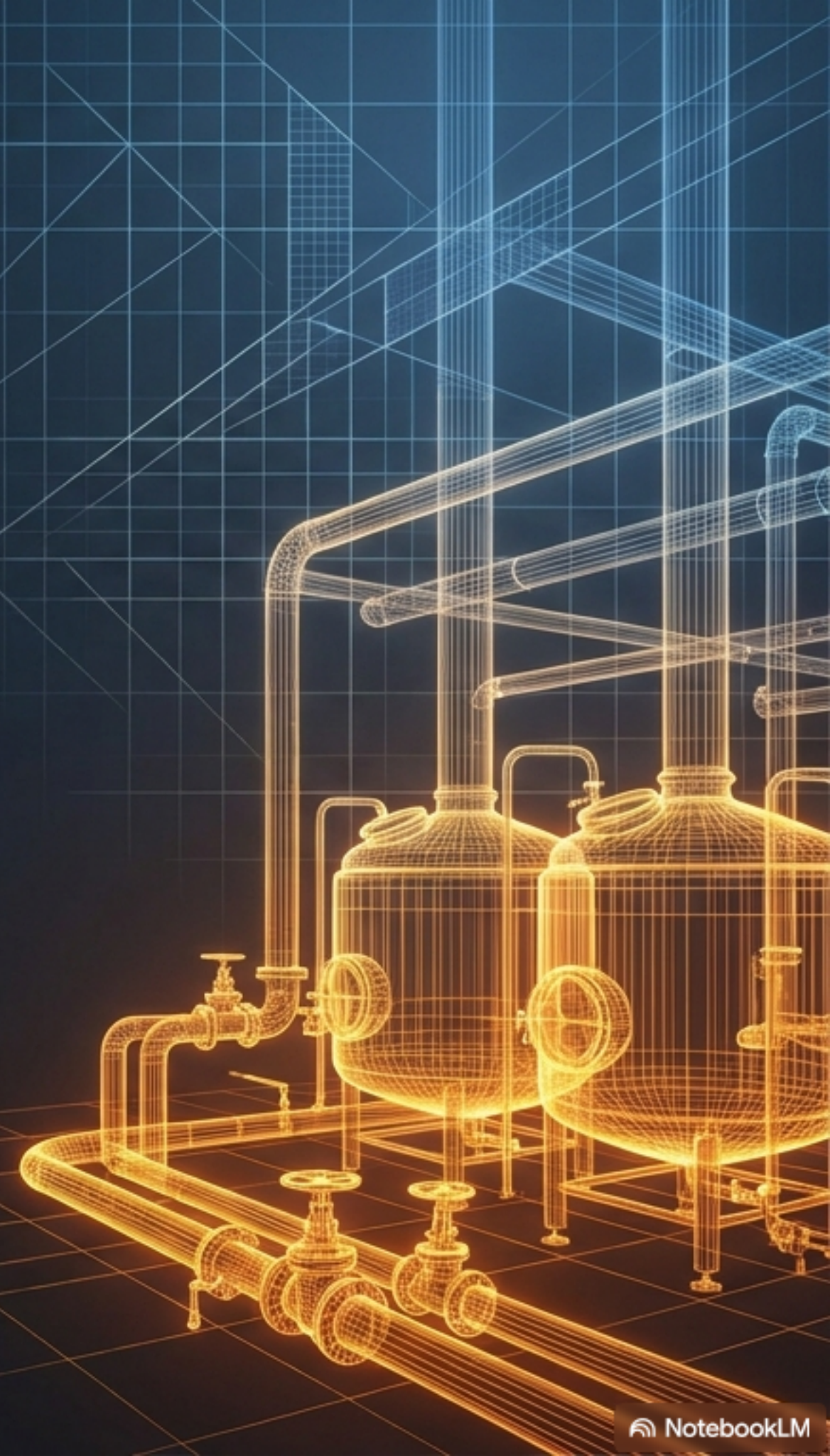


Ексергетична оптимізація керування когенераційною системою пивоварні з використанням варіаційних нерівностей

К. О. Волчанська
Запорізький національний університет

XXVII міжнародна науково-практична конференція
«Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті»



Дилема когенерації: Розрив між електричними та тепловими циклами пивоваріння



Проблема узгодження:

Повне узгодження графіків споживання електроенергії та теплоти неможливе через циклічну природу пивоваріння.

Обмеження класичного підходу:

Традиційні системи змушені обирати єдиний пріоритет (електричний або тепловий графік), що призводить до неминучих втрат.

Ілюзія першого закону термодинаміки та прихована деградація



Процес горіння:

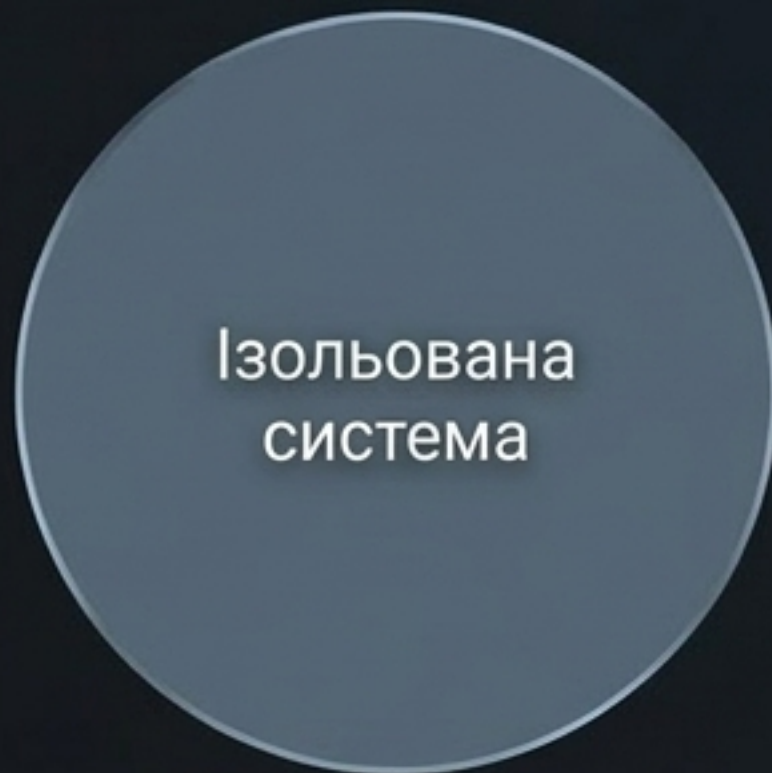
Кількість енергії димових газів залишається високою, але здатність виконувати корисну роботу стрімко падає.

Незворотність:

Традиційний енергетичний баланс, розрахований ізольовано, залишається «сліпим» до якісної деградації теплоносія.

Ексергетичний підхід розкриває локалізацію технічної недосконалості

Традиційний баланс



Ексергетичний баланс



Ексергія дозволяє оптимізувати систему не за об'ємом енергії, а за мінімально необхідним перепадом температур для збереження її «якості».

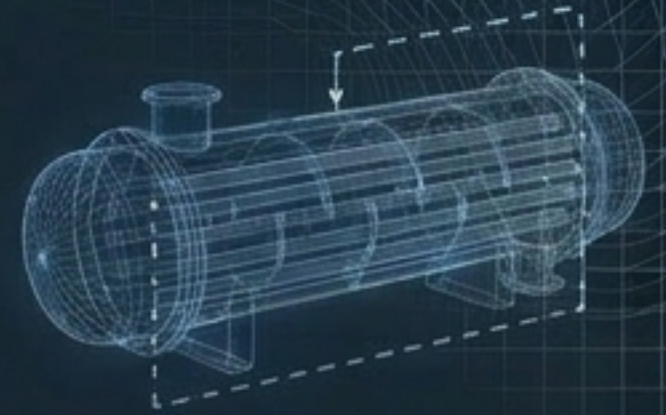
Математичний бар'єр: Чому класичні рівняння не працюють для реальних середовищ

Характеристика	Класичний підхід (Рівняння Ейлера-Лагранжа)	Новий підхід (Варіаційні нерівності)
Властивості середовища	Ідеальне	Реальне (з вираженою дисипацією)
Характер процесів	Рівноважні та зворотні	Незворотні (фазові переходи, поверхнева енергія)
Баланс віртуальної роботи	Дорівнює нулю ($= 0$)	Додатний (> 0)
Фазові координати	Необмежені простори	Жорстко обмежені технологічні множини (K)

У реальних середовищах частина роботи незворотно йде на внутрішні структурні зміни. Перехід від рівностей до нерівностей — це не просто математичний трюк, а вимога фізичної реальності.

Пошук оптимальності на межі: Апарат варіаційних нерівностей

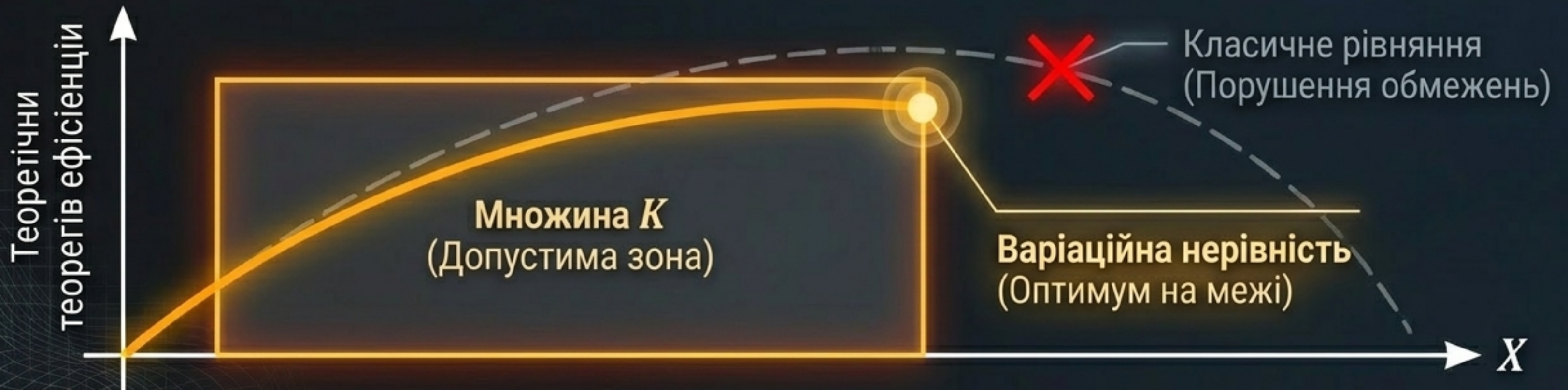
$$\left\{ \langle \mathbf{F}(\mathbf{u}^*), v - \mathbf{u}^* \rangle \geq 0, \forall v \in K \right\}$$



$\mathbf{F}(\mathbf{u}^*)$ = Градієнт втрат ексергії
(оператор динаміки
ексергетичного балансу)

\mathbf{u}^* = Оптимальний
вектор керування

K = Множина допустимих
технологічних режимів

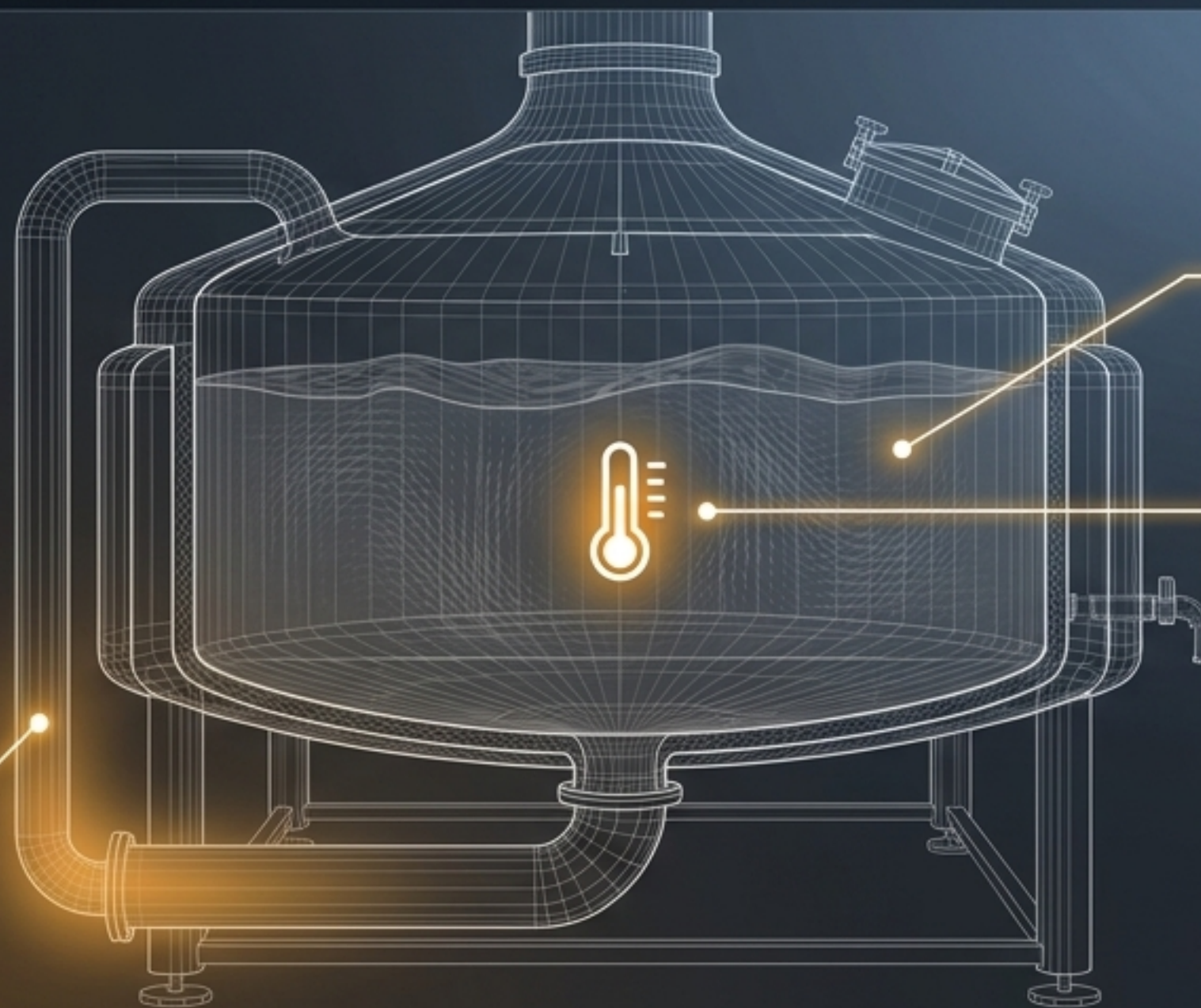


Тестова модель: Підтримка температурного режиму заторного апарата

Ключове завдання:

Забезпечити паузу оцукрювання (62°C), мінімізувавши втрати ексергії та зберігши якість пари для паралельної генерації електроенергії.

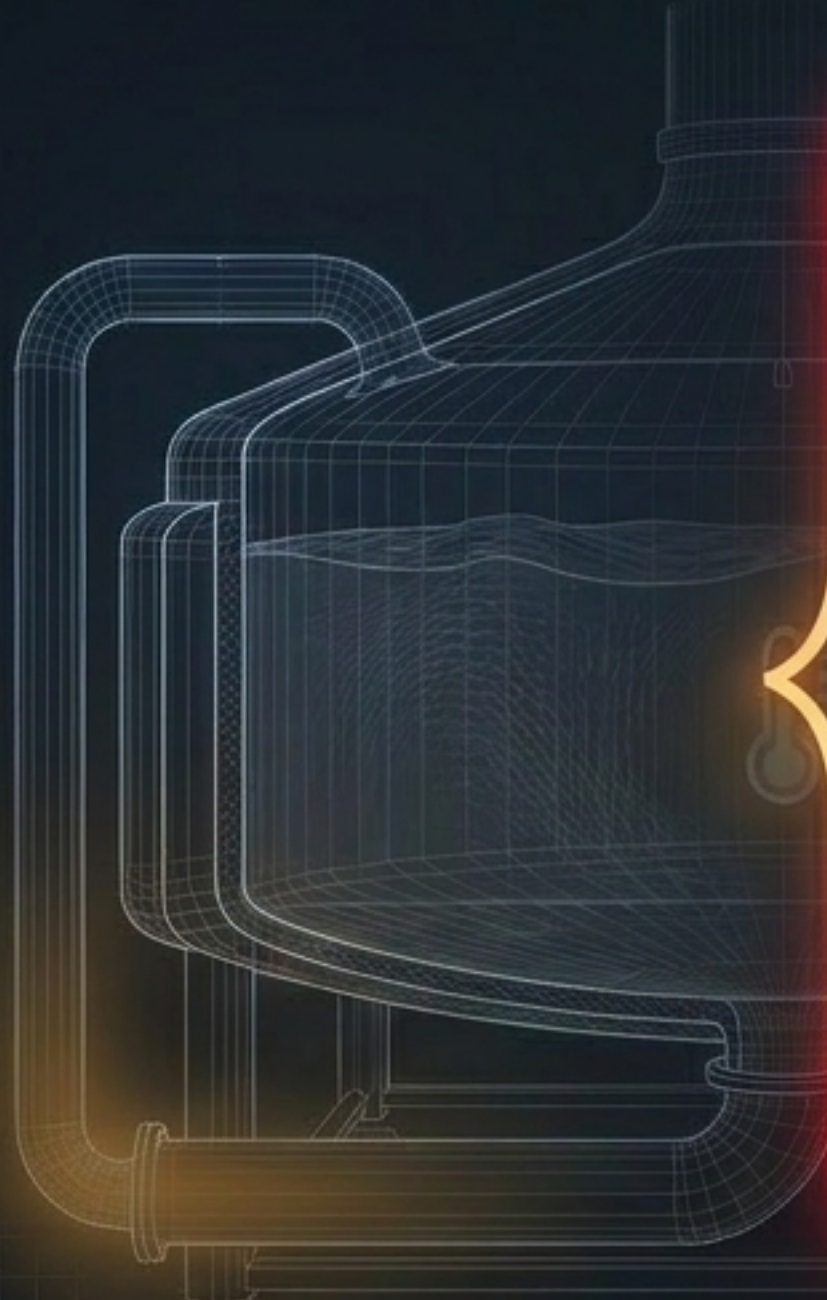
Джерело тепла:
Пара від когенераційної
установки



Робоче середовище:
Сусло

Критична точка:
62°C

Формування множини обмежень (K): Межі фізичної реальності



Температурний ліміт

Ризик: Пригорання сусла, небажані фазові зміни, деградація продукту.



Ліміт потужності

Ризик: Дефіцит миттєвої теплової потужності когенерації; падіння вироблення електроенергії для інших цехів.



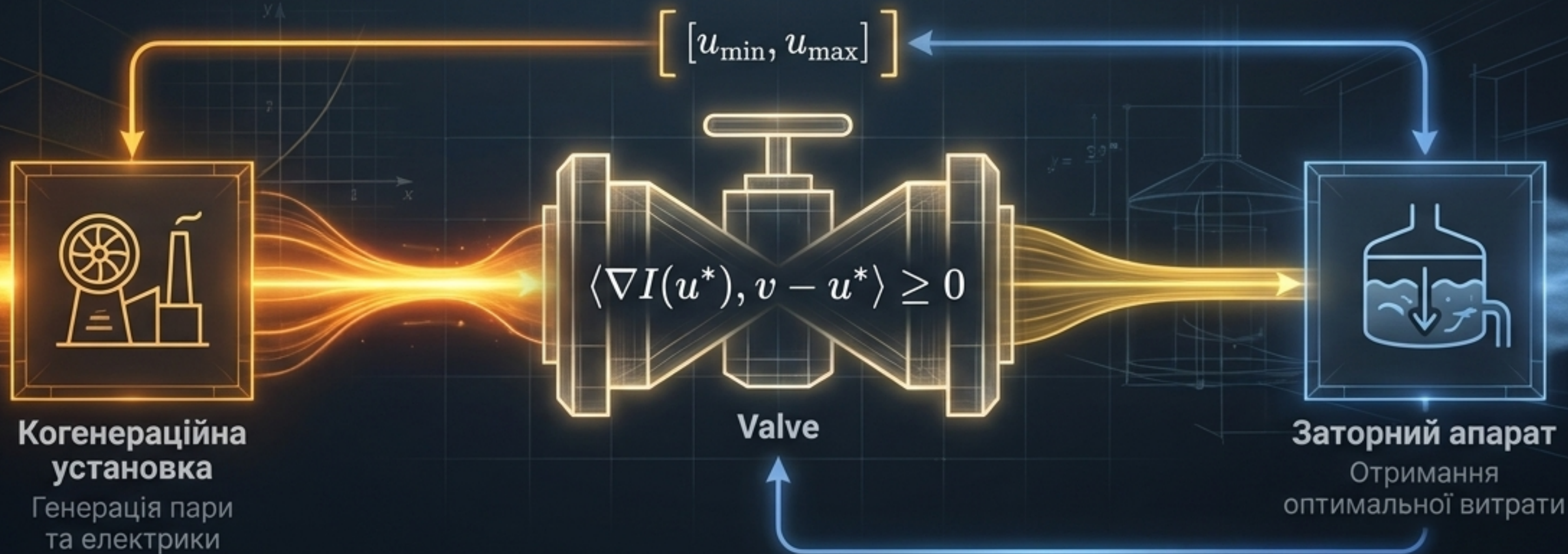
ΔT Теплообмінника

Ризик: Максимальні втрати ексергії через надмірну різницю температур теплоносіїв.

Ці жорсткі технологічні межі формують **допустиму множину** керування:

$$K = [u_{\min}, u_{\max}]$$

Динамічна мінімізація втрат: Архітектура керування системою



Алгоритм не просто фіксує потоки, а працює як математичний фільтр. Він динамічно знаходить витрату пари u^* , яка мінімізує **функціонал втрат ексергії** $I(u)$ суворо на межі технологічних обмежень пивоварні, гарантуючи захист від перегріву та дефіциту.

Результати впровадження ексергетичної оптимізації

12–15%



Зниження втрат

Запропонований підхід знижує сумарні втрати ексергії в системі на 12–15% порівняно зі стандартними стратегіями регулювання.



Гарантована стійкість

Застосування нерівнісних принципів забезпечує стабільність алгоритму при різких змінах навантажень (циклічність пивоваріння).



Практична автоматизація

Теоретична модель варіаційних нерівностей успішно трансформована у дієвий інструмент автоматизованого керування для харчової промисловості.