкіна (варіанти 26–30) 27
4.8. Наскрізний приклад: розрахунок ВЕУ з діаметром ротора 60 м 29
5. Графічна частина 33
6. Вимоги до оформлення пояснювальної записки 35
7. Захист курсового проєкту та критерії оцінювання 37
8. Рекомендовані джерела інформації 40
Додатки 42
Додаток А. Зразок титульного аркуша 42
Додаток Б. Бланк завдання на курсовий проєкт 43
Додаток В. Довідкові дані 44
Додаток Г. Приклад таблиці режимів роботи (для ВЕУ з підрозділу 4.8) .. 45

Вступ

Курсовий проєкт з дисципліни «Теорія робочих процесів альтернативних і відновлювальних енергоустановок» – це розрахунок характеристик відновлювальної енергоустановки, побудова її структурної схеми та визначення її параметрів. Він виконується в 1-му семестрі (Модуль 2 робочої програми, 45 годин самостійної роботи) і є умовою для допуску до екзамену.

За прогнозом Міжнародного енергетичного агентства (International Energy Agency, IEA), частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у світовому виробництві електроенергії до 2030 р. досягне майже 50 %. Потенціал України оцінюють приблизно в 180 ГВт для вітроенергетики та 39 ГВт для сонячної енергетики. Отже, інженеру-енергетику потрібно вміти кількісно описувати робочі процеси таких установок і обґрунтовувати їхні параметри.

Мета курсового проєкту – систематизувати й закріпити знання про фізичні принципи та математичні моделі перетворення енергії в альтернативних енергоустановках і набути навичок самостійного інженерного розрахунку конкретної установки.

Завдання курсового проєкту:

- проаналізувати установку-прототип і ресурс ВДЕ в районі розміщення;
- побудувати структурну схему установки з ланцюгом перетворення енергії;
- розрахувати робочі процеси, потужність, енергетичний (тепловий) баланс, ККД та КВТ установки;
- оцінити економічну ефективність і екологічні переваги установки;
- запропонувати заходи для підвищення ефективності її роботи;
- оформити пояснювальну записку та графічну частину і захистити проєкт перед комісією.

Компетентності, які формує курсовий проєкт (за робочою програмою)

Інтегральна компетентність:

ІК 01. Здатність розв’язувати задачі дослідницького та/або інноваційного характеру у сфері енергетичного машинобудування.

Загальні компетентності (ЗК):

ЗК 04. Здатність розробляти проєкти та управляти ними.

Спеціальні компетентності (СК):

СК 01. Здатність застосовувати спеціалізовані концептуальні знання, що включають сучасні наукові здобутки в сфері енергетичного машинобудування;

СК 03. Здатність аналізувати та комплексно інтегрувати сучасні знання з природничих, інженерних, суспільно-економічних та інших наук для розв’язання складних задач і проблем, пов’язаних з проєктуванням та експлуатацією енергетичного і теплотехнологічного обладнання;

СК 04. Здатність аналізувати, оцінювати та застосовувати науково-технічну інформацію в галузі енергетичного машинобудування;

СК 06. Здатність проєктувати та експлуатувати енергетичне і теплотехнологічне обладнання.

Очікувані результати навчання:

РН 1. Застосовувати спеціалізовані концептуальні знання, що включають сучасні наукові здобутки, а також критичне осмислення сучасних проблем у галузі енергетичного машинобудування для розв’язування складних задач професійної діяльності;

РН 3. Формулювати і розв’язувати складні інженерні, виробничі та/або дослідницькі задачі під час проектування, виготовлення і експлуатації енергетичного обладнання та створення конкурентоспроможних розробок, втілення результатів у інноваційних проектах;

РН 4. Розробляти і реалізовувати проєкти у галузі енергетичного машинобудування та пов’язані з нею міждисциплінарні проєкти з

урахуванням технічних, економічних, правових, соціальних та екологічних аспектів;

РН 6. Використовувати методи моделювання, а також методи експериментальних досліджень з метою детального вивчення тепло- і масообмінних, гідравлічних та інших процесів, які відбуваються в технологічному обладнанні та об’єктах енергетичного машинобудування;

РН 7. Приймати ефективні рішення з інженерних та управлінських питань у галузі енергетичного машинобудування в складних і непередбачуваних умовах, у тому числі із застосуванням сучасних методів та засобів оптимізації, прогнозування та прийняття рішень;

РН 8. Розробляти, обирати та застосовувати ефективні розрахункові методи розв’язання складних задач енергетичного машинобудування;

РН 9. Формулювати та вирішувати інноваційні задачі галузі енергетичного машинобудування з урахуванням вимог до результатів, технічних стандартів, а також нетехнічних (суспільство, здоров'я і безпека, інтелектуальна власність, навколишнє середовище, економіка і виробництво) аспектів;

РН 10. Вільно спілкуватися державною та іноземною мовами усно і письмово для обговорення професійних проблем і результатів досліджень та інновацій;

РН 11. Презентувати результати досліджень та інновацій, зрозуміло і недвозначно доносити власні знання, висновки та аргументацію до фахівців і нефахівців.

1. Загальні положення

Курсовий проєкт виконують за індивідуальним завданням під керівництвом науково-педагогічного працівника (НПП) кафедри СМЕ упродовж 1-го семестру; на його виконання передбачено 45 годин самостійної роботи. Захищений курсовий проєкт і не менше ніж 60 балів поточного контролю дають право складати екзамен.

Завдання. Керівник видає завдання на 1–2-му тижні семестру на бланку встановленої форми (додаток Б). У бланку зазначають тему, вихідні дані, склад, обсяг і терміни виконання. Бланк підписують виконавець, керівник і завідувач кафедри; оригінал зберігається в керівника до захисту.

Вибір варіанта. Номер варіанта дорівнює порядковому номеру ЗВО в академічній групі (таблиці розділу 2). Тему може запропонувати і сам ЗВО (за наявності власних матеріалів, наприклад, з місця праці) або НПП кафедри; у всіх випадках її погоджують з керівником і завідувачем кафедри.

Консультації та контроль. Консультації проводяться за розкладом кафедри. На кожному контрольному тижні ЗВО подає керівнику виконану частину роботи (табл. 1.1). Систематичність і вчасність виконання враховуються під час оцінювання пояснювальної записки (розділ 7). Завершений проєкт подають на перевірку не пізніше ніж за 7 днів до захисту.

Таблиця 1.1 – Графік виконання курсового проєкту

Етап	Зміст етапу	Тиждень семестру	Самостійна робота, год	Готовність, %
1	Вибір і обґрунтування теми та вихідних даних, отримання завдання	1–2	3	5
2	Аналітичний опис робочих процесів, опис установки-прототипу (розділ 1 записки)	3–5	8	20
3	Побудова структурної схеми установки (розділ 2)	6–7	8	35
4	Розрахунок потужності, енергетичного (теплового) балансу, ККД і КВТ (підрозділи 3.1–3.4)	8–11	12	65
5	Економічна ефективність, екологічні переваги, заходи підвищення ефективності (підрозділи 3.5–3.6)	12	5	75
6	Оформлення пояснювальної записки і графічної частини, подання на перевірку	13–14	7	100
7	Захист проєкту перед комісією	15–16	2	—
	Разом		**45**	

Академічна доброчесність. Проєкт виконують самостійно, українською мовою (за погодженням із завідувачем кафедри — англійською). Текст, рисунки, таблиці та дані з інших джерел наводяться лише з посиланням. Розрахунки, виконані за допомогою програмних засобів, супроводжуються поясненням методики та перевіркою щонайменше одного режиму вручну.

2. Тематика та варіанти завдань

Завдання охоплюють шість типів енергоустановок — по п’ять варіантів на кожен (табл. 2.1). У бланку завдання тему записують за зразком із таблиці, підставляючи параметри свого варіанта. Вихідні дані наведено в табл. 2.2–2.7; керівник може змінювати окремі величини для індивідуалізації завдання.

Таблиця 2.1 – Типи енергоустановок і теми курсових проєктів

Варіанти	**Тип енергоустановки**	**Зразок формулювання теми**	**Вихідні дані**
1–5	Вітроенергетична установка (ВЕУ) з горизонтальною віссю обертання	«Розрахунок робочих процесів і характеристик мережевої вітроенергетичної установки з діаметром ротора … м»	табл. 2.2
6–10	Мережева фотоелектрична станція (ФЕС)	«Розрахунок робочих процесів і характеристик мережевої фотоелектричної станції потужністю … кВт (пік.) у м. …»	табл. 2.3
11–15	Сонячна теплова установка гарячого водопостачання (СТУ)	«Розрахунок сонячної теплової установки гарячого водопостачання … (об’єкт) у м. …»	табл. 2.4
16–20	Мікро- або міні-ГЕС	«Розрахунок робочих процесів і характеристик міні-ГЕС з напором … м»	табл. 2.5
21–25	Біогазова когенераційна установка (БГУ)	«Розрахунок біогазової когенераційної установки на … (сировина)»	табл. 2.6
26–30	Геотермальна бінарна установка з органічним циклом Ренкіна (ORC)	«Розрахунок геотермальної енергоустановки з органічним циклом Ренкіна на робочому тілі …»	табл. 2.7

Ініціативні теми (за погодженням із керівником; вихідні дані формує керівник):

– автономна гібридна система «ВЕУ + ФЕС + акумуляторна батарея + дизель-генератор»;

– суднова гібридна енергоустановка з фотоелектричними модулями та акумуляторними батареями;

– теплонасосна установка теплопостачання з ґрунтовим або водяним джерелом теплоти;

– система «електролізер – сховище водню – паливний елемент» для акумулювання енергії ВДЕ;

– фотоелектрична станція із системою накопичення енергії (СНЕ);

– вітрова установка малої потужності з вертикальною віссю для автономного споживача.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані для ВЕУ (варіанти 1–5)

Варіант	D, м	H, м	$\bar{v}_{10}$, м/с	k	α	vвкл / vном / vвимк, м/с	λопт	C_p max	t, °C
1	40	50	5,0	2,0	0,14	3 / 11,5 / 25	7,0	0,44	9
2	52	60	5,4	2,1	0,16	3 / 12 / 25	7,5	0,45	10
3	70	80	5,8	2,2	0,14	3,5 / 12 / 25	8,0	0,46	11
4	82	90	6,2	2,0	0,12	3 / 11 / 22	8,0	0,47	9
5	100	100	6,6	2,3	0,12	3 / 11 / 25	8,5	0,48	10

Загальні дані: D — діаметр ротора; H — висота осі ротора; $\bar{v}_{10}$ — середньорічна швидкість вітру на висоті флюгера 10 м; k — параметр форми розподілу Вейбулла; α — показник степеневого закону зміни швидкості з висотою; число лопатей z = 3; ККД редуктора $\eta_{ред}$ = 0,97, генератора $\eta_{ген}$ = 0,96, перетворювача частоти $\eta_{пер}$ = 0,97; номінальна частота обертання генератора $n_{ген}$ = 1500 $хв^{-1}$; коефіцієнт технічної готовності Ктг = 0,95; атмосферний тиск p = 101,3 кПа.

Таблиця 2.3 – Вихідні дані для ФЕС (варіанти 6–10)

Варіант	Місце розташування	Рпік, кВт	Кут нахилу β, °	Азимут γ, °	Тип монтажу
6	Херсон	30	35	0	покрівля, фіксований
7	Одеса	50	30	−15	покрівля, фіксований
8	Миколаїв	100	35	0	наземний, фіксований
9	Дніпро	150	35	+10	наземний, фіксований
10	Київ	75	35	0	покрівля, фіксований

Загальні дані: монокристалічний модуль $P_{СТУ}$ = 450 Вт, $\eta_{СТУ}$ = 21,0 %, Vмп = 41,5 В, Імп = 10,85 А, Vхх = 49,5 В, Ікз = 11,5 А, температурний коефіцієнт потужності γ_P = −0,35 %/К, напруги β_V = −0,27 %/К, $N_{ОСТ}$ = 45 °C;

європейський ККД інвертора 97,5 %. Місячне надходження сонячної радіації та температуру повітря для місця розташування беруть з бази даних PVGIS (див. розділ 8). СТУ — стандартні умови випробувань (1000 Вт/м², 25 °С, АМ 1,5).

Таблиця 2.4 – Вихідні дані для СТУ (варіанти 11–15)

Варіант	**Об'єкт**	**$V_{гвп}$, м³/добу**	**$t_г$ / $t_х$, °С**	**Місто**	**Період роботи**	**Тип колектора**
11	Житловий будинок	1,2	55 / 10	Херсон	квітень–вересень	плоский
12	Готель	3,0	55 / 12	Одеса	травень–вересень	плоский
13	Санаторій	5,0	60 / 12	Миколаїв	квітень–жовтень	вакуумний трубчастий
14	Гуртожиток	4,0	55 / 10	Київ	цілорічно	вакуумний трубчастий
15	Спортивний комплекс	8,0	50 / 10	Дніпро	квітень–вересень	плоский

Загальні дані: характеристики колекторів за ISO 9806:2017 (на площу апертури): плоский — η_0 = 0,78; a_1 = 3,6 Вт/(м²·К); a_2 = 0,015 Вт/(м²·К²); вакуумний — η_0 = 0,65; a_1 = 1,2 Вт/(м²·К); a_2 = 0,008 Вт/(м²·К²). Розрахункова частка сонячного теплопостачання за період роботи f = 0,6; додаткове джерело теплоти — газовий котел ($\eta_к$ = 0,92).

Таблиця 2.5 – Вихідні дані для міні-ГЕС (варіанти 16–20)

Варіант	**Схема ГЕС**	**$H_г$, м**	**$Q_р$, м³/с**	**L, м**	**$Q_{мін}$ / $Q_р$**
16	греблева	6	5,0	30	0,30
17	греблева	12	3,0	60	0,30
18	деривaційна	25	1,6	250	0,25
19	деривaційна	45	0,9	420	0,20
20	деривaційна	80	0,4	700	0,15

Загальні дані: Нг — статичний (геодезичний) напір; $Q_р$ — розрахункова витрата турбіни; L — довжина напірного водоводу; $Q_{мін}$ — мінімальна витрата, за якої турбіна ще працює. Умовний гідрограф для навчальних розрахунків — відношення середньомісячної природної витрати до $Q_р$ за місяцями (січень–грудень): 0,55; 0,60; 1,30; 1,70; 1,20; 0,85; 0,60; 0,45; 0,45; 0,55; 0,65; 0,60. Екологічний (санітарний) попуск — 0,1$Q_р$; ККД генератора $\eta_{ген}$ = 0,95, трансформатора $\eta_{тр}$ = 0,98.

Таблиця 2.6 – Вихідні дані для БГУ (варіанти 21–25)

Варіант	Сировина	m, т/добу	СР, %	ОСР, % від СР	у, м³/кг ОСР	CH_4, %	Режим, tр, °С	HRT, діб
21	Гній ВРХ	60	9	80	0,30	57	мезофільний, 38	30
22	Свинячий гній	80	6	80	0,40	62	мезофільний, 38	22
23	Курячий послід (розбавлений)	25	15	75	0,35	60	мезофільний, 38	35
24	Силос кукурудзи	20	33	95	0,60	52	мезофільний, 40	90
25	Харчові відходи (розбавлені)	30	10	90	0,55	60	термофільний, 52	30

Загальні дані: СР — сухі речовини; ОСР — органічні сухі речовини; у — питомий вихід біогазу (нормальні умови); HRT — гідравлічний час перебування сировини в реакторі; температура вихідної сировини 10 °С; газопоршнева установка (ГПУ) з номінальними ККД $\eta_{ел}$ = 0,40, $\eta_т$ = 0,44; нижча теплота згоряння метану 35,8 МДж/м³; власні електричні потреби 7 % виробленої електроенергії; тепловтрати реактора — 15 % від теплоти на нагрівання сировини.

Таблиця 2.7 – Вихідні дані для геотермальної ORC-установки (варіанти 26–30)

Варіант	$m_г$, кг/с	$t_{вх}$, °С	$t_{вих}$ мін, °С	Робоче тіло	$t_{ох}$, °С	Конденсатор
26	30	105	70	R245fa	15	водяний
27	40	115	70	ізобутан (R600a)	20	повітряний
28	50	125	75	ізопентан (R601a)	15	водяний
29	25	100	65	R134a	12	водяний
30	60	140	80	н-пентан (R601)	20	повітряний

Загальні дані: mг — витрата геотермального теплоносія (теплоємність $c_р$ = 4,2 кДж/(кг·К)); tвих мін — мінімальна допустима температура закачування; tох — температура охолоджувального середовища; мінімальний температурний напір (pinch) у випарнику 8 К, у конденсаторі 5 К (водяний) або 10 К (повітряний); внутрішній ККД турбіни $\eta_{т,s}$ = 0,82; ККД насоса $\eta_н$ = 0,75; ККД генератора $\eta_{ген}$ = 0,96; власні потреби (насоси свердловин, вентилятори та ін.) — 6 % для водяного і 10 % для повітряного конденсатора від потужності генератора.

3. Структура та зміст пояснювальної записки

Курсовий проєкт складається з розрахунково-пояснювальної записки обсягом 20–40 сторінок формату А4 та графічної частини на одному аркуші формату А1. Порядок розділів відповідає бланку завдання (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Структура пояснювальної записки та орієнтовний обсяг

Структурний елемент	Обсяг, сторінок
Титульний аркуш (додаток А)	1
Завдання на курсовий проєкт (додаток Б)	1 (двобічно)
Анотація українською та англійською мовами	1
Зміст	1
Перелік прийнятих скорочень і умовних позначень	1
Вступ	1–2
Розділ 1. Опис установки-прототипу	5–7
Розділ 2. Побудова структурної схеми установки	4–6
Розділ 3. Визначення ККД та КВТ установки	10–16
Розділ 4. Графічна частина	1–2
Висновки	1–2
Список використаних джерел (не менше 10 найменувань)	1–2
Додатки (розрахункові таблиці, лістинги програм, паспортні дані обладнання)	за потреби

Анотація (5–7 рядків кожною мовою) містить об’єкт розрахунку, мету, застосовані методи та основні числові результати (потужність, ККД, КВТ, річне виробництво), а також обсяг записки й ключові слова.

Вступ обґрунтовує актуальність теми для України та регіону розташування, формулює мету, 3–5 завдань, об’єкт (робочі процеси установки) і предмет (залежність енергетичних показників від параметрів установки та ресурсу) дослідження.

Розділ 1. Опис установки-прототипу. Рекомендовані підрозділи:

1. Призначення, принцип дії та класифікація установок заданого типу.
2. Характеристика ресурсу ВДЕ в районі розташування: вітровий режим, надходження сонячної радіації, гідрологічні дані, сировинна база або параметри геотермального джерела.
3. Опис установки-прототипу — серійної моделі, близької за параметрами до завдання (виробник, конструкція, технічні характеристики) та порівняння з 2–3 аналогами в таблиці.

4. Фізичні основи та аналітичний опис робочих процесів: основні рівняння, теоретичні границі ефективності (межа Бетца, межа Шоклі – Квейссера, ККД циклу Карно тощо), фактори впливу.
5. Висновки до розділу: обґрунтування типу та основних параметрів установки.

Розділ 2. Побудова структурної схеми установки. Рекомендовані підрозділи:

1. Склад основного та допоміжного обладнання з функціями кожного елемента.
2. Структурна схема перетворення енергії: блоки, напрямки потоків енергії та речовини, місця втрат, точки вимірювання параметрів.
3. Режими роботи установки (пуск, часткове навантаження, номінальний, обмеження потужності, зупинка, аварійний) з умовами переходу — у вигляді таблиці режимів.
4. Система керування та захисту: основні контури регулювання (кут встановлення лопатей і орієнтація гондоли, MPPT, температура реактора, витрата теплоносія тощо).

Розділ 3. Визначення ККД та КВТ установки — основна розрахункова частина (методика — у розділі 4 цих вказівок). Рекомендовані підрозділи:

1. Вихідні дані та прийняті допущення.
2. Розрахунок робочого процесу і основних параметрів (потужність, частота обертання, витрати, температури, тиски).
3. Енергетичний (тепловий) баланс на номінальному режимі та діаграма Сенкі.
4. ККД, КВТ і річні показники (річне виробництво енергії, коефіцієнт використання встановленої потужності).
5. Техніко-економічні та екологічні показники.
6. Заходи щодо підвищення ефективності роботи установки з кількісною оцінкою ефекту хоча б одного заходу.

Розділ 4. Графічна частина — короткий опис складу аркуша А1 із посиланнями на розрахунки, з яких побудовано кожне зображення (розділ 5 цих вказівок).

Висновки подають окремими абзацами з конкретними числами: потужність, ККД на номінальному режимі, КВТ, річне виробництво, собівартість енергії, термін окупності, скорочення викидів CO_2 і ефект запропонованих заходів. Висновки мають відповідати на завдання, поставлені у вступі.

4. Методика розрахунку робочих процесів

Розрахунок для будь-якого типу установки виконують за однією логікою: ресурс → робочий процес і номінальна потужність → енергетичний баланс і ККД → річне виробництво, КВТ і КВВП → економіка та екологія. Підрозділ 4.1 містить спільні для всіх варіантів співвідношення, підрозділи 4.2–4.7 — особливості кожного типу, підрозділ 4.8 — наскрізний числовий приклад.

4.1. Загальні енергетичні, економічні та екологічні показники

Енергетичний баланс. Первинна потужність джерела, що надходить до установки, дорівнює сумі корисної потужності та втрат у всіх елементах структурної схеми:

$$P_{\text{перв}} = P_{\text{кор}} + \sum_{i=1}^{m} \Delta P_i \qquad (4.1)$$

Баланс подають таблицею (кВт і % від Рперв) та діаграмою Сенкі; нев’язка балансу не повинна перевищувати 0,5 %.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) характеризує досконаліть перетворення енергії на конкретному (здебільшого номінальному) режимі. Для послідовного ланцюга перетворень він дорівнює добутку ККД ланок:

$$\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{перв}}} = \prod_{i=1}^{m} \eta_i \qquad (4.2)$$

Коефіцієнт використання теплоти (енергії первинного джерела), КВТ, — інтегральний показник за період (рік або сезон). Він враховує часткові режими, простої, власні потреби та корисно використану теплоту:

$$K_{\text{ВТ}} = \frac{E_{\text{ел}} + Q_{\text{т.кор}}}{E_{\text{перв}}} \qquad (4.3)$$

де Еел — відпущена споживачу електроенергія, кВт·год; Qт.кор — корисно використана теплота, кВт·год; Еперв — енергія первинного джерела за той самий період, кВт·год. Для БГУ Еперв — теплота згоряння біогазу; для СТУ і ФЕС — сонячна радіація на площу колекторів (модулів); для ВЕУ — кінетична енергія вітрового потоку через площу ометання; для ГЕС —

потенціальна енергія води на статичному напорі; для геотермальної установки — теплота теплоносія відносно температури навколишнього середовища. Вибране визначення Еперв обов'язково зазначають у записці.

Коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) і число годин використання встановленої потужності:

$$K_{\text{ВВП}} = \frac{E_{\text{рік}}}{8760\, P_{\text{ном}}},$$

$$T_{\text{вик}} = \frac{E_{\text{рік}}}{P_{\text{ном}}} \tag{4.4}$$

Економічні показники. Капітальні витрати K = куд·Рном, де куд — питомі капітальні витрати (табл. 4.1). Щорічні експлуатаційні витрати Ве = b·K, де b = 0,01–0,04. Усереднена собівартість енергії (LCOE), простий термін окупності та чиста приведена вартість:

$$\text{CRF} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \tag{4.5}$$

$$\text{LCOE} = \frac{K \cdot \text{CRF} + B_{\text{е}} + B_{\text{п}}}{E_{\text{рік}}} \tag{4.6}$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{D - B_{\text{е}} - B_{\text{п}}},$$

$$\text{NPV} = -K + \sum_{t=1}^{n} \frac{D - B_{\text{е}} - B_{\text{п}}}{(1+r)^t} \tag{4.7}$$

де r — ставка дисконтування (рекомендовано 0,08–0,12); n — розрахунковий термін служби, років; Вп — витрати на паливо чи сировину (для БГУ); D = Ерік·Це + Qрік·Цт — річний дохід від продажу (або заощадження) електроенергії та теплоти. Ціни енергії, куд, r і n погоджують із керівником; валюту розрахунку зазначають явно.

Таблиця 4.1 – Середньозважені світові показники ВДЕ-установок для об'єктів, введених у 2024 р. (IRENA, 2025)

Технологія	**куд, дол. США/кВт**	**КВВП, %**	**LCOE, дол. США/(кВт·год)**
Фотоелектричні станції	691	17	0,043
Наземні вітрові електростанції	1041	34	0,034
Гідроелектростанції	2267	48	0,057
Біоенергетичні установки	3242	73	0,087
Геотермальні електростанції	4015	88	0,060

Це світові середні значення для великих об'єктів; для європейських проєктів і малих установок питомі витрати, як правило, вищі. СТУ до звіту не входять: їхню вартість визначають за комерційними пропозиціями на обладнання.

Екологічний ефект оцінюють скороченням викидів CO_2 від заміщення мережевої електроенергії та теплоти від газового котла:

$$\Delta M_{CO_2} = E_{ел}\, k^{ел}_{CO_2} + \frac{Q_{т.кор}}{\eta_к}\, k^{пал}_{CO_2} \tag{4.8}$$

де kел — коефіцієнт викидів енергосистеми України, т CO_2/(МВт·год). За даними дослідження DiXi Group для 2020–2023 рр., маржинальний коефіцієнт становить приблизно 1,06–1,29 т CO_2/(МВт·год), середній — 0,28–0,38 т CO_2/(МВт·год). Для оцінки заміщення генерації ВДЕ рекомендовано маржинальний коефіцієнт; конкретне значення встановлює керівник. kпал — коефіцієнт викидів природного газу, 56,1 т CO_2/ТДж (≈ 0,202 кг CO_2 на 1 кВт·год теплоти палива, керівництво IPCC 2006); ηк — ККД котла, що заміщується.

4.2. Вітроенергетична установка (варіанти 1–5)

Потужність ВЕУ пропорційна кубу швидкості вітру, тому розрахунок починають з перерахунку вітрового режиму на висоту осі ротора і його статистичного опису.

1. Швидкість вітру на висоті осі ротора (степеневий закон Геллмана):

$$\bar{v}_H = \bar{v}_{10} \left(\frac{H}{10}\right)^{\alpha} \tag{4.9}$$

де α ≈ 0,10–0,12 для водної поверхні та узбережжя, 0,14 (≈ 1/7) для відкритої рівнинної місцевості, 0,16–0,20 для місцевості з лісосмугами та рідкою забудовою.

2. Розподіл швидкостей вітру Вейбулла. Щільність імовірності, функція розподілу та параметр масштабу c, м/с:

$$f(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k},$$

$$F(v) = 1 - e^{-(v/c)^k},$$

$$c = \frac{\bar{v}_H}{\Gamma(1+1/k)} \tag{4.10}$$

де Γ — гамма-функція (у Excel — `=EXP(GAMMALN(x))`); за k = 2 розподіл Вейбулла переходить у розподіл Релея.

3. Густина повітря та питома потужність вітрового потоку:

$$\rho = \frac{p}{R\,T},$$

$$\frac{\bar{N}_{\text{в}}}{A} = \frac{1}{2}\rho\, c^3\, \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \tag{4.11}$$

де R = 287 Дж/(кг·К); A = πD²/4 — площа ометання ротора, м².

4. Потужність ВЕУ та межа Бетца. За теорією ідеального вітряка коефіцієнт потужності $C_p = 4a(1 - a)^2$, де a — коефіцієнт гальмування потоку; максимум досягається за a = 1/3:

$$P_{\text{ел}} = \frac{1}{2}\rho A v^3\, C_p\, \eta_{\text{ред}}\, \eta_{\text{ген}}\, \eta_{\text{пер}},$$

$$C_p \le C_{p,\text{Бетц}} = \frac{16}{27} \approx 0{,}593 \tag{4.12}$$

Для сучасних трилопатевих роторів C_p max = 0,44–0,50 за безрозмірної швидкості кінця лопаті λопт = 6–9. Номінальну потужність Рном визначають за (4.12) при v = vном і $C_p = C_p$ max.

5. Кінематика ротора і трансмісії. Частота обертання ротора, об/хв, передаточне число редуктора та крутний момент на валу ротора:

$$n_{\text{р}} = \frac{60\,\lambda\, v}{\pi D},$$

$$i = \frac{n_{\text{ген}}}{n_{\text{р}}},$$

$$M_{\text{р}} = \frac{P_{\text{р}}}{\omega_{\text{р}}} = \frac{30\,P_{\text{р}}}{\pi\, n_{\text{р}}} \tag{4.13}$$

Колова швидкість кінця лопаті u = λv за умовами шуму та ерозії не повинна перевищувати приблизно 80–90 м/с.

6. Потужнісна характеристика (спрощена модель ВЕУ зі змінною частотою обертання та регулюванням кута лопатей):

$$P(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{\text{вкл}} \text{ або } v > v_{\text{вимк}} \\ 1/2\,\rho A v^3 C_{p\max}\,\eta_{\text{ред}}\eta_{\text{ген}}\eta_{\text{пер}}, & v_{\text{вкл}} \le v < v_{\text{ном}} \\ P_{\text{ном}}, & v_{\text{ном}} \le v \le v_{\text{вимк}} \end{cases} \quad (4.14)$$

7. Річне виробництво електроенергії визначають методом інтервалів (bin-метод) з кроком Δv = 1 м/с:

$$E_{\text{рік}} = K_{\text{тг}} \cdot 8760 \sum_j P\left(v_j\right)\left[F\left(v_j + \Delta v/2\right) - F\left(v_j - \Delta v/2\right)\right] \quad (4.15)$$

8. ККД і КВТ. ККД на номінальному режимі ηВЕУ = C_p·ηред·ηген·ηпер. КВТ для ВЕУ — відношення річного виробництва до річної енергії вітрового потоку через площу ометання:

$$K_{\text{ВТ}} = \frac{E_{\text{рік}}}{E_{\text{в}}},$$

$$E_{\text{в}} = 8760\,A\,\frac{\bar{N}_{\text{в}}}{A} \quad (4.16)$$

9. Енергетичний баланс на номінальному режимі містить: потужність вітрового потоку ½ρAv³; кінетичну енергію, що залишається в потоці за ротором (1 − 16/27); аеродинамічні втрати ротора (16/27 − C_p); втрати в редукторі, генераторі та перетворювачі; корисну електричну потужність.

Для поглибленого аналізу (за бажанням) застосовують метод елемента лопаті (BEM) з коефіцієнтами підйомної сили та опору профілю, отриманими в лабораторній роботі № 5, або за даними [5].

4.3. Фотоелектрична станція (варіанти 6–10)

Виробництво ФЕС визначається надходженням радіації на площину модулів і температурою фотоелементів; розрахунок виконують помісячно.

1. Радіація на нахилену поверхню. Середньомісячні значення HT беруть з PVGIS для заданих β і γ або обчислюють за ізотропною моделлю Ліу – Джордана:

$$H_T = H_b R_b + H_d\,\frac{1+\cos\beta}{2} + H\rho_g\,\frac{1-\cos\beta}{2} \quad (4.17)$$

де H, H_b, H_d — сумарна, пряма та розсіяна радіація на горизонтальну поверхню; R_b — геометричний коефіцієнт прямої радіації; ρg ≈ 0,2 — альбедо поверхні землі [12].

2. Температура модуля та його потужність за фактичного опромінення G, Вт/м²:

$$T_c = T_a + \frac{\text{NOCT}-20}{800}\, G,$$

$$P_{\text{м}} = P_{\text{СТУ}}\, \frac{G}{1000}\,[1 + \gamma_P\,(T_c - 25)] \qquad (4.18)$$

3. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) за однодіодною моделлю та коефіцієнт заповнення:

$$I = I_{\text{ф}} - I_0\left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{nN_sV_T}\right) - 1\right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}},$$

$$FF = \frac{V_{\text{мп}} I_{\text{мп}}}{V_{\text{хх}} I_{\text{кз}}} \qquad (4.19)$$

де V_T = kT/q — тепловий потенціал; N_s — кількість послідовно з'єднаних елементів модуля. ВАХ і P–V-характеристики будують для G = 200, 600, 1000 Вт/м² і показують точку максимальної потужності (робота MPPT-контролера — лабораторна робота № 3).

4. Конфігурація масиву. Загальна кількість модулів N = Рпік/РСТУ. Кількість модулів у рядку $N_{\text{ряд}}$ добирають за діапазоном напруг інвертора з урахуванням температурної залежності V(T) = $V_{\text{СТУ}}$[1 + βV(T − 25)]:

$$N_{\text{ряд}}\, V_{\text{хх}}(T_{\min}) \le U_{\text{інв}}^{\max},$$

$$N_{\text{ряд}}\, V_{\text{мп}}\left(T_{c,\max}\right) \ge U_{\text{MPPT}}^{\min} \qquad (4.20)$$

де T_{min} — мінімальна температура повітря в світлий час (зазвичай −20…−25 °C), $T_{c,max}$ — максимальна температура модуля (65–70 °C). Кількість паралельних рядків перевіряють за допустимим струмом входу MPPT. Параметри інвертора беруть з паспортних даних обраної моделі.

5. Місячне та річне виробництво через коефіцієнт продуктивності (performance ratio) PR:

$$E_{\text{м}} = P_{\text{пік}}\, \frac{H_{T,\text{м}}}{G_{\text{СТУ}}}\, PR_{\text{м}},$$

$$PR = k_t\,\eta_{\text{інв}}(1 - L_{dc})(1 - L_{ac})\big(1 - L_{\text{забр}}\big)(1 - L_{\text{нев}}) \qquad (4.21)$$

де GCTУ = 1 кВт/м²; $k_t = 1 + \gamma P(T_{с,м} - 25)$ — температурний коефіцієнт місяця; $L_{dc} \approx 0{,}015$ і $L_{ac} \approx 0{,}01$ — втрати в кабелях; $L_{\text{забр}} \approx 0{,}02$ — втрати від забруднення; $L_{\text{нев}} \approx 0{,}02$ — втрати від невідповідності модулів. Результат порівнюють із розрахунком PVGIS (розбіжність понад 10 % пояснюють).

6. ККД і КВТ. ККД на номінальному режимі (СТУ) $\eta = \eta\text{СТУ}\cdot\eta\text{інв}\cdot(1 - L_{dc})(1 - L_{ac})$. КВТ — річний ККД системи відносно радіації на сумарну площу модулів $A_\Sigma = N\cdot A_м$:

$$K_{\text{ВТ}} = \frac{E_{\text{рік}}}{H_{T,\text{рік}}\,A_\Sigma} \qquad (4.22)$$

7. Енергетичний баланс за рік: радіація на площу модулів → втрати фотоперетворення $(1 - \eta\text{СТУ})$ → температурні втрати → втрати від забруднення і невідповідності → втрати в кабелях DC → втрати в інверторі → втрати AC → електроенергія, відпущена в мережу.

4.4. Сонячна теплова установка гарячого водопостачання (варіанти 11–15)

Площу колекторів добирають так, щоб за період роботи частка сонячного теплопостачання f дорівнювала заданій; розрахунок виконують помісячно.

1. Теплове навантаження ГВП, кВт·год/добу (місячне $L_м = Q_{\text{доб}}\cdot N_{\text{дн}}$):

$$Q_{\text{доб}} = \frac{\rho\,V_{\text{гвп}}\,c_p\,(t_г - t_х)}{3600} \qquad (4.23)$$

де $\rho \approx 1000$ кг/м³; $c_p = 4{,}19$ кДж/(кг·К); додатково враховують втрати в циркуляційному контурі (10–20 % від $Q_{\text{доб}}$).

2. ККД колектора за ISO 9806:2017 [17] та корисна потужність за рівнянням Хоттеля – Віллера – Блісса:

$$\eta_к = \eta_0 - a_1\frac{t_m - t_a}{G} - a_2\frac{(t_m - t_a)^2}{G},$$
$$Q_u = A\,F_R[G\,(\tau\alpha) - U_L(t_i - t_a)] \qquad (4.24)$$

де t_m — середня температура теплоносія; t_a — температура повітря; F_R — коефіцієнт відведення теплоти; $(\tau\alpha)$ — приведена поглинальна здатність; U_L — коефіцієнт тепловтрат. Наближено $F_R(\tau\alpha) \approx \eta_0$, $F_R\,U_L \approx a_1 + a_2(t_m - t_a)$. Характеристику $\eta к = f[(t_m - t_a)/G]$ будують графічно (лабораторна робота № 4).

3. Частка сонячного теплопостачання за методом f-діаграм (Бекман – Кляйн – Даффі [12]) для рідинних систем:

$$f_м = 1{,}029\,Y - 0{,}065\,X - 0{,}245\,Y^2 + 0{,}0018\,X^2 + 0{,}0215\,Y^3 \qquad (4.25)$$

$$X = \frac{AF_R U_L (T_{ref} - \bar{T}_a)\,\Delta t}{L_м},$$

$$Y = \frac{AF_R(\tau\alpha)\,\bar{H}_T\,N_{дн}}{L_м} \qquad (4.26)$$

де T_{ref} = 100 °C; Δt — тривалість місяця, с; $\bar{H}_T$ — середньодобова радіація на площину колектора; формула справедлива за $0 < Y < 3$ і $0 < X < 18$. Для систем ГВП X коригують множником $(11{,}6 + 1{,}18t_г + 3{,}86t_х - 2{,}32\bar{t}_a)/(100 - \bar{t}_a)$. Площу A знаходять підбором (Excel «Підбір параметра») з умови $\Sigma f_м L_м / \Sigma L_м = f$.

4. Бак-акумулятор і контур теплоносія: об’єм бака $V_б$ = (50–75 л/м²)·A; витрата теплоносія через колектори 0,01–0,02 кг/(с·м²); теплообмінник контуру розраховують за піковою потужністю Q_u за G = 900 Вт/м².

5. ККД і КВТ. ККД колектора на номінальному режимі визначають за G = 800 Вт/м² і $t_m - t_a$ = 30 К. КВТ — сезонний ККД системи:

$$K_{ВТ} = \frac{\sum_м f_м L_м}{A \sum_м H_{T,м}} \qquad (4.27)$$

6. Енергетичний баланс за сезон: радіація на колектори → оптичні втрати $(1 - \eta_0)$ → теплові втрати колекторів → втрати трубопроводів і бака → корисна теплота ГВП. Решта навантаження (1 − f)L покриває газовий котел; заощаджений газ $B = Q_{сол}/(\eta к \cdot Qн)$, де Qн — нижча теплота згоряння газу за паспортом якості (орієнтовно 33–34 МДж/м³).

4.5. Міні-ГЕС (варіанти 16–20)

Потужність ГЕС визначають витрата та напір нетто; річне виробництво залежить від гідрографа річки та характеристики турбіни на часткових режимах.

1. Діаметр водоводу та напір нетто. Діаметр d добирають за економічною швидкістю води 2–4 м/с із умови, що гідравлічні втрати не перевищують 5–10 % Нг:

$$H_{\text{н}} = H_{\text{г}} - h_w,$$

$$h_w = \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum\zeta\right)\frac{w^2}{2g},$$

$$w = \frac{4Q}{\pi d^2} \qquad (4.28)$$

Коефіцієнт гідравлічного тертя визначають за формулою Альтшуля $\lambda = 0{,}11(\Delta/d + 68/\text{Re})^{0{,}25}$, де Δ — еквівалентна шорсткість (сталеві труби 0,1–0,2 мм), Re = wd/ν. Для греблевих схем втрати в підвідній частині та на сміттєзатримних решітках враховують через Σζ.

2. Потужність ГЕС:

$$P = \rho\, g\, Q\, H_{\text{н}}\, \eta_{\text{т}}\, \eta_{\text{ген}}\, \eta_{\text{тр}} \qquad (4.29)$$

3. Вибір типу турбіни виконують за діаграмою застосування турбін «H–Q» і коефіцієнтом швидкохідності (n — об/хв, Рт — кВт, Нн — м):

$$n_s = \frac{n\sqrt{P_{\text{т}}}}{H_{\text{н}}^{5/4}} \qquad (4.30)$$

Орієнтовні діапазони n_s: ковшові (Пелтона) 4–35; радіально-осьові (Френсіса) 60–400; пропелерні та поворотно-лопатеві (Каплана) 300–1000. Для малих витрат і напорів 5–100 м розглядають також поперечно-струминні турбіни (Банкі). Синхронну частоту обертання генератора n = 3000/p (p — число пар полюсів) узгоджують з n_s; за необхідності застосовують мультиплікатор.

Таблиця 4.2 – Орієнтовний ККД гідротурбін малої потужності на часткових режимах (для навчальних розрахунків)

Тип турбіни	Q/Qp = 0,3	0,5	0,75	1,0
Поворотно-лопатева (Каплана) подвійного регулювання	0,80	0,88	0,91	0,90
Радіально-осьова (Френсіса)	0,65	0,82	0,91	0,90
Ковшова (Пелтона)	0,85	0,88	0,89	0,88
Поперечно-струминна (Банкі)	0,75	0,80	0,81	0,80

Проміжні значення визначають лінійною інтерполяцією; за наявності паспортної характеристики турбіни-прототипу використовують її.

4. Режими роботи та річне виробництво. Для кожного місяця витрата через турбіну $Q_{т,i} = \min(Q_p;\ K_i\ Q_p - Q_{ек})$; якщо $Q_{т,i} < Q_{мін}$, турбіну зупиняють. Напір нетто перераховують для фактичної витрати ($h_w \sim Q^2$):

$$E_{рік} = \sum_{i=1}^{12} \rho\ g\ Q_{т,i}\ H_{н,i}\ \eta_{т,i}\ \eta_{ген}\ \eta_{тр}\ t_i \qquad (4.31)$$

де t_i — кількість годин у місяці. Результати зводять у таблицю режимів (місяць, K_i, $Q_{т,i}$, $Н_{н,i}$, $\eta_{т,i}$, P_i, E_i).

5. ККД і КВТ. ККД ГЕС на номінальному режимі $\eta = (Н_н/Н_г)\cdot\eta_т\cdot\eta_{ген}\cdot\eta_{тр}$. КВТ показує, яку частку потенціальної енергії всього річного стоку річки на статичному напорі перетворено в електроенергію:

$$K_{ВТ} = \frac{E_{рік}}{\rho\ g\ H_г \sum_i K_i\ Q_р\ t_i} \qquad (4.32)$$

6. Енергетичний баланс на номінальному режимі: потужність потоку $\rho g Q_p Н_г$ → гідравлічні втрати в водоводі → втрати в турбіні (гідравлічні, об'ємні, механічні) → втрати в генераторі → втрати в трансформаторі → електроенергія в мережу.

4.6. Біогазова когенераційна установка (варіанти 21–25)

БГУ — единий тип у завданнях із класичним тепловим балансом за паливом, тому КВТ тут визначають у традиційному для енергоустановок розумінні.

1. Вихід біогазу та потужність палива. Маса органічних сухих речовин, кг/добу, добовий вихід біогазу та метану, м³/добу, і теплова потужність палива, кВт:

$$m_{\text{ОСР}} = m \cdot \text{СР} \cdot \text{ОСР},$$

$$V_{\text{бг}} = m_{\text{ОСР}}\, y,$$

$$V_{\text{CH}_4} = V_{\text{бг}}\, x_{\text{CH}_4} \tag{4.33}$$

$$Q_{\text{пал}} = \frac{V_{\text{CH}_4}\, Q_{\text{н}}^{\text{CH}_4}}{86{,}4} \tag{4.34}$$

де Qн(CH₄) = 35,8 МДж/м³; 86,4 — коефіцієнт переходу від МДж/добу до кВт.

2. Реактор (метантенк). Робочий об’єм та навантаження за органічною речовиною (OLR):

$$V_{\text{р}} = \frac{m}{\rho_{\text{с}}}\,\text{HRT},$$

$$\text{OLR} = \frac{m_{\text{ОСР}}}{V_{\text{р}}} \tag{4.35}$$

де ρс ≈ 1000 кг/м³. Для мезофільних реакторів рекомендовано OLR = 2–4 кг ОСР/(м³·добу); якщо значення виходить за межі, коригують HRT або передбачають розбавлення. Повний об’єм реактора з газовим простором — (1,1–1,2)Vр.

3. Когенерація. Електрична та теплова потужності ГПУ, теплота на підігрівання сировини з урахуванням тепловтрат реактора kвтр = 0,15:

$$P_{\text{ел}} = Q_{\text{пал}}\, \eta_{\text{ел}},$$

$$Q_{\text{т}} = Q_{\text{пал}}\, \eta_{\text{т}},$$

$$Q_{\text{р}} = \left(1 + k_{\text{втр}}\right) \frac{m\, c_{\text{с}}\, (t_{\text{р}} - t_{\text{с}})}{86\,400} \tag{4.36}$$

де m — кг/добу; cс ≈ 4,0–4,19 кДж/(кг·К) — теплоємність сировини; tс = 10 °С. Теплота, що залишається для зовнішнього споживача, Qт.кор = Qт − Qр; чиста електрична потужність Рел.нет = 0,93Рел.

4. ККД і КВТ:

$$\eta_{\text{ел}}^{\text{нет}} = \frac{P_{\text{ел.нет}}}{Q_{\text{пал}}},$$

$$K_{\text{ВТ}} = \frac{P_{\text{ел.нет}} + Q_{\text{т.кор}}}{Q_{\text{пал}}} \qquad (4.37)$$

Річне виробництво визначають за числа годин роботи ГПУ 8000 год/рік; у записці показують, як змінюється КВТ взимку і влітку через зміну Qp і попиту на теплоту.

5. Матеріальний баланс: маса дигестату mдиг ≈ m − ρбгVбг, де ρбг ≈ 1,2 кг/м³; дигестат розглядають як органічне добриво.

6. Тепловий баланс ГПУ: Qпал → електроенергія (у т. ч. власні потреби) → теплота охолодження двигуна та вихлопних газів (на реактор і зовнішньому споживачу) → втрати з вихлопними газами та в довкілля (1 − ηел − ηт).

4.7. Геотермальна установка з органічним циклом Ренкіна (варіанти 26–30)

У бінарній установці геотермальний теплоносій передає теплоту низькокиплячому робочому тілу (ORC). Властивості робочих тіл визначають за CoolProp, NIST Chemistry WebBook або довідковими таблицями; цикл зображують у T–s-діаграмі.

1. Ресурс джерела. Теплота, передана в цикл, та ексергія теплоносія відносно навколишнього середовища (T₀ = tox + 273,15):

$$Q_{\text{г}} = m_{\text{г}}\, c_p\, (t_{\text{вх}} - t_{\text{вих}}),$$

$$\dot{E}x_{\text{г}} = m_{\text{г}}\, c_p \left[(T_{\text{вх}} - T_0) - T_0 \ln \frac{T_{\text{вх}}}{T_0} \right] \qquad (4.38)$$

2. Температури циклу. Температура конденсації Тк = tox + Δtox + ΔTпп,к, де Δtox — нагрів охолоджувального середовища (8–10 К). Температуру випаровування Тв підбирають на максимум чистої потужності (4–6 значень з кроком 5 К) із двох умов балансу випарника — загальної та в точці pinch (початок кипіння, стан «b»):

$$m_{\text{г}}\, c_p\, (t_{\text{вх}} - t_{\text{вих}}) = m_{\text{рт}}\, (h_3 - h_2),$$

$$m_{\text{г}}\, c_p\, [t_{\text{вх}} - (T_{\text{в}} + \Delta T_{\text{пп}})] = m_{\text{рт}}\, (h_3 - h_b) \qquad (4.39)$$

Умова tвих ≥ tвих мін обмежує знизу допустимі Тв. Для докритичного циклу Тв має бути на 10–15 К нижчою за критичну температуру робочого тіла.

3. Турбіна та насос (1 — вхід у насос, насичена рідина за Тк; 3 — вхід у турбіну, насичена або слабко перегріта пара за Тв):

$$h_4 = h_3 - \eta_{\text{т},s}(h_3 - h_{4s}),$$
$$h_2 = h_1 + \frac{v_1(p_{\text{в}} - p_{\text{к}})}{\eta_{\text{н}}} \qquad (4.40)$$

4. Потужності та ККД:

$$P_{\text{ген}} = m_{\text{рт}}(h_3 - h_4)\,\eta_{\text{ген}},$$
$$P_{\text{нет}} = P_{\text{ген}}(1 - k_{\text{вп}}) - m_{\text{рт}}(h_2 - h_1),$$
$$\eta_t = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \qquad (4.41)$$

де kвп — частка власних потреб. Термічний ККД циклу η_t порівнюють з ККД циклу Карно $\eta_C = 1 - Тк/Тв$ та з ККД трикутного (Лоренца) циклу для джерела зі змінною температурою; ексергетичний ККД $\eta_{II} = Рнет/Ёхг$.

5. КВТ. Для підвищення КВТ теплоносій після випарника використовують каскадно — для теплопостачання або теплиць (охолодження до tвих мін):

$$K_{\text{ВТ}} = \frac{P_{\text{нет}} + Q_{\text{т.кор}}}{m_{\text{г}}\, c_p\, (t_{\text{вх}} - t_{\text{вих мін}})} \qquad (4.42)$$

Річне виробництво визначають за КВВП = 0,85–0,90. Для повітряного конденсатора додатково показують, як знижується Рнет при підвищенні tох на 10 К (літній режим).

6. Тепловий баланс: Qг → теплота, відведена в конденсаторі → втрати в генераторі → потужність насоса та власні потреби → чиста електрична потужність. Окремо наводять ексергетичний баланс: де саме втрачається роботоздатність (випарник, турбіна, конденсатор, скиданий теплоносій).

4.8. Наскрізний приклад: розрахунок ВЕУ з діаметром ротора 60 м

Результат прикладу: Рном = 1266 кВт, ККД на номінальному режимі 41,6 %, річне виробництво 3751 МВт·год, КВВП = 0,338, КВТ = 0,288. Приклад не збігається з жодним варіантом і показує послідовність та форму подання розрахунків у розділі 3 записки.

Вихідні дані: D = 60 м; H = 70 м; $\bar{v}_{10}$ = 5,8 м/с; k = 2,0; α = 0,14; vвкл / vном / vвимк = 3 / 12 / 25 м/с; λопт = 7,5; C_p max = 0,46; t = 10 °C; p = 101 325 Па; ηред = 0,97; ηген = 0,96; ηпер = 0,97; nген = 1500 об/хв; Ктг = 0,95. Економічні припущення (умовні): kуд = 1400 €/кВт; b = 0,025; r = 0,10; n = 20 років; Це = 0,10 €/(кВт·год); kел(CO_2) = 1,10 т/(МВт·год).

1. Вітровий режим.

- Густина повітря (4.11): ρ = 101 325 / (287 · 283,15) = 1,247 кг/м³.
- Швидкість на висоті осі (4.9): $\bar{v}_H = 5{,}8 \cdot (70/10)^{0{,}14} = 5{,}8 \cdot 1{,}313 = 7{,}62$ м/с.
- Параметр масштабу (4.10): c = 7,62 / Г(1,5) = 7,62 / 0,8862 = 8,59 м/с.
- Площа ометання: A = π · 60² / 4 = 2827 м².
- Середня питома потужність вітрового потоку (4.11): $\bar{N}_в/A = 0{,}5 \cdot 1{,}247 \cdot 8{,}59^3 \cdot Г(2{,}5) = 0{,}5 \cdot 1{,}247 \cdot 634{,}7 \cdot 1{,}329 = 526$ Вт/м².

2. Номінальний режим (4.12, 4.13).

- Потужність вітрового потоку за vном: $N_в = 0{,}5 \cdot 1{,}247 \cdot 2827 \cdot 12^3 = 3046$ кВт.
- Потужність на валу ротора: Pр = 0,46 · 3046 = 1401 кВт.
- ККД електромеханічної частини: 0,97 · 0,96 · 0,97 = 0,903; номінальна електрична потужність Рном = 1401 · 0,903 = 1266 кВт.
- Частота обертання ротора: nр = 60 · 7,5 · 12 / (π · 60) = 28,6 об/хв; передаточне число редуктора i = 1500 / 28,6 = 52,4; колова швидкість кінця лопаті u = 7,5 · 12 = 90 м/с (граничне значення).
- Крутний момент на валу ротора: Mр = 30 · 1 401 000 / (π · 28,65) = 467 кН·м.

– ККД ВЕУ на номінальному режимі: $\eta_{ВЕУ} = 0{,}46 \cdot 0{,}903 = 0{,}416$, або 70 % від межі Бетца (0,416 / 0,593).

3. Енергетичний баланс на номінальному режимі (табл. 4.3): за ротором у потоці неминуче залишається 40,7 % потужності; найбільша технічно усувна втрата — аеродинамічна (13,3 %).

Таблиця 4.3 – Енергетичний баланс ВЕУ за v = 12 м/с

Стаття балансу	Розрахунок	кВт	%
Потужність вітрового потоку через A	$0{,}5\rho A v^3$	3046,0	100,00
Кінетична енергія потоку за ротором (межа Бетца)	$(1 - 16/27)N_в$	1240,9	40,74
Аеродинамічні втрати ротора	$(16/27 - C_p)N_в$	403,9	13,26
Втрати в редукторі	$P_р(1 - \eta_{ред})$	42,0	1,38
Втрати в генераторі	$P_р\eta_{ред}(1 - \eta_{ген})$	54,4	1,78
Втрати в перетворювачі частоти	$P_р\eta_{ред}\eta_{ген}(1 - \eta_{пер})$	39,1	1,29
Корисна електрична потужність	$P_{ном}$	1265,6	41,55

4. Потужнісна характеристика та річне виробництво (4.14, 4.15) — табл. 4.4. Імовірність інтервалу $p_j = F(v_j + 0{,}5) - F(v_j - 0{,}5)$; число годин $t_j = 8760 p_j$; $E_j = P(v_j)t_j$. Швидкості понад 25,5 м/с трапляються приблизно 1 годину на рік і в розрахунку не враховані.

Таблиця 4.4 – Розрахунок річного виробництва електроенергії методом інтервалів

v_j, м/с	p_j	t_j, год	$P(v_j)$, кВт	E_j, МВт·год
1	0,0266	233	0,0	0,0
2	0,0511	448	0,0	0,0
3	0,0717	628	19,8	12,4
4	0,0870	762	46,9	35,7
5	0,0963	843	91,6	77,2
6	0,0996	872	158,2	138,0
7	0,0975	854	251,2	214,5
8	0,0909	797	375,0	298,7
9	0,0813	712	533,9	380,3
10	0,0699	612	732,4	448,5
11	0,0579	507	974,8	494,4
12	0,0463	406	1265,6	513,2
13	0,0358	313	1265,6	396,6
14	0,0268	234	1265,6	296,6
15	0,0194	170	1265,6	214,8
16	0,0136	119	1265,6	150,7
17	0,0092	81	1265,6	102,5
18	0,0061	53	1265,6	67,7

v_j, м/с	p_j	t_j, год	$P(v_j)$, кВт	E_j, МВт·год
19	0,0039	34	1265,6	43,3
20	0,0024	21	1265,6	26,9
21	0,0015	13	1265,6	16,3
22	0,0009	8	1265,6	9,5
23	0,0005	4	1265,6	5,4
24	0,0003	2	1265,6	3,0
25	0,0001	1	1265,6	1,6
Разом	**0,9965**	**8729**		**3948,0**

5. Річні показники.

– Річне виробництво з урахуванням Ктг: Ерік = 0,95 · 3948,0 = 3751 МВт·год.

– КВВП (4.4): 3751 / (8760 · 1,266) = 0,338; Твик = 3751 / 1,266 = 2963 год.

– Річна енергія вітрового потоку через А (4.16): Ев = 8760 · 2827 · 0,526 = 13 029 МВт·год.

– КВТ = 3751 / 13 029 = 0,288 — приблизно на 30 % нижчий за ККД ВЕУ в діапазоні 3–12 м/с (0,416). Різницю спричиняють обмеження потужності за v > vном, зупинки за v < vвкл та простої (Ктг).

6. Економічні та екологічні показники (4.5–4.8).

– Капітальні витрати: K = 1400 · 1266 = 1 772 тис. €; експлуатаційні витрати Ве = 0,025 · 1 772 = 44,3 тис. €/рік.

– CRF = 0,1 · $1,1^{20}$ / ($1,1^{20}$ − 1) = 0,1175; LCOE = (1 772 000 · 0,1175 + 44 300) / 3 751 000 = 0,067 €/(кВт·год).

– Річний дохід D = 3 751 000 · 0,10 = 375,1 тис. €; Ток = 1 772 / (375,1 − 44,3) = 5,4 року; NPV = 1 044 тис. € > 0 — проєкт ефективний за прийнятих припущень.

– Скорочення викидів: $\Delta M(CO_2)$ = 3751 · 1,10 = 4126 т/рік.

7. Захід з підвищення ефективності з кількісною оцінкою. Збільшення висоти башти з 70 до 90 м підвищує $\bar{v}_H$ до 7,89 м/с (c = 8,90 м/с), Ерік — до 3988 МВт·год (+6,3 %), КВВП — до 0,360. Доцільність заходу підтверджують порівнянням додаткового доходу (≈ 23,7 тис. €/рік) з подорожчанням башти та фундаменту. Інші напрями: оптимізація профілю

лопатей (зростання C_p), безредукторна схема з синхронним генератором на постійних магнітах, удосконалення алгоритмів керування кутом лопатей і орієнтацією гондоли, прогнозне техобслуговування (зростання Ктг).

5. Графічна частина

Графічна частина — один аркуш формату А1 (594 × 841 мм) зі структурною схемою установки, таблицею режимів роботи та основними розрахунковими характеристиками. Аркуш виконують за вимогами ЄСКД і ДСТУ в системах автоматизованого проєктування (AutoCAD, КОМПАС, nanoCAD, SolidWorks) або вручну; на аркуші є рамка і основний напис за ДСТУ ГОСТ 2.104:2006.

Обов'язковий склад аркуша:

1. Структурна схема установки: функціональні блоки, потоки енергії та речовини зі стрілками, контури керування, перелік елементів (умовні графічні позначення — за вимогами ЄСКД до схем).
2. Таблиця режимів роботи: режим, умова переходу, потужність, ККД, стан основних агрегатів.
3. Діаграма енергетичного (теплового) балансу Сенкі на номінальному режимі з цифрами в кВт і %.
4. Два-три графіки характеристик установки (табл. 5.1).
5. Таблиця основних техніко-економічних показників: Рном, ККД, КВТ, КВВП, Ерік, LCOE, Ток, $\Delta M(CO_2)$.

Таблиця 5.1 – Графіки, які наводять на аркуші залежно від типу установки

Тип установки	Графіки
ВЕУ	потужнісна характеристика P(v); розподіл Вейбулла і розподіл виробітку за швидкостями; $C_p(\lambda)$
ФЕС	ВАХ і P–V-характеристики для G = 200, 600, 1000 Вт/м²; місячне виробництво та PR
СТУ	характеристика ККД колектора; місячний баланс «навантаження – сонячна теплота – котел»
Міні-ГЕС	гідрограф і місячний графік потужності; характеристика ηт(Q/Qp)
БГУ	матеріальний баланс; місячний графік теплоти на реактор і корисної теплоти
Геотермальна ORC	цикл у T–s-діаграмі; Q–T-діаграма випарника з точкою pinch; Рнет(Тв)

Графіки мають координатну сітку, позначення величин і одиниць на осях, розрахункові точки маркують. Кожне зображення на аркуші має

підтверджуватися розрахунком у пояснювальній записці та продубльовуватися в ній у зменшеному вигляді (рисунки формату А4). Зображення займають не менше 60 % поля аркуша.

6. Вимоги до оформлення пояснювальної записки

Записку оформлюють за ДСТУ 3008:2015 та вимогами ЄСКД до текстових документів (ГОСТ 2.105). Головні параметри наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри оформлення тексту

Параметр	Вимога
Формат аркуша	А4 (210 × 297 мм), друк з одного боку (крім бланка завдання)
Шрифт	Times New Roman, 14 pt; міжрядковий інтервал 1,5
Вирівнювання, абзац	по ширині; абзацний відступ 1,25 см
Поля	ліве — 30 мм, праве — 15 мм, верхнє і нижнє — 20 мм
Рамка і основний напис	форма 2 — на першому аркуші після завдання (анотація), форма 2а — на наступних аркушах
Нумерація сторінок	наскрізна, арабськими цифрами в основному написі; титульний аркуш входить у нумерацію без номера
Заголовки	розділи — з нової сторінки, напівжирним; без крапки в кінці та перенесення слів
Одиниці та числа	система SI; десяткова кома; 3–4 значущі цифри в результатах

Формули та розрахунки. Формулу розміщують окремим рядком по центру і нумерують в межах розділу біля правого поля: (3.1), (3.2). Пояснення символів наводять після слова «де» в порядку їхньої появи у формулі. Кожний розрахунок подають у вигляді «формула → підстановка чисел → результат з одиницею»; однотипні розрахунки для багатьох режимів зводять у таблицю, навівши приклад для одного рядка.

Рисунки та таблиці. Підпис рисунка — під ним по центру: «Рисунок 3.1 – Потужнісна характеристика ВЕУ». Назву таблиці розміщують над нею зліва: «Таблиця 3.1 – …»; у разі перенесення пишуть «Продовження таблиці 3.1». Рисунок і таблицю розміщують після першого посилання на них у тексті. Запозичені рисунки супроводжують посиланням на джерело.

Посилання та список джерел. Посилання в тексті наводяться у квадратних дужках: [5, с. 120]. Список складають у порядку першої згадки в тексті та оформлюють за ДСТУ 8302:2015 або ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 (як зазначено в робочій програмі); для електронних ресурсів зазначають URL і дату звернення. У список вносять лише джерела, на які є посилання.

Додатки позначають великими літерами української абетки (А, Б, В, …), крім Ґ, Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ь; кожен додаток починається з нової сторінки. Разом із паперовою версією керівнику подають електронну: записку в PDF та файли розрахунків (Excel, MATLAB, Python).

7. Захист курсового проєкту та критерії оцінювання

Курсовий проєкт оцінюють за 100-бальною шкалою: пояснювальна записка — до 40 балів, графічна частина — до 20, захист — до 40.

Допуск до захисту. До захисту допускають ЗВО, який виконав завдання в повному обсязі та має підписані керівником записку і аркуш графічної частини. Керівник попередньо оцінює записку та графічну частину.

Порядок захисту. Проєкт приймає комісія з не менше ніж двох НПП за обов'язкової присутності керівника. ЗВО робить доповідь тривалістю 5–7 хв: мета, структурна схема, головні результати розрахунку (ККД, КВТ, річне виробництво, економічні показники) та запропоновані заходи, спираючись на аркуш А1. Після доповіді члени комісії ставлять запитання. У разі незадовільної оцінки комісія визначає, чи доопрацьовує ЗВО наявний проєкт, чи виконує проєкт за новим завданням.

Таблиця 7.1 – Критерії оцінювання курсового проєкту (за робочою програмою)

Складова	Бали	Критерії
Пояснювальна записка	40	Зміст відповідає темі; чітко сформульовані мета і завдання; методи розрахунку адекватні та застосовані грамотно; є посилання на джерела; оформлення відповідає стандартам; дотримано вимог чинних нормативних документів; висновки відповідають меті; робота виконувалася систематично та подана вчасно
	30	Те саме, але робота виконувалася несистематично та подана з порушенням графіка
	20	Зміст відповідає темі, але аналіз поверхневий, матеріал викладено непослідовно; графік виконання порушено
	10	Зміст не відповідає темі; висновки відсутні або декларативні
Графічна частина	20	Виконана без помилок на високому рівні з дотриманням стандартів
	15	Без помилок на достатньому рівні, з незначними відхиленнями від стандартів
	10	З невеликою кількістю помилок, з відхиленнями від стандартів
	5	Графічні матеріали низької якості
Захист	40	Доповідь логічна й стисла; глибокі знання; впевнені та докладні відповіді на запитання

Складова	Бали	Критерії
	35	Правильні відповіді на всі запитання, але аргументація не завжди впевнена
	30	Положення роботи обґрунтовані, але є неточності у відповідях
	25	Суттєві неточності у відповідях, обґрунтування не завжди належне
	20	Результати викладено невпорядковано; є спроби аргументувати положення роботи
	15	Неповні, поверхові, необґрунтовані відповіді
	10	Задовільні знання, але немає чітких відповідей на додаткові запитання
	5	Не спроможний відповісти на запитання та відстояти позицію

Таблиця 7.2 – Шкала оцінювання (уточнюється за чинним положенням університету)

Сума балів	Оцінка ECTS	Національна шкала
90–100	A	відмінно
82–89	B	добре
74–81	C	добре
64–73	D	задовільно
60–63	E	задовільно
35–59	FX	незадовільно з можливістю повторного захисту
0–34	F	незадовільно з обов’язковим повторним виконанням проєкту

Типові запитання на захисті:

1. Чим відрізняються ККД і КВТ вашої установки та чому КВТ менший (або більший)?
2. Що визначає КВВП установки і як його підвищити?
3. Яка теоретична межа ефективності обмежує вашу установку (Бетц, Карно, Шоклі – Квейссер) і наскільки до неї наближено проєкт?
4. Яка стаття енергетичного балансу найбільша і чи можна її зменшити?
5. Як зміняться показники установки, якщо ресурс (швидкість вітру, радіація, витрата, температура джерела) знизиться на 10 %?
6. Які режими роботи передбачено і як система керування переводить установку між ними?
7. Від яких параметрів найбільше залежать LCOE і термін окупності?
8. Який коефіцієнт викидів CO_2 прийнято і чому саме його?

9. Який із запропонованих заходів є найефективнішим і як це підтверджено розрахунком?
10. Які допущення методики найбільше впливають на точність результатів?

8. Рекомендовані джерела інформації

Джерела 1–14 — за робочою програмою дисципліни; 15–27 — нормативні документи та інформаційні ресурси, на які посилаються ці вказівки.

Основна

1. Титко Р. В., Калініченко В. М. Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України). Варшава, 2010. 530 с.
2. Сиротюк С. В. Альтернативні джерела енергії : навч. посібник. Полтава : ПУЕТ, 2018. 482 с.
3. Бойко С. М., Сінчук О. М. та ін. Альтернативні джерела енергії та технології їх використання : підручник. Запоріжжя : ЗНУ, 2001. 328 с.
4. Клименко В. В., Солдатенко В. П., Плєшков С. П. Альтернативні джерела енергії та технології їх використання : підручник. Київ : КНТЕУ, 2019. 340 с.
5. Manwell J. F., McGowan J. G., Rogers A. L. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. 2nd ed. Wiley, 2010. 794 p.
6. Сидоренко Ю. М. Енергетичні установки на базі відновлюваних джерел. Київ : Ліра-К, 2020.
7. Станкевич О. В., Коваль П. І. Моделювання та оптимізація енергетичних процесів. Харків : НТУ «ХПІ», 2018.
8. Twidell J., Weir T. Renewable Energy Resources. Routledge, 2019.

Допоміжна

9. Lund H. Renewable Energy Systems. Academic Press, 2020.
10. Романов С. М. Біоенергетика та біопаливо. Одеса : ОНПУ, 2019.
11. Stoecker W. F. Design of Thermal Systems. McGraw-Hill, 2018.
12. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th ed. Wiley, 2013. 876 p.
13. McGovern J., Harding R. A. Biogas: Fundamentals of Production and Utilization. Routledge, 2010. 284 p.

14. Перспективи розвитку відновлюваних джерел енергії в Україні (моніторинг). Нац. екол. центр України, 2020. 120 с.

Нормативні документи та інформаційні ресурси

15. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання.
16. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання.
17. ISO 9806:2017. Solar energy — Solar thermal collectors — Test methods.
18. IEC 61400-12-1. Wind energy generation systems — Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.
19. IEC 61724-1. Photovoltaic system performance — Part 1: Monitoring.
20. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2024. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2025. URL: https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024.
21. DiXi Group. Коефіцієнти викидів CO_2 електроенергетичної системи України. URL: https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf.
22. IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 2: Energy. IGES, 2006.
23. PVGIS — Photovoltaic Geographical Information System (European Commission, JRC). URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
24. Global Wind Atlas (DTU, World Bank Group). URL: https://globalwindatlas.info.
25. NASA POWER — Prediction of Worldwide Energy Resources. URL: https://power.larc.nasa.gov.
26. CoolProp — бібліотека термодинамічних властивостей робочих тіл. URL: http://www.coolprop.org.
27. NIST Chemistry WebBook. URL: https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/.

Додатки

Додаток А. Зразок титульного аркуша

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Херсонський навчально-науковий інститут

Кафедра суднового машинобудування та енергетики

КУРСОВИЙ ПРОЄКТ

з дисципліни «Теорія робочих процесів альтернативних і відновлювальних енергоустановок»

на тему: _____

Здобувач(ка) вищої освіти ___ курсу _____ групи спеціальності G11 «Машинобудування», спеціалізація G11.02 «Двигуни та енергетичні установки»

освітня програма «Альтернативні та відновлювальні енергоустановки»

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник _____ (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна шкала _____ Кількість балів _____ Оцінка ECTS ____

Члени комісії: _____ _____ (підпис, прізвище та ініціали) — 3 рядки

м. Херсон – 20___ рік

Додаток Б. Бланк завдання на курсовий проєкт

Міністерство освіти і науки України

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Херсонський навчально-науковий інститут

«Затверджую»

Завідувач кафедри СМЕ,

професор _____ Андреєв А.А.

«___» _____ 20___ р.

ЗАВДАННЯ

до виконання курсового проєкту з дисципліни «Теорія робочих процесів альтернативних і відновлювальних енергоустановок» спеціальності G11 «Машинобудування», спеціалізація G11.02 «Двигуни та енергетичні установки»,

освітня програма «Альтернативні та відновлювальні енергоустановки»

Тема роботи: «_____» ·
Варіант № ____

Вихідні дані до проєкту (характеристики об’єкта):

_____

Зміст курсового проєкту.

Розрахунково-пояснювальна записка: перелік прийнятих скорочень; вступ (1–2 с.); розділ 1. Опис установки-прототипу; розділ 2. Побудова структурної схеми установки; розділ 3. Визначення ККД та КВТ установки; розділ 4. Графічна частина; висновки; список використаних джерел.

Обсяг проєкту: розрахунково-пояснювальна записка — 20–40 сторінок; графічна частина — структурна схема установки, таблиця режимів роботи тощо, 1 аркуш А1.

Оформлення — відповідно до чинних вимог ЄСКД та ДСТУ.

Завдання видано «___» _____ 20___ р.

Термін захисту «___» _____ 20___ р.

Виконавець: здобувач(ка) вищої освіти групи _____ _____
(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту _____ (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Додаток В. Довідкові дані

Таблиця В.1 – Значення гамма-функції для розподілу Вейбулла

k	Γ(1 + 1/k)	Γ(1 + 3/k)	Коефіцієнт енергії вітру Γ(1 + 3/k) / Γ³(1 + 1/k)
1,8	0,8893	1,5046	2,139
1,9	0,8874	1,4073	2,014
2,0	0,8862	1,3293	1,910
2,1	0,8857	1,2658	1,822
2,2	0,8856	1,2134	1,747
2,3	0,8859	1,1698	1,682
2,4	0,8865	1,1330	1,626

Коефіцієнт енергії вітру показує, у скільки разів середня питома потужність потоку перевищує потужність, обчислену за середньою швидкістю: $\bar{N}_в/A = 0{,}5\rho\bar{v}^3 \cdot \Gamma(1 + 3/k) / \Gamma^3(1 + 1/k)$.

Таблиця В.2 – Фізичні сталі та розрахункові величини

Величина	Значення
Газова стала сухого повітря R	287 Дж/(кг·К)
Прискорення вільного падіння g	9,81 м/с²
Теплоємність води c_p	4,19 кДж/(кг·К)
Межа Бетца $C_{p,Бетц}$	16/27 ≈ 0,593
Стала Больцмана k і заряд електрона q	$1{,}381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Кл
Нижча теплота згоряння метану (нормальні умови)	35,8 МДж/м³
Коефіцієнт викидів CO_2 природного газу [22]	56,1 т/ТДж (0,202 кг/кВт·год)
Маржинальний коефіцієнт викидів енергосистеми України, 2020–2023 [21]	1,06–1,29 т CO_2/(МВт·год)

Додаток Г. Приклад таблиці режимів роботи (для ВЕУ з підрозділу 4.8)

Режим	Умова	P, кВт	Керування	Тривалість, год/рік
Очікування	v < 3 м/с	0	ротор у флюгері, генератор відключено	≈ 680
Часткове навантаження	3 ≤ v < 12 м/с	20–1000	змінна частота обертання, λ = λопт, кут лопатей мінімальний	≈ 6590
Номінальний	12 ≤ v ≤ 25 м/с	1266	обмеження потужності поворотом лопатей (pitch)	≈ 1460
Зупинка за штормового вітру	v > 25 м/с	0	лопаті вфлюгері, гальмо, орієнтація на вітер	≈ 1
Аварійний	втрата мережі, перевищення пр, вібрація	0	аварійне флюгерування, механічне гальмо	—