

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри  
інженерії енергосистем

(Назва кафедри)

Є.О. Антипов

(Підпис)

“ ” 2025 р.

**БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

На тему: «Розробка системи комплексного енергозабезпечення ФГ "Білі  
Береги" з використанням тригенераторів»

Спеціальність: 144 – «Теплоенергетика»

02.03 – КР.2024 «С» 2024.11.12 004 ПЗ

Гарант освітньої програми:

канд. техн. наук, доцент  
(науковий ступінь та вчене звання)

(Підпис)

О.В. Шеліманова  
(ПІБ)

Керівник:

канд. техн. наук, доцент  
(науковий ступінь та вчене звання)

(Підпис)

Є.О. Антипов  
(ПІБ)

Виконав:

(Підпис)

О.В.Гордін  
(ПІБ)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

інженерії енергосистем

(Назва кафедри)

Є.О. Антипов

(Підпис)

“ ” 2024 р.

## Завдання

На виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту:

Гордіну Олександровичу

Спеціальність (Напрямок підготовки): 144 «Теплоенергетика»

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: Розробка системи комплексного енергозабезпечення ФГ "Білі Береги" з використанням тригенераторів»

затверджена наказом ректора НУБіП України від "12" 11. 2024 р. №2024«С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру "01" Червня 2025р.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: Нормативні документи в галузі теплоенергетики

Перелік питань, які потрібно вирішити:

1. Аналіз структури та енергопотреб ФГ «Білі Береги»
2. Огляд сучасних тригенераційних технологій
3. Вибір установки та розрахунок потужностей
4. Схема інтеграції тригенерації у господарство
5. Попереднє техніко-економічне обґрунтування
6. Оцінка екологічних переваг

Перелік додаткових матеріалів: Презентація

Дата видачі завдання: "14" 11. 2024 р.

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(Підпис)

Є.О. Антипов

(ПІБ)

Завдання взяв до виконання:

(Підпис)

О.В.Гордін

(ПІБ)

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТРЕБ ФГ «БІЛІ БЕРЕГИ» ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ВАРІАНТІВ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....	8
1.1. Загальна інформація про фермерське господарство «Білі Береги» .....	8
1.2. Аналіз споживання енергетичних ресурсів.....	9
1.3. Альтернативи та існуючі варіанти енергопостачання .....	13
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТРИГЕНЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	15
2.1. Принцип когенерації - комбіноване виробництво тепла та електроенергії (КГП / СНР) .....	16
2.2. Принцип тригенерації - комбіноване виробництво електроенергії, тепла та холоду (КХТП / ССНР).....	17
2.3. Основні технології тригенераційних установок .....	19
2.4. Види палива для тригенераційних установок.....	22
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОМПЛЕКСНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФГ "БІЛІ БЕРЕГИ" НА ОСНОВІ ТРИГЕНЕРАЦІЇ	24
3.1. Обґрунтування вибору потужності тригенераційної установки.....	24
3.2. Вибір конкретного обладнання .....	26
3.3. Розробка принципової схеми інтеграції системи .....	28
3.4. Опис режимів роботи системи.....	30
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	33
4.1. Розрахунок енергетичного балансу та продуктивності системи .....	33
4.2. Капітальні витрати (CAPEX): .....	37
4.3. Екологічна оцінка.....	40
ВИСНОВКИ.....	42

Умовні позначення:

$E$  – виробництво електроенергії ТГУ (кВт/год)

$P_e$  – електрична потужність (кВт)

$P_T$  – теплова потужність (кВт)

$P_f$  – паливна потужність (кВт)

$t$  – час роботи (год)

$Q_z$  – загальне споживання палива (кВт)

$Q_e$  – загальне споживання енергії

$Q_{\text{теп}}$  – теплова енергія (кВт/год)

$Q_{\text{хол}}$  – холодова енергія (кВт/год)

$Q_{\text{п}}$  – потрібна енергія (кВт/год)

$Q_{\text{над}}$  – тепло що залишається після забезпечення роботи (Надлишкове) (кВт/год)

$q$  – кількість теплоти (кВт·год/м<sup>3</sup>)

COP – середньорічний холодильний коефіцієнт

$\eta_e$  – електричний ККД (%)

$\eta_T$  – тепловий ККД (%)

$V_{\text{річ}}$  - річне споживання біогазу (м<sup>3</sup>/рік)

## ВСТУП

Сільське господарство займає одне з провідних місць в економіці України, проте його ефективне функціонування значною мірою залежить від надійності та вартості енергопостачання. Для забезпечення всіх виробничих процесів фермерським господарствам необхідні великі обсяги електроенергії, тепла, а в деяких випадках і холоду. Це стосується як роботи обладнання, так і опалення приміщень, нагріву води, охолодження продукції тощо. Традиційні способи енергозабезпечення, що базуються на централізованих мережах і споживанні викопного палива, часто виявляються не лише дорогими, а й нестабільними, з високими втратами під час транспортування та шкідливим впливом на навколишнє середовище. Все це підштовхує аграрний сектор до пошуку альтернативних, більш ефективних і сталих енергетичних рішень.

Одним із таких рішень є застосування технологій комбінованого виробництва енергії. Тригенераційні установки, які виробляють електроенергію, тепло і холод одночасно, дозволяють значно підвищити ефективність використання палива - до 80-90%, що значно перевищує показники при окремому виробництві кожного виду енергії. Такий підхід особливо доцільний для підприємств, які мають постійну потребу у всіх трьох типах енергії - саме до таких належать сучасні багатoproфільні фермерські господарства.

Фермерське господарство «Білі Береги», яке розглядається в рамках цього дослідження, є типовим прикладом такого підприємства. Його енергетичні потреби охоплюють електропостачання для обладнання та освітлення, тепло для опалення та господарських потреб (наприклад, гаряче водопостачання чи сушка), а також холод для зберігання продукції і охолодження молока. При цьому господарство має потенціал для виробництва біогазу з відходів тваринництва, що робить доцільним розгляд впровадження тригенераційної системи на базі біогазової установки. Такий підхід дозволить значно зменшити витрати на енергоносії, підвищити енергетичну незалежність та одночасно поліпшити екологічну ситуацію завдяки зменшенню викидів і утилізації органічних відходів.

Відтак, дослідження та проєктування системи комплексного енергозабезпечення для ФГ «Білі Береги» із застосуванням тригенераційної технології є актуальним і має як практичну, так і наукову цінність.

Мета роботи - розробити систему комплексного енергозабезпечення для ФГ «Білі Береги» на базі біогазової тригенераційної установки, обґрунтувавши її технічну та економічну доцільність.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз структури господарства «Білі Береги» і визначити його потреби в електроенергії, теплі та холоді впродовж року.
2. Оглянути сучасні тригенераційні технології, зокрема види обладнання та можливі види палива, з фокусом на використання біогазу.
3. Обґрунтувати вибір типу установки, а також виконати розрахунок необхідної потужності як самої тригенераційної установки, так і абсорбційної холодильної машини (АБХМ) відповідно до умов господарства.
4. Розробити принципову схему інтеграції обраної енергетичної системи у внутрішню інфраструктуру ФГ, включно з біогазовим комплексом.
5. Виконати попереднє техніко-економічне обґрунтування проєкту, розрахувавши капітальні та поточні витрати, економічний ефект і строк окупності.
6. Оцінити екологічні вигоди від впровадження системи.

Об'єкт дослідження - процес енергопостачання в багатопрофільному фермерському господарстві «Білі Береги».

Предмет дослідження - використання тригенераційних установок на біогазі для повного покриття енергетичних потреб фермерського підприємства.

Практичне значення роботи полягає в тому, що результати цього дослідження можуть бути використані для модернізації енергосистем не лише в господарстві «Білі Береги», а й у подібних аграрних підприємствах, які мають біомасу як потенційне джерело палива.

Структура і обсяг роботи: дипломна робота складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основна частина охоплює близько 42 сторінок. У першому розділі аналізуються енергетичні потреби господарства, другий розкриває теоретичні засади тригенерації, третій присвячений вибору обладнання, а четвертий - техніко-економічному та екологічному обґрунтуванню запропонованого рішення.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТРЕБ ФГ «БІЛІ БЕРЕГИ» ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ВАРІАНТІВ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

#### 1.1. Загальна інформація про фермерське господарство «Білі Береги»

У межах цієї дипломної роботи розглядається функціонування фермерського господарства «Білі Береги», яке розташоване в центральній частині України. Регіон має помірно-континентальний клімат із чітко вираженими сезонами, що створює значну потребу як в опаленні взимку, так і в охолодженні в літній період.

«Білі Береги» - це сучасне багатопрофільне аграрне підприємство, діяльність якого охоплює кілька основних напрямів:

1. Рослинництво. Загальна площа сільськогосподарських угідь становить приблизно 1500 гектарів. Основними культурами є пшениця, кукурудза, соняшник і ріпак. Для обробки врожаю використовується зерноочисний комплекс і зерносушильне обладнання, яке працює в основному після збору врожаю.
2. Тваринництво. У структурі господарства функціонує молочно-товарна ферма нового типу, розрахована на 400 корів дійного стада. Комплекс обладнаний сучасною доїльною залом, системами освітлення, вентиляції, насосами, охолоджувачем молока та приміщеннями для утримання худоби. Щоденно тут утворюється від 25 до 30 тонн гною, який може бути використаний як сировина для виробництва біогазу.
3. Склади та зберігання продукції. На території підприємства розміщено кілька складських споруд:
4. зерновий склад для зберігання врожаю;
5. овочесховище з системою регульованого мікроклімату для охолодження та збереження як власної продукції, так і продукції партнерів.

6. Допоміжна інфраструктура. До неї належать ремонтно-механічна майстерня, гаражна зона для техніки, а також адміністративно-побутовий корпус з офісами, їдальнею та іншими приміщеннями.

Ключові об'єкти, що споживають енергію в господарстві, включають:

- молочно-товарну ферму (вентиляція, доїльне обладнання, насосні станції, освітлення, опалення, гноєвидалення);
- охолоджувач молока;
- зерносушарку (пальники, електровентилятори);
- овочесховище (системи охолодження та вентиляції);
- майстерню (електроінструменти, зварювальне обладнання, освітлення, опалення);
- офісно-побутові приміщення (освітлення, комп'ютери, кондиціонування, гаряче водопостачання);
- зовнішнє освітлення території;
- насосні станції для водопостачання та, можливо, зрошення.

На даний момент господарство користується стандартною системою енергозабезпечення: електроенергія постачається із зовнішньої мережі, тепло виробляється в локальній котельні (що працює або на газі, або на твердому паливі), а для охолодження застосовуються парокомпресійні установки з електроприводом.

## 1.2. Аналіз споживання енергетичних ресурсів

Для того щоб обґрунтувати доцільність впровадження автономної системи енергозабезпечення, першочерговим завданням є детальний аналіз споживання енергоресурсів у господарстві. Згідно з наявними оцінками, річні потреби ФГ «Білі Береги» складають:

- Електроенергія: приблизно 1 200 000 кВт·год на рік;
- Теплоенергія: близько 1 800 000 кВт·год на рік;
- Холод: орієнтовно 400 000 кВт·год на рік.

Споживання електроенергії

Характеризується значними коливаннями як протягом доби, так і впродовж року:

**Добові зміни:** Найвищі навантаження спостерігаються в години доїння (вранці та ввечері), а також під час роботи ключового обладнання (кормоцеху, насосів, майстерні). Уночі енергоспоживання знижується, зберігається лише освітлення, робота вентиляторів і охолодження молока. Приблизна пікова потужність сягає 250–300 кВт, тоді як уночі навантаження знижується до 80–100 кВт.

**Сезонні зміни:** У літній період зростає потреба в охолодженні (зокрема, через роботу компресорів холодильних установок), водночас знижується споживання освітлення. Узимку, навпаки, енергоспоживання зростає через опалення, освітлення і вентиляцію. В осінньо-літній період також значно збільшується навантаження через запуск зерносушарки.

Головні споживачі електроенергії: системи доїння, вентиляція, освітлення, насоси, охолоджувач молока, устаткування для приготування кормів, інструменти та верстати в майстерні, компресори холодильних камер, офісна техніка.

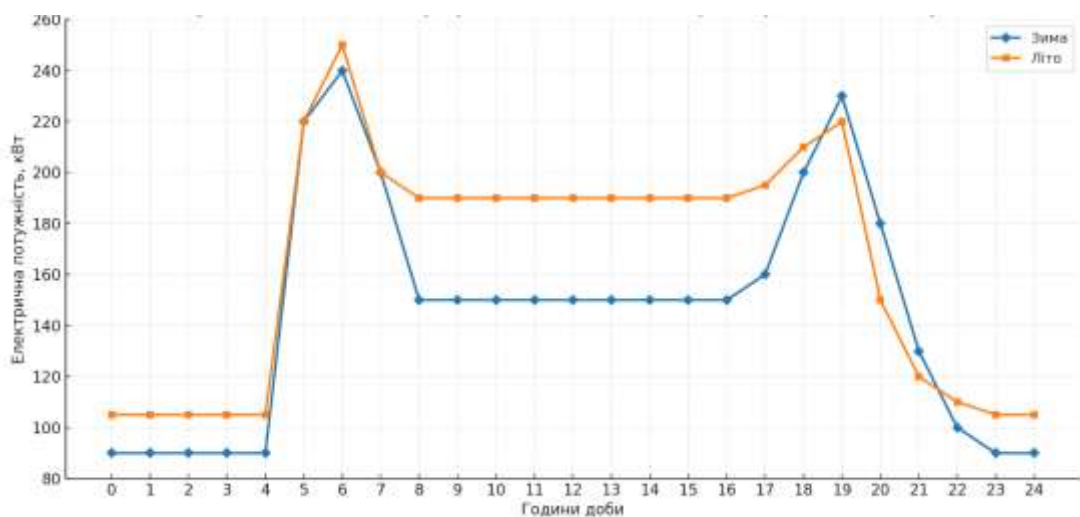


Рис 1.1. Добовий графік споживання електроенергії ФГ “Білі Береги”

### Споживання теплової енергії:

Опалення: Основна частка споживання припадає на опалювальний сезон (орієнтовно жовтень-квітень) для підтримки необхідної температури в приміщеннях МТФ (особливо для молодняку), адміністративному корпусі, майстерні.

Гаряче водопостачання (ГВП): Потрібне цілий рік для санітарної обробки доїльного обладнання, побутових потреб персоналу. Має відносно стабільний характер споживання протягом року, з можливими добовими піками.

Технологічне тепло: Основний споживач – зерносушарка, яка працює інтенсивно, але короткий період (кілька тижнів наприкінці літа – на початку осені), споживаючи значну кількість тепла.

Температурні режими: Для опалення потрібен теплоносій з температурою  $\sim 70-90^{\circ}\text{C}$ , для ГВП  $\sim 55-65^{\circ}\text{C}$ . Зерносушарка може вимагати вищих температур або прямого нагріву повітря.

Орієнтовне пікове теплове навантаження в зимовий період може сягати 600-800 кВт, тоді як базове теплове навантаження (ГВП) значно нижче.

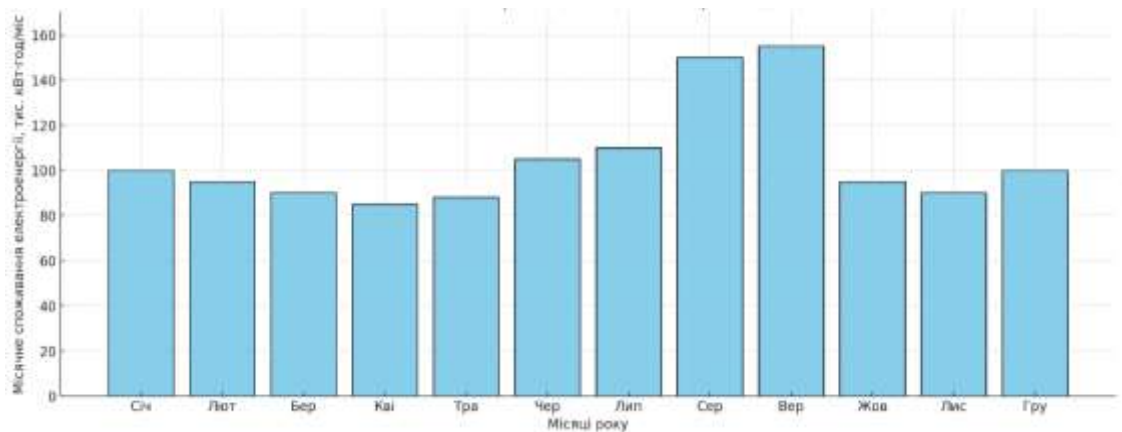


Рис 1.2. Гіпотетичний річний графік споживання електроенергії ФГ “Білі Береги”

### Споживання холоду

Потреби в холоді концентруються переважно в теплий період року, але є і цілорічні складові.

Охолодження молока: Критично важливий процес, що відбувається цілий рік після кожного доїння. Потреба в холоді залежить від обсягів молока та температури навколишнього середовища (влітку навантаження на холодильну установку вище). Необхідна температура охолодження  $\sim 4^{\circ}\text{C}$ .

Охолодження овочесховища: Сезонна потреба, що залежить від типу продукції та термінів зберігання (зазвичай осінь-зима-весна). Вимагає підтримки стабільної низької температури (наприклад,  $+2\dots+5^{\circ}\text{C}$ ).

Кондиціонування: Можлива потреба для адміністративних приміщень в літній період.

Орієнтовне пікове навантаження на систему холодопостачання влітку може становити 150-200 кВт .

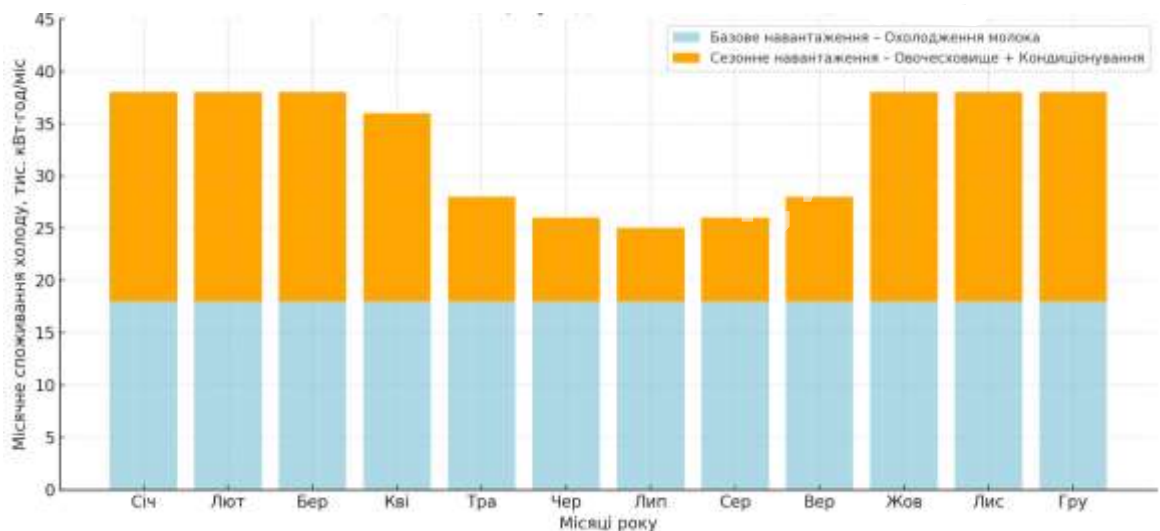


Рис 1.3. Річний графік споживання холоду ФГ «Білі Береги»

### Висновки з аналізу енергоспоживання

Фермерське господарство «Білі Береги» має досить великі потреби в енергоресурсах - зокрема, в електроенергії, теплі та холоді. Серед ключових особливостей енергоспоживання можна виділити такі:

Постійні (базові) навантаження протягом усього року: мінімальне енергоспоживання технологічного обладнання, гаряче водопостачання, охолодження молока тощо.

Помітні сезонні та добові коливання, особливо це стосується споживання теплової енергії (через опалення взимку та роботу зерносушарки восени) й електроенергії.

Значна частина року супроводжується одночасною потребою в електриці, теплі та холоді, що створює передумови для ефективного впровадження тригенераційної установки.

### 1.3. Альтернативи та існуючі варіанти енергопостачання

На сьогодні господарство використовує класичну, доволі поширену схему:

- Електроенергія постачається із зовнішніх електромереж.
- Простота підключення (за наявності мереж поблизу).
- Постійне подорожчання тарифів, ризики перебоїв у постачанні, втратам частини енергії під час транспортування.
- Тепло виробляється локально, у власній котельні, що працює на газі або твердому паливі.
- Незалежність у питанні генерації тепла. Додаткові витрати на паливо й обслуговування, викиди шкідливих речовин, середній ККД котлів зазвичай не перевищує 85–90%.
- Холод виробляється парокомпресійними холодильними машинами (ПКХМ) з електроприводом.
- Сучасна і доступна технологія. Високе споживання електроенергії, а також використання фреонів, що можуть мати негативний вплив на довкілля.

#### Можливі шляхи покращення енергетичної незалежності

З метою підвищення ефективності та екологічності, доцільно розглядати альтернативні або комбіновані джерела енергії:

- Сонячні фотоелектричні панелі (СЕС): Можуть частково покривати денне навантаження, особливо в літній період. Однак уночі не працюють, залежні від погоди та вимагають стабілізації за допомогою акумуляторів або підключення до мережі.

- Сонячні колектори: Ефективні для нагрівання води в теплий період, що дозволяє знизити навантаження на котельню.
- Твердопаливні котли на біомасі: При наявності власної сировини (соломи, залишків рослинництва) можуть бути хорошою альтернативою газовим котлам, хоча забезпечують лише виробництво тепла.
- Біогазові установки з когенерацією: Дозволяють перетворювати гній та інші відходи на біогаз, який потім використовується для виробництва електроенергії й тепла. Це вже суттєвий крок у бік енергонезалежності.
- Тригенерація (електрика + тепло + холод) на базі біогазу: Є сучасним рішенням, особливо для господарств, що потребують одночасного виробництва трьох видів енергії. У такій системі тепло, яке утворюється в процесі когенерації, не втрачається, а використовується для приводу абсорбційної холодильного обладнання (АБХМ), що дозволяє отримати холод без додаткових витрат на паливо.

Чому тригенерація - найкращий варіант для «Білих Берегів»?

Для цього господарства тригенераційна установка, що працює на біогазі, має цілу низку переваг:

1. Закриття всіх потреб - виробляється не лише електроенергія, а й тепло та холод, що охоплює весь спектр енергетичних запитів господарства.
2. Максимальна ефективність - загальний коефіцієнт корисного використання біогазу досягає 85–90%.
3. Сировина - власна - гній від МТФ стає енергетичним ресурсом, а не відходами.
4. Незалежність від ринку - знижується залежність від зовнішніх постачальників електрики та палива.
5. Фінансова доцільність - зменшення витрат на енергоресурси дозволяє швидко повернути вкладені кошти.
6. Екологічна безпека - утилізація гною, зменшення викидів парникових газів, відсутність потреби у фреонах. Крім того, після процесу метаногенезу залишається цінний побічний продукт - органічне добриво (дигестат).

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТРИГЕНЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Цей підрозділ розкриває суть технології когенерації - одного з ключових напрямів у підвищенні енергоефективності, що є важливою складовою теми даної роботи.

Когенерацією називають технологічний процес, у якому одночасно виробляються два види енергії - як правило, електрична та теплова - з одного джерела палива в межах однієї енергетичної установки. У міжнародній практиці така система відома під англійською аббревіатурою CHP (Combined Heat and Power).

Суть когенерації полягає в максимально повному використанні енергії палива. На відміну від традиційних електростанцій, де значна частина тепла втрачається з відпрацьованими газами чи через конденсатори, у когенераційних установках це тепло не відводиться марно, а використовується на користь - для опалення приміщень, підігріву води, технологічних потреб підприємств тощо.

Найчастіше в когенераційних системах як джерело механічної енергії застосовуються газопоршневі двигуни або газові турбіни. Електроенергія виробляється в генераторі, а утилізоване тепло - з вихлопних газів та охолоджуючої рідини - використовується далі в тепловій мережі чи на технологічні цілі.

Таким чином, когенерація дозволяє досягти високого коефіцієнта використання первинного палива - до 75–80% і більше, що значно перевищує ефективність традиційного, роздільного виробництва електрики та тепла. Окрім економії ресурсів, це також сприяє зниженню навантаження на навколишнє середовище завдяки меншій кількості викидів.

Принципова схема простої когенераційної установки (КГУ) показана нижче:

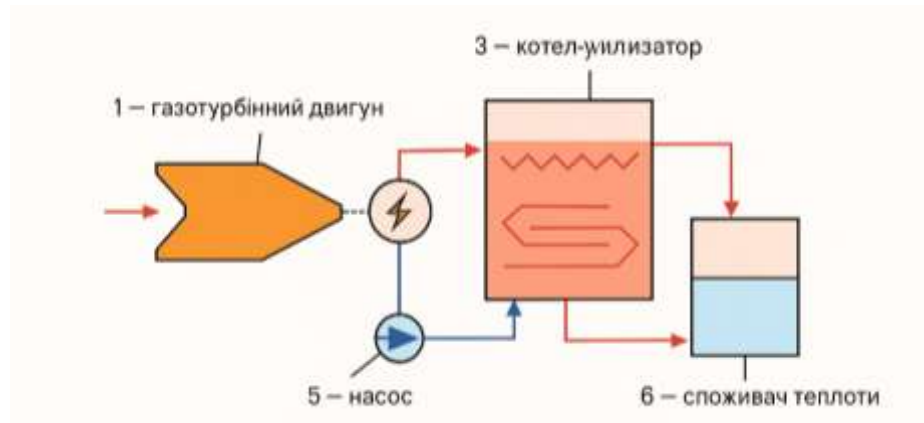


Рис 2.1. Принципова схема простої когенераційної установки  
1 – газотурбінний двигун; 2 – електрогенератор; 3 – котел-утилізатор; 4 – витратний бак живильної води; 5 – насос; 6 – споживач теплоти

## 2.1. Принцип когенерації - комбіноване виробництво тепла та електроенергії:

Когенерація - це технологія, що дозволяє одночасно виробляти електричну та теплову енергію з одного джерела палива в межах однієї установки. Такий підхід забезпечує значно вищу енергоефективність у порівнянні з роздільним виробництвом електрики і тепла.

Суть процесу полягає в тому, що первинне паливо (наприклад, природний газ або біогаз) подається в приводний двигун, яким зазвичай є газопоршневий або газотурбінний агрегат. Цей двигун обертає вал генератора, що виробляє електроенергію. У процесі роботи двигуна виділяється велика кількість тепла - як у вигляді вихлопних газів, так і через системи охолодження (рідинні контури, масляні системи).

Замість того щоб скидати це тепло в атмосферу, воно вловлюється за допомогою теплообмінників і спрямовується на потреби підприємства - для опалення, гарячого водопостачання, технологічного обігріву тощо.

На відміну від традиційного роздільного виробництва енергії, де ККД електростанцій становить приблизно 35–55%, а котельень - 80–95%, сумарна ефективність у такому випадку рідко перевищує 60–70%. Когенераційні системи ж дозволяють досягати загального ККД у межах 75–90% і навіть вище.

Це забезпечує:

- економію палива до 30–40% у порівнянні з класичними схемами;

- зниження викидів шкідливих речовин ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ) на кожну одиницю виробленої енергії;
- підвищену надійність енергопостачання завдяки власному виробництву;
- зменшення втрат при транспортуванні енергії, оскільки виробництво відбувається поруч зі споживачем.

## 2.2. Принцип тригенерації - комбіноване виробництво електроенергії, тепла та холоду (КХТП / ССНР)

Тригенерація - це розширення ідеї когенерації, при якій до електрики і тепла додається ще й виробництво холоду. Такий підхід особливо актуальний для підприємств із потребою не лише в електроенергії й опаленні, а й у кондиціонуванні чи охолодженні, що характерно для літнього періоду.

У системі тригенерації частина теплової енергії, яка утилізується з когенераційної установки, використовується не лише для опалення чи гарячого водопостачання, а й для приводу абсорбційної холодильної машини (АБХМ). На відміну від класичних компресорних холодильників, АБХМ працює не на електриці, а на теплі - зазвичай використовується пароводяна суміш з літій-бромідом.

У контексті ФГ «Білі Береги» така система є особливо доречною, оскільки господарство має потребу в охолодженні молока, зберіганні продукції в овочесховищах і кондиціонуванні приміщень у спекотний період. При цьому влітку знижується потреба в опаленні, і надлишкове тепло, що утворюється в когенераційному модулі, можна ефективно використовувати для генерації холоду.

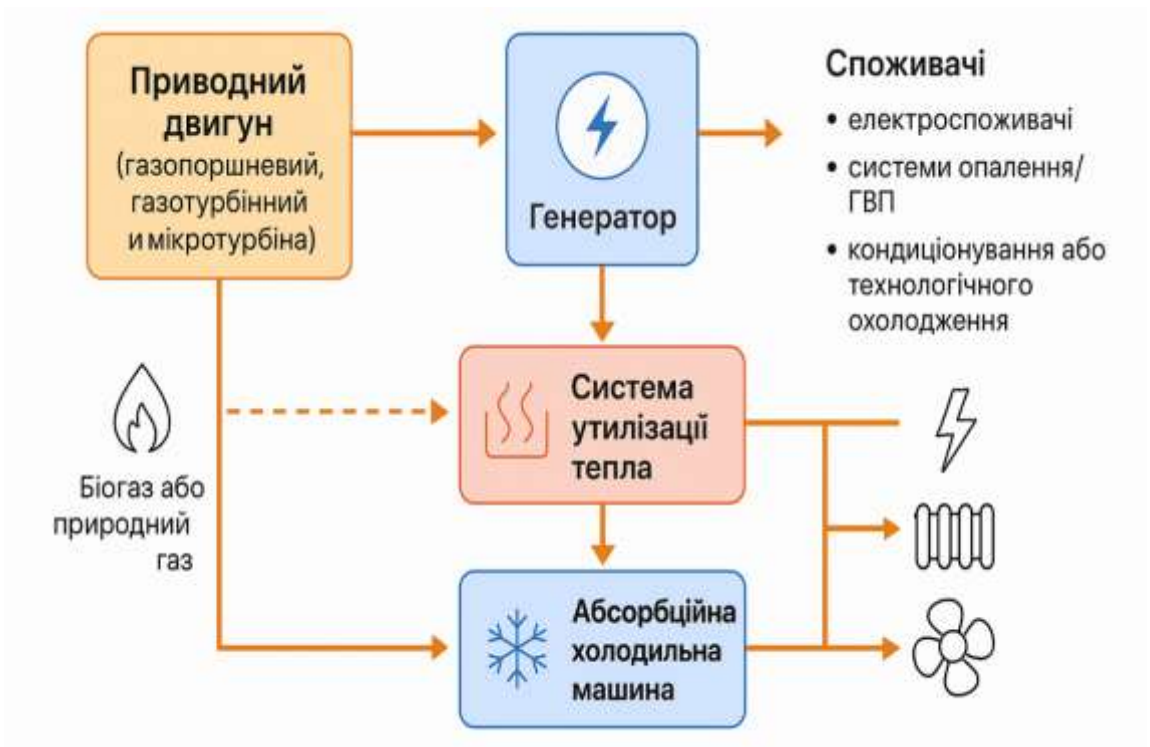


Рис. 2.2. Схема тригенерації

Принципова структура тригенераційної системи включає:

- Приводний двигун (газопоршневий, газотурбінний або мікротурбіна), що споживає біогаз або природний газ.
- Генератор, який виробляє електроенергію.
- Система утилізації тепла, що забирає тепло з вихлопних газів і охолоджуючої рідини.
- Абсорбційна холодильна машина, яка частину цього тепла перетворює на холод.
- Споживачі, серед яких: електроспоживачі, системи опалення/ГВП, кондиціонування або технологічного охолодження.

Переваги тригенерації:

- Раціональне використання надлишкового тепла влітку шляхом його трансформації в холод;
- Зростання загальної ефективності паливовикористання (вище, ніж у звичайній когенерації, якщо є потреба в охолодженні);
- Зменшення потреби в електроенергії для роботи холодильного обладнання, а отже - зниження витрат;

- Зниження пікових навантажень на електромережу в літній період (особливо актуально для систем кондиціонування).

Таким чином, тригенераційна система є не просто доповненням до когенерації, а самодостатнім і універсальним рішенням для сучасних аграрних підприємств із цілорічною потребою в трьох видах енергії.

### 2.3. Основні технології тригенераційних установок

Тригенераційна система складається з кількох ключових компонентів:

- Приводний двигун (Prime Mover): Серце установки, що перетворює хімічну енергію палива на механічну роботу та тепло.
- Електрогенератор: Перетворює механічну роботу двигуна на електричну енергію.
- Система утилізації тепла: Комплекс теплообмінників для відбору тепла від двигуна.
- Тепловикористовуюча холодильна машина: Найчастіше АБХМ, що виробляє холод за рахунок підведеного тепла.
- Система керування: Забезпечує узгоджену роботу всіх компонентів та оптимальний розподіл енергії.

#### Основні технології

Вибір типу приводного двигуна залежить від багатьох факторів: необхідної потужності, виду палива, вимог до надійності, рівня шуму, капітальних та експлуатаційних витрат. Для потреб фермерських господарств найчастіше розглядають:

- Газопоршневі двигуни (ГПД): Це двигуни внутрішнього згоряння, подібні до автомобільних, але оптимізовані для роботи на газовому паливі (природний газ, біогаз, пропан-бутан тощо) в стаціонарному режимі.
- Переваги: Високий електричний ККД (35-45% і вище для сучасних моделей), відносно низькі капітальні витрати в діапазоні потужностей від десятків кВт до кількох МВт, добра гнучкість при зміні навантажень, добре

вивчена технологія, можливість роботи на біогазі з відносно невисоким вмістом метану (після відповідної підготовки).

- Недоліки: Потребують регулярного технічного обслуговування (заміна масла, свічок, фільтрів), генерують вібрацію та шум (потрібна звукоізоляція), мають викиди NO<sub>x</sub>, CO (потрібні системи очищення вихлопних газів).

- Теплоутилізація: Тепло відбирається від системи охолодження двигуна (вода ~90-95°C) та від вихлопних газів (вода ~110-120°C або пара низького тиску). Ця температура достатня для роботи одно- та двоступеневих АБХМ. ГПД є найбільш поширеним вибором для біогазових КГУ та тригенераційних установок на фермах.

- Газові турбіни (ГТУ): Двигуни, що працюють за циклом Брайтона. Повітря стискається компресором, нагрівається в камері згоряння за рахунок спалювання палива, а гарячі газы розширюються в турбіні, обертаючи вал генератора та компресора.

- Переваги: Висока надійність, тривалий ресурс, низький рівень вібрації, компактність, можливість отримання високотемпературного тепла (пара >400°C), що ефективно для промислових процесів або потужних паротурбінних циклів.

- Недоліки: Нижчий електричний ККД в простому циклі порівняно з ГПД (особливо при часткових навантаженнях), вищі капітальні витрати для малих потужностей (<1 МВт), менш ефективні при роботі на біогазі з низьким вмістом метану. Зазвичай використовуються для потужностей від 1 МВт.

- Мікротурбіни: Компактні газотурбінні установки малої потужності (зазвичай 30-300 кВт). Характеризуються високою частотою обертання, низькими викидами NO<sub>x</sub> та CO, низьким рівнем шуму та вібрації, можливістю роботи на різних видах палива. Однак, їх електричний ККД (25-33%) зазвичай нижчий, ніж у ГПД аналогічної потужності, а капітальні витрати можуть бути вищими. Можуть бути доцільними для специфічних застосувань.

Для ФГ "Білі Береги" з орієнтовними потребами та потенціалом біогазу, газопоршневий двигун виглядає найбільш імовірним та доцільним вибором.

#### Системи утилізації тепла

Складаються з комплексу теплообмінників, призначених для відбору тепла від різних контурів двигуна:

- Теплообмінник сорочки охолодження двигуна (відбір тепла від охолоджуючої рідини, зазвичай вода 85-95°C).
- Теплообмінник масляного контуру (також дає низькотемпературне тепло).
- Теплообмінник вихлопних газів (утилізатор): дозволяє охолодити вихлопні гази (з 400-550°C до 120-150°C), нагріваючи воду до вищих температур (до 110-120°C) або генеруючи пару низького тиску. Використовуються різні типи теплообмінників: пластинчасті, кожухотрубні тощо, залежно від параметрів теплоносія та вимог.
- Тепло використовуючі холодильні машини:
  - Абсорбційні холодильні машини (АБХМ): Найбільш поширений тип для тригенерації. Вони використовують теплову енергію замість електричної для здійснення холодильного циклу. Принцип роботи базується на властивостях бінарного розчину (холодагент + абсорбент) змінювати концентрацію при нагріванні та охолодженні.
  - Типи: Найпоширеніші – бромистолітєві (LiBr–H<sub>2</sub>O) та аміачні (NH<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O).
  - АБХМ на LiBr–H<sub>2</sub>O: Використовують воду як холодагент і розчин броміду літію як абсорбент. Дозволяють отримувати охолоджену воду з температурою +5...+7°C (не нижче 0°C, оскільки вода замерзає). Ідеально підходять для систем кондиціонування та охолодження технологічних процесів з плюсовими температурами (як охолодження молока до +4°C). Як джерело тепла зазвичай використовують гарячу воду (80-120°C) або пару низького тиску. Є безпечними та екологічними.

- АБХМ на  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ : Використовують аміак як холодагент і воду як абсорбент. Дозволяють отримувати нижчі температури охолодження (до  $-30\text{...}-60^\circ\text{C}$ ), але аміак є токсичним та вимагає спеціальних заходів безпеки. Використовуються рідше, переважно в промисловості.

- Ефективність: Характеризується холодильним коефіцієнтом (COP – Coefficient of Performance), який показує відношення отриманої холодильної потужності до витраченої теплової потужності. Для одноступеневих АБХМ COP становить 0.6-0.8, для двоступеневих (потребують вищої температури гріючого джерела) – 1.1-1.4.

- Адсорбційні холодильні машини (АдсХМ): Працюють за схожим принципом, але використовують твердий адсорбент (наприклад, силікагель або цеоліт) і холодагент (зазвичай воду). Можуть працювати від джерел тепла з нижчою температурою (від  $55\text{-}60^\circ\text{C}$ ), але мають дещо нижчий COP (0.5-0.7) і більші габарити порівняно з АБХМ тієї ж потужності.

Для ФГ "Білі Береги" з потребами в охолодженні молока та овочесховища до плюсових температур, бромистолітєва АБХМ ( $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ ) є найбільш доцільним вибором.

#### 2.4. Види палива для тригенераційних установок

Вибір палива є одним з визначальних факторів для економіки та екології тригенераційного проекту.

- Біогаз: Є продуктом анаеробного (без доступу кисню) зброджування органічної сировини (гній ВРХ, пташиний послід, свинячий гній, силос, органічні відходи харчової промисловості тощо).

- Склад: Основні компоненти – метан ( $\text{CH}_4$ , 50-75%), вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ , 25-50%). Також містить домішки: сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ), аміак ( $\text{NH}_3$ ), азот ( $\text{N}_2$ ), водяну пару, силосани (якщо використовуються певні види відходів).

- Вимоги до використання в ГПД: Біогаз перед подачею в двигун потребує очищення:

- Видалення сірководню ( $H_2S$ ): викликає сильну корозію обладнання. Допустимий вміст зазвичай  $< 200-500$  ppm.
  - Осушення: видалення водяної пари для підвищення теплотворної здатності та запобігання конденсації.
  - Видалення твердих часток.
  - Видалення силоксанів (якщо вони є в сировині): при згорянні утворюють абразивний діоксид кремнію, що пошкоджує двигун.
  - Переваги для ФГ: Можливість виробництва з власних відходів (гною), що перетворює екологічну проблему на джерело енергії; відновлюване джерело енергії; виробництво якісних добрив (дигестату). Це ключовий варіант для ФГ "Білі Береги".
  - Природний газ: Традиційне викопне паливо, переважно складається з метану ( $CH_4 > 90\%$ ).
  - Переваги: Висока теплотворна здатність, відносно чисте згорання, розвинена інфраструктура газопроводів (за наявності).
  - Недоліки: Невідновлюване джерело, ціна схильна до коливань, викиди  $CO_2$  при згорянні, потрібне підключення до мережі. Може використовуватися як резервне або пускове паливо для біогазових установок.
  - Інші види палива:
  - Скраплений нафтовий газ (LPG, пропан-бутан): Може використовуватися там, де немає природного газу. Потребує ємностей для зберігання та системи газифікації.
  - Дизельне паливо: Зазвичай використовується для резервних дизель-генераторів, рідше – для когенераційних установок через вищі експлуатаційні витрати та викиди.
  - Газ з газифікації біомаси (синтез-газ): Перспективний напрямок, але технологія газифікації складніша за анаеробне зброджування.
- Враховуючи наявність МТФ на ФГ "Білі Береги", основним паливом для тригенераційної установки розглядається біогаз, вироблений на місці.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОМПЛЕКСНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФГ "БІЛІ БЕРЕГИ" НА ОСНОВІ ТРИГЕНЕРАЦІЇ

У цьому розділі, базуючись на аналізі енергетичних потреб ФГ "Білі Береги" (Розділ 1) та теоретичних основах тригенерації (Розділ 2), проводиться обґрунтування вибору потужності, підбір основного обладнання та розробка принципової схеми інтеграції біогазової тригенераційної системи. Всі числові дані, моделі обладнання та розрахунки в цьому розділі є ілюстративними, базуються на припущеннях і потребують перевірки та уточнення для реального проекту.

#### 3.1. Обґрунтування вибору потужності тригенераційної установки

Вибір оптимальної потужності тригенераційної установки (ТГУ) є ключовим кроком, що визначає її економічну ефективність. Рішення приймається на основі аналізу добових та річних графіків споживання електричної, теплової та холодильної енергії, представлених у п. 1.2.

##### Аналіз графіків навантажень

- Електричне навантаження: Середньорічне ~137 кВт, пікове ~250-300 кВт, базове (мінімальне нічне) ~80-100 кВт.
- Теплове навантаження: Середньорічне ~205 кВт , пікове (зима/сушарка) ~600-800 кВт , базове (ГВП) ~50-100 кВт .
- Холодильне навантаження: Середньорічне ~ 46 кВт , пікове (літо) ~150-200 кВт .

##### Стратегія вибору потужності

Існують дві основні стратегії: орієнтація на теплове навантаження (heat-led) або на електричне навантаження (electricity-led).

- Стратегія "heat-led" передбачає вибір потужності ТГУ для покриття базового або середнього теплового навантаження. Це забезпечує максимальне

використання тепла, але може призводити до надлишкової генерації електроенергії (потребує експорту в мережу або скидання) або її нестачі в періоди пікового електроспоживання.

- Стратегія "electricity-led" передбачає вибір потужності для покриття базового або середнього електричного навантаження. Це гарантує високий коефіцієнт використання електричної потужності установки та зменшує залежність від мережі. При цьому може виникати надлишок тепла (потребує скидання або акумуляції) або його нестача (потребує додаткового джерела).

#### Обґрунтування вибору

Враховуючи наявність цілорічного базового електричного навантаження (80-100 кВт) та потенціал власного виробництва біогазу, стратегія, орієнтована на покриття базового електричного навантаження, видається найбільш доцільною для ФГ "Білі Береги". Це дозволить забезпечити максимальну кількість годин роботи ТГУ протягом року (високий коефіцієнт використання встановленої потужності, КВВП), що є критично важливим для окупності біогазових проєктів. Тепло, що виробляється при цьому, буде використовуватися для покриття базових теплових потреб (ГВП) та виробництва холоду в АБХМ, а дефіцит тепла в пікові періоди (опалення, сушарка) покриватиметься існуючою котельнею.

#### Розрахунок потужності ТГУ

Обираємо електричну потужність ТГУ дещо вищу за мінімальне базове навантаження, щоб забезпечити стабільну роботу та покрити частину середнього навантаження. Приймаємо цільову електричну потужність  $P_e = 140$  кВт.

Приймаючи типові показники для біогазових ГПД:

- Електричний ККД ( $\eta_e$ )  $\approx 38\%$
- Тепловий ККД ( $\eta_{th}$ )  $\approx 48\%$
- Загальний ККД ( $\eta_{заг}$ )  $\approx \eta_e + \eta_{th} = 86\%$

Розрахункова теплова потужність установки:

$$P_{th} = P_e \cdot (\eta_{th} / \eta_e) \approx 140 \text{ кВт} \cdot (0.48 / 0.38) \approx 177 \text{ кВт} .$$

Округлюємо до  $P_{th} = 180$  кВт .

Таким чином, для подальшої розробки обирається тригенераційна установка з номінальною електричною потужністю 140 кВт та тепловою потужністю 180 кВт при роботі на біогазі.

Розрахунок потужності АБХМ (приклад):

Пікова потреба в холоді становить 150-200 кВт . Теплова потужність ТГУ – 180 кВт . Приймаємо холодильний коефіцієнт одноступеневої бромистолітєвої АБХМ  $COP \approx 0.7$ .

Максимальна холодильна потужність, яку можна отримати від тепла ТГУ:  
 $P_{cool\_max} = P_{th} \cdot COP = 180 \text{ кВт} \cdot 0.7 \approx 126 \text{ кВт}$  .

Ця потужність нижча за пікову потребу (150-200 кВт ). Можливі варіанти:

1. Встановити АБХМ потужністю 126 кВт , а піковий дефіцит покривати існуючими електрокомпресійними чиллерами.
2. Використовувати додатковий (піковий) котел для живлення АБХМ більшої потужності.
3. Обрати ТГУ більшої потужності (але це може бути економічно недоцільно через неповне завантаження).

Для даної чернетки обираємо Варіант 1, як найбільш простий та такий, що максимізує використання саме "безкоштовного" тепла від ТГУ. Отже, обираємо АБХМ з номінальною холодильною потужністю близько 125 кВт , яка потребуватиме ~180 кВт теплової енергії.

### 3.2. Вибір конкретного обладнання

На основі розрахованих потужностей здійснюється попередній вибір основного обладнання.

- Біогазовий комплекс:
- Сировина: Гній від 400 голів ВРХ (~20 т/добу) + кукурудзяний силос (~10-15 т/добу для досягнення потрібного виходу газу). Припущення: є достатньо силосу.

- Вихід біогазу: Розрахункова потреба ТГУ ( $140 \text{ кВт} / 0.38$ )  $\approx 368 \text{ кВт}$  паливної потужності. При теплотворності біогазу  $\sim 6 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ , годинна потреба  $\approx 61 \text{ м}^3 / \text{год}$ , добова  $\approx 1475 \text{ м}^3 / \text{добу}$ .

- Склад БГУ: Приймальний бункер для силосу, насосна станція для гною, два анаеробних реактори (ферментери) типу CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) з підігрівом, загальним об'ємом  $\sim 3000\text{-}3500 \text{ м}^3$ , система перемішування, система сепарації дигестату, газгольдер (мембранний, об'ємом  $\sim 1000 \text{ м}^3$ ), система очищення біогазу (біологічна десульфуризація  $\text{H}_2\text{S}$ , система осушення/охолодження газу).

- виробник/постачальник: На ринку України є компанії, що пропонують комплексні рішення (напр., Zorg, Укртепло та ін.).

Тригенераційна установка (ТГУ):

- Тип: Контейнерний когенераційний модуль на базі газопоршневого двигуна, оптимізованого для роботи на біогазі.

- модель: Наприклад, модуль на базі двигуна MWM TCG 3016 V08 , з електричною потужністю  $\sim 140\text{-}150 \text{ кВт}$  та тепловою потужністю  $\sim 180\text{-}190 \text{ кВт}$  (гаряча вода  $90^\circ\text{C}$ ). Модуль має включати: двигун, генератор, систему утилізації тепла (теплообмінники охолодження двигуна та вихлопних газів), систему керування, шумоізоляційний контейнер, систему підготовки біогазу (якщо не винесена окремо).

Абсорбційна холодильна машина (АБХМ):

- Тип: Одноступенева бромистолітєва ( $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ ), з приводом від гарячої води.

- модель: Наприклад, АБХМ виробництва Broad або Thermax з номінальною холодильною потужністю  $125 \text{ кВт}$  при температурі гріючої води  $90^\circ\text{C}$  та температурі охолоджуючої води (від градирні)  $30^\circ\text{C}$ . Виробляє охолоджену воду з температурою на виході  $7^\circ\text{C}$ .

Допоміжне обладнання:

- Тепловий акумулятор (буферна ємність): Бак для гарячої води об'ємом 15 м<sup>3</sup> для згладжування коливань між виробництвом та споживанням тепла, оптимізації роботи ТГУ.
- Градирня (охолоджувальна вежа): Випарного типу, для відведення скидного тепла від АБХМ (~300 кВт). Потужність вентиляторів та насосів градирні має бути врахована в загальному електроспоживанні.
- Насосне обладнання: Циркуляційні насоси для контурів: гріючої води (ТГУ-Буфер-АБХМ/Споживачі), охолодженої води (АБХМ-Споживачі), контуру градирні.
- Система автоматизації та керування (АСК ТП): На базі програмованого логічного контролера (PLC). Забезпечує моніторинг параметрів, керування роботою БГУ, ТГУ, АБХМ, насосів, клапанів, взаємодію з резервними системами (котел, чиллери, мережа), оптимізацію режимів роботи, збір даних та диспетчеризацію.

### 3.3. Розробка принципової схеми інтеграції системи

Інтеграція розробленої тригенераційної системи в існуючу (або проєктовану) енергетичну інфраструктуру ФГ "Білі Береги" є ключовим завданням. Принципова схема показує взаємозв'язок основних елементів.

Схема включає наступні основні контури та зв'язки:

1. Біогазовий контур: Сировина (гній, силос) подається в реактори БГУ. Вироблений біогаз накопичується в газгольдері, проходить систему очищення (фільтри H<sub>2</sub>S, осушувач) і подається до ТГУ. Дигестат після БГУ спрямовується на сепаратор (розділення на рідку та тверду фракції) і далі на поля як добриво.
2. Електричний контур: Генератор ТГУ підключений до головного розподільчого щита (ГРЩ) господарства. Передбачається паралельна робота з зовнішньою електромережею через систему захисту та обліку. Електроенергія від ТГУ пріоритетно споживається на власні потреби ФГ. Можливий імпорт електроенергії з мережі при пікових навантаженнях або зупинці ТГУ. (Експорт

надлишків - опціонально, вимагає окремого обґрунтування та умов). Передбачається можливість роботи ТГУ в острівному режимі для живлення критичних навантажень (МТФ) під час зникнення зовнішньої мережі.

3. Тепловий контур: Тепло, утилізоване від ТГУ (гаряча вода  $\sim 90^{\circ}\text{C}$ ), спрямовується в тепловий акумулятор (буферну ємність). З буфера гаряча вода подається:

- a. Споживачам тепла (система опалення, теплообмінники ГВП, підігрів реакторів БГУ).
- b. На вхід генератора АБХМ як гріюче джерело. Резервна/пікова котельня (газова або твердопаливна) підключена до теплової мережі паралельно і вмикається автоматично при нестачі тепла від ТГУ або під час її зупинки.

4. Контур холодопостачання: АБХМ виробляє охолоджену воду ( $\sim 7^{\circ}\text{C}$ ). Ця вода циркулює через споживачів холоду (теплообмінник охолоджувача молока, повітроохолоджувачі овочесховища, можливо, фанкойли системи кондиціонування). Опціонально може бути передбачений буферний бак холодної води. Існуючі електрокомпресійні чиллери залишаються як резервне/пікове джерело холоду.

5. Контур скидного тепла АБХМ: Тепло, що відводиться від абсорбера та конденсатора АБХМ ( $\sim 35-40^{\circ}\text{C}$ ), за допомогою окремого контуру теплоносія (води) подається на градирню, де скидається в атмосферу.

6. Система керування: Центральний контролер (PLC) отримує дані від датчиків (температури, тиску, витрати, електричні параметри, рівень газу), керує клапанами, насосами, роботою ТГУ (старт/стоп, навантаження), АБХМ, взаємодіє з резервними системами та зовнішньою мережею, забезпечуючи оптимальний та безпечний режим роботи всієї системи.



Рис 3.1. Схема інтеграції

### 3.4. Опис режимів роботи системи

Робота тригенераційної системи змінюється залежно від сезону та добових коливань навантажень.

Зимовий режим (опалювальний період):

- Потреби: Висока потреба в теплі (опалення, ГВП), помірна в електриці, низька/помірна в холоді (охолодження молока).
- Робота ТТУ: Працює з високим навантаженням, близьким до номінального, виробляючи електрику та тепло.
- Тепло: Все тепло від ТТУ спрямовується в теплову мережу та буфер. Якщо тепла ТТУ недостатньо для покриття пікового попиту, автоматично вмикається резервна котельня.
- Холод: АВХМ працює з мінімальним навантаженням або не працює. Потреба в охолодженні молока покривається АВХМ (якщо працює) або резервним чиллером.
- Електрика: ТТУ покриває базове та частину середнього електроспоживання. Піковий дефіцит покривається з мережі.
- Літній режим (неопалювальний період):

- Потреби: Низька потреба в теплі (лише ГВП), висока потреба в холоді (охолодження молока, овочесховище, кондиціонування), висока потреба в електриці (вентиляція, холодильне обладнання).
- Робота ТГУ: Навантаження визначається потребою в електриці або потребою в теплі для АБХМ (залежно від стратегії керування).
- Тепло: Основна частина тепла від ТГУ спрямовується на привід АБХМ. Невеликий надлишок може йти на ГВП або накопичуватися в буфері. Якщо тепловий буфер повний і потреба в ГВП задоволена, а АБХМ не потребує більше тепла, надлишкове тепло ТГУ може скидатися через аварійний радіатор (якщо передбачено).
- Холод: АБХМ працює з високим навантаженням, покриваючи базову та середню потребу в холоді (до 125 кВт). Піковий дефіцит (понад 125 кВт) покривається резервними електрокомпресійними чиллерами. Градирня працює інтенсивно.
- Електрика: ТГУ покриває частину електроспоживання. Значний дефіцит, особливо в денні піки, покривається з мережі.
  - Перехідні періоди (весна/осінь):
  - Потреби: Помірні та змінні потреби в теплі, холоді та електриці.
  - Робота системи: Режим роботи ТГУ та розподіл тепла (на опалення/ГВП чи на АБХМ) оптимізується системою керування в реальному часі. Тепловий акумулятор активно використовується для балансування.
- Період сушіння зерна: Короткий період з дуже високою потребою в теплі та значною потребою в електриці. ТГУ працює на максимальній потужності. Значну частину теплової потреби покриває резервна котельня.
- Взаємодія з мережею та резервування: Система працює паралельно з мережею, імпортує дефіцит електроенергії. При зникненні зовнішньої мережі ТГУ (якщо має таку функцію) може перейти в острівний режим, забезпечуючи живлення критичних споживачів (МТФ). Резервна котельня та чиллери забезпечують надійність тепло- та холодопостачання під час планових зупинок або аварій ТГУ/АБХМ.

- Залежність від біогазу: Стабільна робота ТГУ залежить від безперебійного виробництва та подачі біогазу належної якості. Газгольдер згладжує короткочасні коливання. Система керування має відслідковувати рівень газу та відповідно коригувати навантаження ТГУ. Можливість автоматичного переходу на резервне паливо (природний газ, якщо підведений) підвищує надійність.

## РОЗДІЛ 4

### ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

У цьому розділі проводиться оцінка технічної, економічної та екологічної доцільності впровадження розробленої в Розділі 3 біогазової тригенераційної системи для ФГ "Білі Береги". Оцінка базується на порівнянні показників роботи запропонованої системи з базовим сценарієм (традиційне енергозабезпечення від мережі та власних котлів/чилерів).

#### 4.1. Розрахунок енергетичного балансу та продуктивності системи

4.1.1. Припущення для розрахунку: Електрична потужність  $P_e = 140$  кВт, Теплова потужність  $P_t = 180$  кВт, Електричний ККД  $\eta = 38\%$ , Тепловий ККД  $\eta = 48\%$ .

- Абсорбційна холодильна машина (АБХМ): Холодильна потужність  $P = 125$  кВт, Тепловий COP = 0.7 (потреба в теплі  $P = P / \text{COP} \approx 178.6$  кВт).

- Біогаз: Теплотворна здатність  $Q = 6.0$  кВт·год/м<sup>3</sup>. Виробництво біогазу достатнє для роботи ТГУ.

- Режим роботи ТГУ: Планується робота протягом 8000 годин на рік (КВВП  $\approx 91\%$ , враховуючи час на планове обслуговування та можливі зупинки). Робота переважно на номінальній потужності.

- Потреби ФГ (річні): Електрика = 1,200,000 кВт·год; Тепло = 1,800,000 кВт·год; Холод = 400,000 кВт·год.

Базовий сценарій:

- Електрика купується з мережі.
- Тепло виробляється котлом (природний газ) з середньорічним ККД  $\eta = 85\%$ .
- Холод виробляється електрокомпресійними чилерами (ПКХМ) з середньорічним холодильним коефіцієнтом COP = 3.0.

#### 4.1.2. Річне виробництво енергії тригенераційною системою:

Виробництво електроенергії ТГУ:

$$E = P_e \cdot t = 140 \cdot 8000 = 1,120,000 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (4.1)$$

Покриття потреби в електроенергії:  $(1,120,000 / 1,200,000) \cdot 100\% \approx 93.3\%$ . Дефіцит електроенергії (імпорт з мережі):  $1,200,000 - 1,120,000 = 80,000$  кВт·год/рік.

Виробництво теплової енергії ТГУ:

$$Q_{\text{теп}} = P_T \cdot t = 180 \cdot 8000 = 1,440,000 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (4.2)$$

Виробництво холоду АБХМ: Приймаємо, що АБХМ працює для покриття всієї річної потреби в холоді (400,000 кВт·год), оскільки її потужність (125 кВт) дозволяє це зробити за прийнятну кількість годин. Необхідний час роботи АБХМ:

$$t = \frac{Q_p}{P} = \frac{400\,000}{125} = 3200 \text{ год/рік} \quad (4.3)$$

Спожите тепло для АБХМ:

$$Q_{\text{хол}} = \frac{Q_p}{COP} = \frac{400\,000}{0.7} \approx 571,429 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (4.4)$$

Корисне тепло ТГУ для опалення та ГВП:

Тепло, що залишається після забезпечення роботи АБХМ:

$$Q_{\text{над}} = Q_{\text{теп}} - Q_{\text{хол}} = 1\,440\,000 - 571\,429 = 868\,571 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (4.5)$$

Покриття потреби в теплі (опалення/ГВП): Загальна потреба 1,800,000 кВт·год. Частка, покрита ТГУ =  $(868,571 / 1,800,000) \cdot 100\% \approx 48.3\%$ . Дефіцит тепла (покривається резервним котлом):  $1,800,000 - 868,571 = 931,429$  кВт·год/рік.

#### 4.1.3. Річне споживання палива біогазу ТГУ:

паливна потужність ТГУ:

$$P_t = \frac{P}{\eta} = \frac{140}{0.38} \approx 368.4 \text{ кВт} \quad (4.6)$$

Річне споживання енергії палива:

$$Q_{\text{річ}} = \frac{P_t}{t} = 2\,947\,368 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (4.7)$$

Річне споживання біогазу (об'єм):

$$V_{\text{річ}} = \frac{Q_{\text{річ}}}{q} \approx 491\,228 \text{ м}^3/\text{рік} \quad (4.8)$$

- Споживання палива резервним котлом (природний газ): Необхідно виробити 931,429 кВт·год . Споживання енергії палива =  $Q / \eta = 931,429 \text{ кВт} \cdot \text{год} / 0.85 \approx 1,095,800 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$ . (Якщо  $1 \text{ м}^3 \text{ газу} \approx 10 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ , то споживання газу  $\approx 109,580 \text{ м}^3/\text{рік}$ ).

#### 4.1.4. Енергоспоживання в базовому сценарії споживання електроенергії з мережі:

На власні потреби: 1,200,000 кВт·год/рік.

На привід ПКХМ:

$$E_{\text{ПКХМ}} = \frac{Q_{\text{хол}}}{\text{COP}} = \frac{400\,000}{3} \approx 133\,333 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (4.10)$$

Загальне споживання електроенергії:

$$Q_e = Q_{\text{п}} + E_{\text{ПКХМ}} = 1,200,000 + 133,333 = 1,333,333 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (4.11)$$

Споживання палива котлом:

Необхідно виробити 1,800,000 кВт·год .

$$Q_{\text{пал}} = \frac{Q_{\text{п}}}{\eta} = \frac{1\,800\,000}{0.85} \approx 2\,117\,647 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (4.12)$$

Споживання газу  $\approx 211,765 \text{ м}^3/\text{рік}$

#### 4.1.5. Порівняння та енергетична ефективність:

Для розрахунку первинної енергії мережевої е/е потрібно врахувати ККД генерації та передачі (напр., прийняти 35-40%). Якщо ККД мережі = 40%, то

первинна енергія для  $e/e = 1,333,333 / 0.4 = 3,333,333$  кВт·год. Тоді Всього перв. енергії (база) =  $2,117,647 + 3,333,333 = 5,450,980$  кВт·год.

Первинна енергія для  $e/e$  (триген) =  $80,000 / 0.4 = 200,000$  кВт·год. Тоді Всього перв. енергії (триген) =  $2,947,368 + 1,095,800 + 200,000 = 4,243,168$  кВт·год.

Економія первинної енергії:  $5,450,980 - 4,243,168 = 1,207,812$  кВт·год/рік (близько 22%).

Таблиця 4.1

## Кількість первинної енергії в залежності від сценарію

Показник	Базовий сценарій	Сценарій з тригенерацією	Економія / Заміщення
Імпорт електроенергії, кВт·год	1,333,333	80,000	1,253,333 (94.0%)
Виробництво власної $e/e$ , кВт·год	0	1,120,000	+1,120,000
Споживання газу (котел), кВт·год	2,117,647	1,095,800	1,021,847 (48.3%)
Споживання біогазу, кВт·год	0	2,947,368	-
Всього первинної енергії, кВт·год	3,450,980 (Газ+E/e)	4,123,168 (Біогаз+Газ+E/e)	-672,188

Для розрахунку первинної енергії мережевої  $e/e$  потрібно врахувати ККД генерації та передачі (напр., прийняти 35-40%). Якщо ККД мережі = 40%, то первинна енергія для  $e/e = 1,333,333 / 0.4 = 3,333,333$  кВт·год. Тоді Всього перв. енергії (база) =  $2,117,647 + 3,333,333 = 5,450,980$  кВт·год.

Первинна енергія для  $e/e$  (триген) =  $80,000 / 0.4 = 200,000$  кВт·год. Тоді Всього перв. енергії (триген) =  $2,947,368 + 1,095,800 + 200,000 = 4,243,168$  кВт·год.

Економія первинної енергії:  $5,450,980 - 4,243,168 = 1,207,812$  кВт·год/рік (близько 22%).

Висновок по розділу 4.1: Запропонована тригенераційна система дозволяє покрити ~93% потреби ФГ в електроенергії, всю потребу в холоді (за рахунок тепла ТГУ) та ~48% потреби в теплі (опалення/ГВП). Це призводить до значного скорочення закупівлі мережевої електроенергії (на 94%) та природного газу для котельні (на 48%), заміщуючи їх біогазом власного виробництва. Розрахункова економія первинної енергії становить близько 22%.

#### 4.2. Капітальні витрати (CAPEX):

Як було оцінено в попередньому розділі 3.2. загальні капітальні витрати є дуже значними і складаються з:

Таблиця 4.2

#### Загальні капітальні витрати

Компонент	Орієнтовна вартість, €
Біогазовий комплекс (з очисткою)	1,000,000
Тригенераційна установка (140 кВт)	220,000
Абсорбційна холод. машина (125 кВт )	80,000
Допоміжне обладнання (буфери, насоси, градирня, АСК ТП)	100,000
Проектування, монтаж, пусконаладження	420,000
Всього CAPEX	1,820,000

Це ключовий фактор, що впливає на окупність.

4.2.1. Операційні витрати (ОРЕХ) та річна економія наведені в таблиці 4.3:

Таблиця 4.3

## Операційні витрати

Показник / Сценарій	Базовий сценарій (€/рік)	Сценарій з тригенерацією (€/рік)
Витрати:		
Закупівля електроенергії з мережі	200,000 (1.33M kWh·0.15)	12,000 (80k kWh·0.15)
Закупівля природного газу (котел)	105,882 (2.12M kWh·0.05)	54,790 (1.10M kWh·0.05)
Вартість біогазу (виробництво)	0	73,684 (2.95M kWh·0.025)
Обслуговування та ремонт (О&М)	5,000	44,000
(БГУ: 1М·3% = 30к)		
(ТГУ: 220к·4% = 8.8к ≈ 9к)		
(АБХМ+Доп: (80к+100к)·2% = 3.6к ≈ 5к)		
Персонал (додатковий)	0	10,000
Всього ОРЕХ	310,882	194,474
Річна економія (ОРЕХ_база - ОРЕХ риген)		116,408 €/рік

Простий термін окупності (SPB):

$$SPB = CAPEX / \text{Річна економія} = 1,820,000 \text{ €} / 116,408 \text{ €/рік} \approx 15.6 \text{ років.}$$

4.2.4. Аналіз чутливості (Ілюстративний). Оцінимо, як зміни ключових параметрів впливають на простий термін окупності (SPB):

Таблиця 4.4

## Термін окупності

Параметр	Зміна	Нове значення	Річна економія, €	Новий SPB, років	Зміна SPB
Базовий сценарій	-	-	116,408	15.6	-
CAPEX	-20%	1,456,000 €	116,408	12.5	-3.1 р.
CAPEX	+20%	2,184,000 €	116,408	18.8	+3.2 р.
Тариф на ел/ен (купівля)	+30%	0.195 €/kWh	~154,300	~11.8	-3.8 р.
Тариф на ел/ен (купівля)	-20%	0.12 €/kWh	~91,500	~19.9	+4.3 р.
Вартість виробництва біогазу	+50%	0.0375 €/kWh	~80,000	~22.8	+7.2 р.
Вартість виробництва біогазу	-50%	0.0125 €/kWh	~153,000	~11.9	-3.7 р.
Сценарій "Зелений Тариф"	-	Продаж 600 MWh·0.12€	~116k+72k = ~188k	~9.7	-5.9 р.

Приблизна оцінка зміни річної економії при зміні одного параметра. Припустимо, ТГУ працює більше годин, виробляє надлишок 600 МВт·год е/е, який продається за ЗТ 0.12 €/кВт·год (додатковий дохід 72,000 €).

Висновки аналізу чутливості: Проект є надзвичайно чутливим до капітальних витрат та тарифів на електроенергію. Зниження CAPEX (наприклад, за рахунок державних субсидій) або суттєве зростання тарифів на

електроенергію може зробити проект привабливим. Введення "зеленого" тарифу на електроенергію з біогазу кардинально покращує економіку. Вартість виробництва власного біогазу також є важливим фактором.

#### 4.3. Екологічна оцінка

Впровадження біогазової тригенераційної установки має значні позитивні екологічні наслідки порівняно з базовим сценарієм.

Таблиця 4.5

#### Екологічні наслідки

Категорія ризику	Опис ризику	Заходи з пом'якшення
Технічні	Нестабільне виробництво біогазу	Контроль якості сировини, моніторинг параметрів, автоматичне регулювання, досвідчений персонал
Технічні	Низька якість біогазу (H <sub>2</sub> S, волога)	Очищення газу, моніторинг якості, вибір толерантного ТГУ
Технічні	Аварії або зупинки ТГУ	Надійне обладнання, сервісний контракт, запасні частини, регулярне ТО
Технічні	Збої в роботі АБХМ	Регламентне обслуговування, контроль вакууму та теплообмінників
Технічні	Відмова системи керування	Якісні датчики, дублювання, тестування, дистанційна діагностика

Продовження таблиці 4.6

Економічні	Перевищення бюджету (CAPEX)	Точне проектування, тендер, резервний бюджет (10–15%)
Економічні	Зміна тарифів або умов підтримки	Фокус на власне споживання, моніторинг змін законодавства
Економічні	Високі операційні витрати (OPEX)	Фіксовані контракти, оптимізація логістики, енергоменеджмент
Операційні	Дефіцит кваліфікованого персоналу	Навчання персоналу, сервісні контракти, автоматизація
Операційні	Ризики безпеки (CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S, тиск)	ATEX, вентиляція, заземлення, навчання з ОП, інструкції
Операційні	Логістика сировини/дигестату	Логістичне планування, техніка, підрядники
Юридичні	Зміни екологічного законодавства	Проектування з запасом, моніторинг законодавства
Юридичні	Складність з отриманням дозволів	Консультанти, раннє планування процесу узгоджень
Юридичні	Проблеми підключення до мережі	Попередні ТУ, врахування витрат у фінансовій моделі

## ВИСНОВКИ

У межах даної дипломної роботи було вирішено прикладне завдання - розроблено й обґрунтовано систему комплексного енергозабезпечення для фермерського господарства «Білі Береги» з використанням тригенераційної установки на біогазі. Актуальність теми підтверджується зростаючою потребою аграрного сектору в підвищенні енергоефективності, зменшенні залежності від викопного палива та покращенні екологічної ситуації за рахунок утилізації органічних відходів.

На підставі проведених досліджень і розрахунків сформульовано такі основні висновки:

### 1. Аналіз енергоспоживання господарства

ФГ «Білі Береги», яке займається рослинництвом і тваринництвом, має високі та нерівномірні потреби в енергії: електроенергія - близько 1,2 млн кВт·год/рік, тепло - 1,8 млн кВт·год/рік, холод - 0,4 млн кВт·год/рік.

Господарство також має значний енергетичний потенціал - постійне надходження відходів (гній і силос), що створює умови для виробництва біогазу і впровадження тригенераційної технології.

### 2. Доцільність впровадження тригенерації

Технологія тригенерації забезпечує одночасне отримання трьох видів енергії з одного джерела палива, дозволяючи досягати загального ККД на рівні 85–90%.

### 3. Розрахунок параметрів системи

Було обрано й обґрунтовано такі ключові елементи системи: біогазова установка продуктивністю до 1500 м<sup>3</sup>/добу, газопоршнева тригенераційна установка на 140 кВт електроенергії та 180 кВт тепла, абсорбційна холодильна машина потужністю 125 кВт, допоміжне обладнання: буферна ємність, градирня, система керування, резервне джерело тепла.

### 4. Енергетична ефективність системи

Запропонована система дозволяє щорічно: виробляти до 1,12 млн кВт·год електроенергії (~93% потреб), забезпечити 100% потреб у холоді (400 тис. кВт·год), покрити майже половину потреб у теплі (~868 тис. кВт·год).

Завдяки цьому: скорочується споживання електроенергії з мережі на ~94%, зменшується споживання газу на 48%, економія первинної енергії становить близько 22%.

#### 5. Економічна доцільність проекту

За наявними умовами реалізації:

капітальні витрати (CAPEX) - близько 1,82 млн євро щорічна економія експлуатаційних витрат - ~116 тис. євро;

термін окупності - близько 15 років

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Желих В. М., Струтинський С. В. Системи теплопостачання та когенерації: Підручник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. 448 с. [https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Tezy\\_2024.pdf](https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Tezy_2024.pdf)
2. Дубровін В. О., Литвиненко А. М. Відновлювана енергетика в агропромисловому комплексі: Навчальний посібник. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2019. 320 с. [https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia\\_final\\_21.12.2020.pdf](https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf)
3. Кудря С. О., Головка В. М. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка, 2017. 564 с. [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/zbirnik\\_tez\\_kch2023.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/zbirnik_tez_kch2023.pdf)
4. Басок Б. І., Дубровська В. В. Біогазові технології: теорія і практика : монографія. Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України, 2019. 352 с. <https://science.lpnu.ua/uk/vasyl-zhelyh>
5. Лендел Т. І., Синявський О. Ю. Технології виробництва та використання біогазу в умовах фермерських господарств : монографія. Київ : Аграрна наука (НУБіП), 2020. 285 с. <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vstanovlennya-tarifiv-na-teplovu-energiyu-ii-virobnitstvo-transportuvannya-postachannya-derzhavnomu-miskomu-pidpriemstvu-ivano-frankivskteplokomunenergo?id=48686>
6. Ткаченко С. Й., Мельник І. В. Економічне обґрунтування проектів біоенергетичних комплексів в аграрному секторі // Економіка АПК. 2021. № 5. С. 50-58.
7. Паламарчук Д. О. Підвищення ефективності енергозабезпечення тепличних господарств шляхом впровадження тригенерації : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2020. 20 с. [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=82135](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82135)
8. ДСТУ EN ISO 7933:2018 Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового стресу з використанням розрахунку

прогнозованого теплового навантаження (ISO 7933:2004, IDT).  
[https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=78064](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78064)

9. ДСТУ 8825:2018 Біопаливо тверде. Визначення вмісту летких речовин.
10. Статистичний щорічник України за 2023 рік / Державна служба статистики України. Київ, 2024. <https://irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000317162>
11. Методика розрахунку тарифів на теплову енергію, вироблену з використанням відновлюваних джерел енергії : Постанова НКРЕКП № 1234 від 15.10.2022.  
[https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u169/200152\\_13.01.2020\\_pidsumki\\_2019\\_final\\_17\\_98\\_0\\_0.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u169/200152_13.01.2020_pidsumki_2019_final_17_98_0_0.pdf)

**БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

02.03 – КР.2024 «С» 2024.11.12 004 ПЗ

**ГОРДІНА ОЛЕКСАНДРА ВАСИЛЬОВИЧА**

2025 р.